

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paie-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN SCIENCES, TECHNOLOGIE ET
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE : PHYSIQUE ET APPLICATION

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

B.P 812 Yaoundé

Email : crfdstg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace –Work – Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,
TECHNOLOGY & GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

DEPARTMENT OF PHYSICS

P.O BOX 812 Yaoundé

Email: crfdstg@uy1.uninet.cm

LABORATOIRE DE MECANIQUE MATERIAUX ET STRUCTURES
LABORATORY OF MECHANICS, MATERIALS AND STRUCTURES

**APPROCHE DE CARACTERISATION ACOUSTIQUE,
THERMOPHYSIQUE ET MECANIQUE DES MATERIAUX
LOCAUX AU CAMEROUN : LE CAS DU POTO-POTO**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/PhD en Physique

Option : Science des Matériaux

Par

KOWA KETCHADJI Éric Bertrand,

Matricule : 04S229

Master en Physique

Sous la Direction de :

PETTANG Chrispin, Professeur,

Université de Yaoundé I

Année : 2023





DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTEMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE
DOCTORAT/Ph.D

Nous, Pr WOAFU Paul, Pr BEN-BOLIE Germain Hubert et Pr NDJAKA Jean-Marie Bienvenu, respectivement Examineurs et Président du Jury de la thèse de Doctorat/PhD de Monsieur KOWA KETCHADJI Eric Bertrand, matricule 04S229, préparée sous la direction du Pr PETTANG Chrispin, intitulée : « Approche de caractérisation acoustique, thermophysique et mécanique des matériaux locaux au Cameroun : le cas du poto-poto », soutenue le **lundi 15 janvier 2024** en vue de l'obtention du grade de Docteur/PhD en Physique, Spécialité Sciences des Matériaux, attestons de ce 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 de droit.

Fait à Yaoundé, le 29 JAN 2024

Les Examineurs

Pr BEN-BOLIE G. H.

Pr WOAFU P.

Le Président du Jury

Pr NDJAKA Jean-Marie Bienvenu

Le Chef de Département de Physique



Professeur

Dédicaces

Ce travail est dédié à mes grands-parents et à mes parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation.

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce travail n'aurait pas pu être possible sans la grâce de **Dieu**, le Tout Puissant. Gloire lui soit rendue pour ses multiples bienfaits dans ma vie et celle de ma famille.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements et ma **reconnaissance infinie** au **Professeur PETTANG Chrispin** qui a dirigé ce travail de bout en bout. Sa rigueur d'homme de sciences et de pédagogue, sa grande disponibilité jamais démentie, son **implication personnelle** dans la recherche de laboratoire pour les mesures acoustiques, ses paternels conseils et orientations, son attention honnête et clémente ont été pour moi un solide support et une source de motivation supplémentaire. **MERCI infiniment Professeur.**

Je voudrais, de manière particulière, rendre un hommage appuyé au **Professeur Joël DUCOURNEAU** du Laboratoire d'Acoustique de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Lorraine. Sa disponibilité salubre pour le suivi des mesures expérimentales du coefficient d'absorption acoustique, effectuées sous sa conduite dans ce laboratoire, a été d'un très grand pas pour l'aboutissement des travaux de cette thèse. Son implication personnelle aura été pour moi plus que motivant.

Merci au **Professeur WOAFU Paul** pour avoir accompagné la réalisation de ce travail. Ses conseils, ses observations et ses orientations ont largement contribué à son aboutissement.

Mes sincères remerciements au **Pr NANA NBENJO Blaise Roméo** pour m'avoir tenu la main depuis mes années de licence. Ses conseils avisés m'ont été d'un apport indéniable.

Je tiens à remercier tous **les enseignants du Département de physique** de l'Université de Yaoundé I, plus précisément ceux du laboratoire des Sciences de Matériaux à la tête desquels le Chef de Département, le **Professeur NDJAKA Jean-Marie Bienvenu**, dont la contribution directe ou indirecte à ce travail mérite d'être relevée et saluée. Je pense tout aussi à Mesdames et Messieurs les Professeurs **KOFANE Timoléon Crépin**, **OWONO OWONO Luc Calvin**, **ZEKENG Serge Sylvain**, **BEN-BOLIE Germain Hubert**, **HONA Jacques**, **NJANDJOCK NOUCK Philippe**, **TCHAWOUA Clément**, **WAKATA Annie**, **ENYEGUE A NYAM Françoise**, **MVOGO Alain**, **NDOP Joseph**, **FOUEDJO David** et **EDONGUE Hervais**.

Mes remerciements à Madame le Chef de Département de Génie Civil de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, **Professeur MANJIA Marceline Blanche épouse ZANG**, dont le laboratoire de géotechnique a été le lieu de certains essais dans le cadre de cette thèse. Je voudrais dans la même logique, exprimer ma sincère gratitude au **Professeur Pierre MEUKAM** pour avoir mis gracieusement à notre disposition le dispositif expérimental plan chaud asymétrique pour la caractérisation thermophysique de certains de nos échantillons.

A mon épouse, **Mme KOWA née NGEKWI NUIJIWE Cléopatra** et à mes enfants, **Chrispin Junior PETTANG NANA**, **Ange Divine KWIKA ADAHUI KOWA**, **Eric Sylvestre KOWA**, à qui je n'ai parfois pas accordé suffisamment de temps et d'attention, mais qui malgré tout, ont su me comprendre et me soutenir pendant les moments de grandes difficultés, je leur dis infiniment Merci. De simples mots ne suffiront peut-être pas pour leur exprimer toute ma reconnaissance.

Je salue la disponibilité du **Dr. PETTANG NANA Joyce Merveilles épouse NOAH** et du **Dr DAMFEU Claude** dont la collaboration scientifique aura été d'un apport certain.

Mes sincères remerciements à Messieurs **KOUSKE Raymond, TAKAM Éric, FANDJIO Cabral, MBIADA Patrick** pour la collaboration sincère et le soutien qui ont tout aussi contribué à rendre possible l'aboutissement de ce travail.

Mes amitiés aux aînés et autres collègues doctorants du Laboratoire de Sciences des Matériaux : **Dr TEYOU NGOUPO Ariel, Dr. ABOMO Xavier, Dr TADJOUTEU ASSATSE Yannick, Dr YOSSA KAMSI Richard, Dr KEYAMPI WATIO Martial, Dr MVEME Come Damien, Dr. NJEUMEN Christian Aimé, Dr. FANKAM FANKAM Jean Baptiste pour ne citer que ceux-là**, pour la sympathie et l'esprit de convivialité qui prévaut au laboratoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je n'oublie pas Monsieur **KEMMEUGNI Dieudonné** en service au laboratoire d'Analyse, Essai et Matériau de la MIPROMALO et à travers lui, le Directeur Général de cette structure, qui a facilité la réalisation de certains essais géotechniques dans le cadre de ce travail.

Je suis très reconnaissant envers **ma famille** notamment **mes frères, sœurs, tantes et oncles** pour m'avoir soutenu et encouragé dans cette exercice.

Mes plus sincères remerciements et ma reconnaissance infinie à Monsieur le **Sénateur NGOUCHINGHE Sylvestre** pour son soutien multiforme et constant. Ces remerciements vont également à l'endroit de **Monsieur PANY Faustin**.

A tous ceux dont la contribution de près ou de loin aura permis l'aboutissement de ce travail, je dis Merci !

Résumé

Les grands enjeux environnementaux actuels encouragent, voire imposent la prise en compte des aspects du développement durable dans tous les secteurs d'activités. Le secteur des bâtiments n'est donc pas en reste, au contraire, il est l'un des secteurs qui présentent le plus grand indice de consommation énergie/carbone et pour lequel des solutions méritent d'être envisagées.

Ces solutions pourraient par exemple passer par une maîtrise de cet indice de consommation énergie/carbone ou encore par l'adaptation à l'environnement directe de construction des caractéristiques physiques des matériaux utilisés. Les matériaux locaux deviennent alors un véritable support pour ces grands enjeux environnementaux.

C'est ce qui justifie l'objectif principal de ce travail qui porte sur la caractérisation acoustique, thermophysique et mécanique d'un matériau local très largement utilisé au Cameroun à des fins d'écoconstruction, mais très insuffisamment, voire pas du tout exploré : le poto-poto. L'absence de données dans la littérature sur ce matériau nous a menés à un double travail : dans un premier temps du point de vue thermophysique et mécanique, et ensuite, du point de vue acoustique afin de mettre à la disposition de la communauté scientifique et des décideurs des données fiables sur ce matériau pouvant en faciliter la promotion et la vulgarisation à grande échelle.

Du point de vue de la caractérisation thermophysique, un dispositif expérimental plan chaud asymétrique, basé sur la modélisation quadripolaire 1D a été développé et simulé pour l'estimation de l'effusivité thermique E et de la capacité thermique volumique ρC_p . Les résultats obtenus ont montré que la conductivité thermique de ce matériau diminue avec l'augmentation des fibres de bambou. Cela s'est observé à partir du matériau de référence (0% de fibres) qui présente déjà en lui-même une conductivité thermique plus faible que celle du bloc de sable ordinaire ($1,15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), mais dont l'ajout de fibres de bambou à partir de 2% contribue à diminuer cette conductivité pour la ramener à $0,65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à un dosage 6% de fibres de bambou. Les résultats de la conductivité thermique du poto-poto ont permis donc de justifier qu'à une teneur maximale en fibres de bambou de 6%, le matériau mis en place est non seulement un bon isolant thermique ($\lambda=0,65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), mais, respecte également les normes mécaniques propres aux matériaux de remplissage ($R_c > 2 \text{ MPa}$).

Les études acoustiques basées sur le modèle de Biot, ont permis de réaliser une modélisation numérique 2D d'une paroi en poto-poto par couplage des éléments finis (FE) et des éléments de frontière (BE). Les courbes d'absorption acoustique issues de ce couplage, en comparaison à celles issues des mesures en laboratoire, ont indiqué des écart-types acceptables et ont permis d'aboutir à un résultat indiquant que le poto-poto présente une absorption acoustique dans la gamme de fréquences 500-1250Hz et peut donc être efficacement utilisé pour la mise en œuvre acoustique, dans cette gamme de fréquences, des parois et certains locaux des bâtiments.

Mots Clés : Matériaux locaux, Ecoconstruction, Poto-Poto, Couplage éléments finis-éléments de frontière, Coefficient d'absorption, Caractérisation thermophysique, Caractérisation acoustique.

Abstract

Today's major environmental challenges encourage, or even require, the consideration of sustainable development aspects in all sectors of activity. The buildings sector is not left out, on the contrary, it is one of the sectors with the highest energy/carbon consumption index and for which solutions deserve to be considered.

These solutions could, for example, involve controlling the energy/carbon consumption index or adapting the physical characteristics of the materials used to the direct construction environment. Local materials then become a real support for these major environmental issues.

This justifies the main objective of this work, which concerns the acoustic, thermophysical and mechanical characterisation of a local material widely used in Cameroon for eco-construction purposes, but very insufficiently, if at all, explored: poto-poto. The lack of data in the literature on this material led us to carry out a twofold study: firstly, from the thermophysical and mechanical points of view, and secondly, from the acoustic point of view, in order to provide the scientific community and decision-makers with reliable data on this material, which could facilitate its promotion and popularisation on a large scale.

From the thermophysical characterisation point of view, an asymmetric hot plane experimental setup, based on 1D quadrupole modelling was developed and simulated for the estimation of thermal effusivity E and volumetric heat capacity ρC_p . The results obtained showed that the thermal conductivity of this material decreases with increasing bamboo fibres. This was observed from the reference material (0% fibres) which already has a lower thermal conductivity than the ordinary sand block ($1.15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), but the addition of bamboo fibres from 2% contributes to decrease this conductivity to $0.65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ at 6% bamboo fibres. The results of the thermal conductivity of the poto-poto have therefore made it possible to justify that, at a maximum bamboo fibre content of 6%, the material used is not only a good thermal insulator ($\lambda=0.65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), but also respects the mechanical standards for filling materials ($R_c > 2 \text{ MPa}$).

Acoustic studies based on the Biot model, allowed for 2D numerical modelling of a poto-poto wall by coupling finite elements (FE) and boundary elements (BE). The sound absorption curves resulting from this coupling, in comparison with those resulting from laboratory measurements, indicated acceptable standard deviations and led to a result indicating that poto-poto has sound absorption in the 500-1250Hz frequency range and can therefore be effectively used for the acoustic implementation, in this frequency range, of walls and certain premises in buildings.

Keywords: Local materials, Ecoconstruction, Poto-Poto, Coupling finite elements-boundary elements, Absorption coefficient, Thermophysical characterisation, Acoustic characterisation.

Table des matières

Dédicaces.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
Résumé.....	v
Abstract	vi
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Abréviations	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	6
INTRODUCTION.....	7
I- Typologie des matériaux locaux au Cameroun.....	8
a) Le matériau terre.....	9
i) Rappel historique	9
ii) Un matériau granulaire	11
iii) Les différentes techniques de construction en terre	12
iv) Propriétés thermiques de certaines techniques de constructions en terre	13
b) Le bambou de structure.....	19
i) Propriétés physiques du bambou	20
✓ Densité relative	20
✓ Porosité du bambou.....	21
✓ Module d'élasticité.....	22
✓ Résistance à la flexion (ou au pliage)	22
✓ Résistance à la compression.....	23
✓ Résistance à la traction	23
✓ Résistance au cisaillement.....	24
✓ Comportement non linéaire du bambou	25
✓ Comportement du bambou en termes de durcissement élastique et d'assouplissement de la contrainte	26
c) La Pierre Naturelle.....	28
d) Le bois d'œuvre	29
e) Les Fibres Naturelles.....	31
II- Problématique des matériaux de construction et leur production.....	33
3- Maîtriser la consommation d'énergie grise : une astuce en faveur de la construction durable	
36	

III- Travaux de recherches sur la caractérisation de certains matériaux locaux disponibles au Cameroun : la terre, le chanvre, la fibre de palmier, bambou.....	40
a) Sur l'aspect de la caractérisation thermophysique et/ou mécanique.....	40
b) Sur l'aspect de la caractérisation acoustique	44
CONCLUSION.....	46
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	47
INTRODUCTION	48
2.1. Matériaux et protocole de confection des éprouvettes	48
2.1.1. Matériaux.....	48
A) La terre.....	48
i) Analyse granulométrique optimale du matériau terre	49
ii) Représentation graphique des résultats du tamisage	49
A) Les fibres de bambous de chine.....	50
2.1.2. Protocole de confection des éprouvettes pour la caractérisation thermophysique et mécanique	51
i) Prélèvement puis séchage de la terre	52
ii) Préparation des fibres de bambou	52
iii) Fabrication des éprouvettes proprement dites	53
a) Eprouvettes pour la caractérisation thermophysique.....	53
b) Eprouvettes pour la caractérisation acoustique	55
iv) Mode opératoire	55
2.2. Méthodologie d'identification.....	56
2.2.1. Caractérisation des Constituants	56
➤ Formulation : Pourcentage massique des constituants.....	56
➤ Calcul du pourcentage massique des fibres de bambou dans l'échantillon.	56
i) Essai de Teneur en Eau naturelle (NF P94-050).....	56
ii) Essai d'analyse granulométrique (Norme NF P94-056).....	57
iii) Essai de poids spécifique (NF P94-054)	58
iv) Essai de détermination des Limites d'Atterberg (NF P94-051).....	59
v) Essai Proctor	60
vi) ESSAIS MECANIQUES.....	62
a) Essai en flexion.....	62
b) Essai en compression (ARS681 : 1996 BTC) (NC 114, 2002-2006).....	64
c) Mesure de la porosité [NC 114, 2002-2006].....	65
2.3. Outils et modélisation.....	66
2.3.1. Outils et méthode de caractérisation thermophysique et mécanique	66

2.3.1.1.	Modélisation par les quadripôles thermiques	66
a)	La méthode des quadripôles thermiques	66
b)	Quadripôles en géométrie 1D	67
c)	Les principales méthodes de caractérisation thermique	70
d)	Les différentes méthodes de mesures en régime quasi-établi	71
i.	La méthode du fil chaud	71
d)	La méthode du ruban chaud	74
e)	La méthode du plan chaud	75
2.3.2.	Dispositif du plan chaud asymétrique pour l'estimation des paramètres thermophysiques du poto-poto	77
2.3.2.1.	Modélisation quadripolaire 1D	79
2.3.1.2.1	Modèle 1D pour un modèle semi-infini	79
2.3.1.2.2	Modèle quadripolaire 1D asymétrique pour le modèle complet	81
2.3.3.	Outils et méthode de caractérisation acoustique	82
2.3.3.1.	Modèle poroélastique de Biot	82
2.3.3.2.	Formulation éléments finis {u-p}	83
2.3.3.3.	Equation de la phase solide sous la formulation (u, p)	84
2.3.3.4.	Equation de la phase fluide sous la formulation (u, p)	85
2.3.3.5.	La formulation intégrale faible	85
2.3.4.	Discrétisation de la forme faible élémentaire	85
2.3.4.1.	Modélisation numérique du fluide	87
2.3.4.2.	Équation d'onde du fluide	87
2.3.4.3.	Fonction de Green	88
2.3.4.4.	Forme intégrale de l'équation de Helmholtz	88
2.3.5.	Formulation élément de frontière (BEM) [Ciskowski et al., (1991), Odd, (1983)]	88
2.3.6.	Couplage éléments finis-éléments de frontière	91
2.3.7.	Impédance acoustique normale	94
2.3.8.	Dispositif expérimental de mesure du coefficient d'absorption acoustique	95
CONCLUSION		97
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION		98
INTRODUCTION		99
3.1.	Résultats expérimentaux	99
3.1.1.	Résultats des essais d'identification	99
a)	Résultats d'analyse granulométrique	99
b)	Résultats des essais de porosité	100
c)	Résultats des Essai de mesure du coefficient de poisson	100

3.1.2.	Résultats de la caractérisation thermophysique	101
3.1.2.1.	Thermogrammes expérimentaux des températures.....	101
	102	
3.1.3.	Thermogrammes du modèle.....	103
3.1.3.1.	Pré-estimation de E et ρC_p : Thermogramme de températures obtenues avec le modèle simplifié	103
3.1.3.2.	Estimation à partir du modèle complet.....	105
3.2.	Résultats de mesures du coefficient d'absorption acoustique	112
3.2.1.	Les résultats de simulations numériques.....	113
3.2.2.	Résultats des mesures expérimentales du coefficient d'absorption acoustique des échantillons à l'aide du tube de Kundt (tube à ondes stationnaires).	114
I-	l'influence de l'épaisseur du matériau sur le coefficient d'absorption acoustique.....	115
II-	Influence de l'ajout des fibres de bambou sur l'absorption acoustique.....	117
3.2.3.	Etude comparative.....	119
	CONCLUSION	122
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	123
	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ISSUES DE LA THESE.....	134

Liste des figures

Figure I-1. a) Arche de Ctésiphon ; b) Pyramide d'El-Lahoun ; c) Ziggourat d'Etemenanki ; d) Cité Chan-Chan (Jehanne PAULUS, 2014).....	10
Figure I-2. Architecture de terre dans le monde (Source : https://craterre.org/)	10
Figure I-3. La terre, un matériau recyclable (Anger & Fontaine, 2009)	11
Figure I-4. Classification des grains (Anger & Fontaine, 2009)	12
Figure I-5. Roue des techniques de construction en terre (Anger & Fontaine, 2009).....	13
Figure I-6. Murs homogène en pisé : élevés en compactant la terre dans des coffrages, avec des fouloirs manuels ou pneumatiques, (Florie Dejeant et al, 2021)	16
Figure I-7. Technique de mise en œuvre d'une construction en bauge, (CRATerre, 1998)	17
Figure I-8. Technique de mise en œuvre du torchis	17
Figure I-9. Mise en œuvre de l'adobe	18
Figure I-10. Mise en œuvre de la brique de terre comprimée	18
Figure I-11. Les différentes parties du bambou, (Benoît Hargot, 2009)	19
Figure I-12. Comportement non linéaire de matériaux d'ingénierie typiques, (Fozao, 2019).....	26
Figure I-13. Courbe monotone typique de contrainte-déformation uniaxiale pour le bambou, (Fozao, 2019).....	27
Figure I-14. Revêtement d'un pan de mur en pierre.....	29
Figure I-15. Maison en ossature bois, Ec(H)ome, (2010).	31
Figure I-16. Centre artisanal du Typha, Maka Diama, Sénégal. Architecte : Atelier Migrateur Architecture	32
Figure I-17. Analyse du cycle de vie d'un bâtiment.....	34
Figure I-18: Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment (citemaïsons.fr).....	36
Figure I-19. Laines minérales: a) Laine de verre; b) laine de roche dissimulée entre deux murs	38
Figure I-20. Les isolants synthétiques: a) EPS; b) XPS; c) PUR	38
Figure I-21. Exemple de fibres de bois	39
Figure I-22. La laine de chanvre.....	39
Figure I-23. Les fibres de paille	40
Figure I-24. Comparaison du coefficient d'absorption de la fibre de bambou et de la laine de verre (T. Koizumi et al 2002).....	44
Figure I-25. Coefficient absorption des fibres de bois pur de 6 cm d'épaisseur	45
Figure I-26. Coefficient absorption d'un échantillon de 14 cm d'épaisseur d'un panneau de roseau, (Francesco Asdrubali et al., 2015).....	45
Figure II-1. Terre prélevée	48
Figure II-2. Diagramme de texture de notre matériau terre.....	49
Figure II-3. Courbe d'analyse granulométrique.....	49
Figure II-4. Fibres de bambou : a) tige de bambou, b) bambou défibré, c) fibre de bambou immergées	51
Figure II-5. Eprouvettes pour les essais : a) pour caractérisation thermophysique b) pour essais de compression c) pour essai de flexion.....	52
Figure II-6. Terre prélevée et séchée.....	52
Figure II-7. Bambou sec défibré.....	53
Figure II-8. Moule en acier Ep5 de dimension 10 cm x 10 cm x 5 cm	53
Figure II-9. Etapes de préparation des échantillons de pote-pote pour la caractérisation thermophysique : a) Terre prélevée puis séchée, b) humidification et broyage, c) ajout des fibres de bambou, d) formulation et moulage, e) démoulage et séchage.	54
Figure II-10. Moule cylindrique pour la confection des échantillons de pote-pote pour la caractérisation acoustique.....	54

Figure II-11. Etapes de préparation des éprouvettes de poto-poto pour la caractérisation acoustique : a) Terre prélevée puis séchée, b) humidification et broyage, c) ajout des fibres de bambou puis formulation et moulage, d) démoulage et séchage.	55
Figure II-12. a. Pavé de terre 10*10*5 b. Disposition des fibres de bambous	56
Figure II-13. Une étuve permettant de sécher les échantillons présentes dans les tares	57
Figure II-14. Réalisation de l'essai de poids volumique.....	59
Figure II-15. Limite d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre	60
Figure II-16. Epreuve d'échantillon soumise à l'essai de flexion	62
Figure II-17. Presse hydraulique pour l'essai de flexion :	63
Figure II-18. Epreuves de dimension 4x4x16cm pour l'essai de flexion	64
Figure II-19. Dispositif expérimental en compression	65
Figure II-20. Quadripôle thermique (Maillet et al., 2000).....	69
Figure II-21. Mur multicouche, (Damfeu 2017)	69
Figure II-22. Quadripôle a) pour une résistance thermique; b) pour un échange convectif; c) pour une capacité calorifique (Maillet et al, 2000).....	70
Figure II-23. a) Dispositif expérimental de la méthode du fil chaud, (Damfeu 2017)	71
Figure II-24. b) Dispositif expérimental du fil chaud (vue de face), (Damfeu 2017)	72
Figure II-25. Thermogramme d'une expérience fil chaud, (Damfeu 2017)	73
Figure II-26. Dispositif expérimental ruban chaud (a) vue de la surface ; (b) vue en coupe, (Meukam 2004).....	74
Figure II-27. Dispositif expérimental plan chaud a) Vue de la surface du plan chaud, b) vue en coupe du dispositif expérimental plan chaud symétrique : (1) Bloc aluminium ; (2) matériau isolant ; (3) échantillon à caractériser ; (4) résistance chauffante.....	75
Figure II-28. Thermocouple type K et Résistance chauffante.....	77
Figure II-29. Vue du thermocouple collé sur la résistance chauffante	77
Figure II-30. Module d'acquisition des températures (Sonde Picolog).....	77
Figure II-31 Alimentation stabilisée.....	77
Figure II-32. Bloc de polystyrène et bloc isolant	78
Figure II-33. Dispositif expérimental plan chaud asymétrique (vue en coupe) et association des appareillages (Damfeu 2017)	78
Figure II-34. Dispositif expérimental plan chaud asymétrique	78
Figure II-35. Dispositif expérimental plan chaud asymétrique (vue en coupe) et association des appareillages (Damfeu 2017)	78
Figure II-36. a) système continu, b) système discret.....	89
Figure II-37. Dispositif expérimental (photo de l'assemblage) du tube de Kundt pour la mesure du coefficient d'absorption du poto-poto : (a) Ordinateur pour stocker les résultats des taux d'ondes stationnaires, (b) Générateur de fréquences, (c) oscilloscope pour visualiser les signaux temporels : celui émis par le Haut-parleur et celui capté par le microphone dans tube, (d) Porte échantillon, (e) Haut-parleur, (f) Amplificateur pour augmenter la dynamique des signaux captés, (g) Voltmètre pour mesurer la tension en sortie du microphone : cette tension donne accès à la valeur minimale (nœud) et maximale (ventre) des ondes stationnaires. C'est à partir de ces deux tensions qu'on évalue le taux d'ondes stationnaires qui permet de déterminer le coefficient d'absorption acoustique, (h) Fréquencemètre pour connaître exactement la fréquence du signal émis (i) Préamplificateur du Microphone – La tige sert à déplacer le microphone dans le tube pour chercher les ventres et les nœuds-	96
Figure III-1. Thermogramme expérimentale de température pour le poto-poto à 0 % de fibre de bambou	101
Figure III-2. Thermogramme expérimentale de température pour le poto-poto à 4 % de fibres de bambou	102

Figure III-3. Thermogrammes de température obtenus à partir des données expérimentales et des équations du modèle simplifié.....	103
Figure III-4. Régression linéaire de la pente du thermogramme expérimentale	104
Figure III-5. Critère de convergence	105
Figure III-6. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenu à partir du modèle complet à 0 % de fibre de bambou.....	105
Figure III-7. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 0 % de fibre de bambou	106
Figure III-8. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenus à partir du modèle complet à 4% de fibre de bambou.....	106
Figure III-9. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 4% de fibre de bambou	107
Figure III-10. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenu à partir du modèle complet à 6% de fibre de bambou.....	107
Figure III-11. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 6% de fibre de bambou	108
Figure III-12. Evolution de la conductivité thermique (en bleu) ; de la résistance en compression (orange) et de la résistance en flexion (marron) en fonction de la teneur en fibre de bambou	110
Figure III-13. Evolution du module d'élasticité en fonction de la teneur en fibre de bambou.....	111
Figure III-14. Géométrie du model acoustique du Mur (Poto-Poto).....	112
Figure III-15. Simulation de coefficients d'absorption acoustique	113
Figure III-16. Simulation de coefficients d'absorption acoustique	113
Figure III-17. Simulation de coefficients d'absorption acoustique	113
Figure III-18. Simulation de coefficients d'absorption acoustique pour un maillage	114
Figure III-19. Coefficient d'absorption du poto-poto à 3cm d'épaisseur.....	115
Figure III-20. Coefficient d'absorption du poto-poto à 4 cm d'épaisseur.....	116
Figure III-21. Coefficient d'absorption du poto-poto à 5 cm d'épaisseur.....	116
Figure III-22. Coefficient d'absorption du poto-poto à 2% de fibres de bambou	117
Figure III-23. Coefficient d'absorption du poto-poto à 4% de fibres de bambou	118
Figure III-24. Coefficient d'absorption du poto-poto à 6% de fibres de bambou	118
Figure III-25. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 3cm d'épaisseur dosé à 2% de fibres de bambou.	119
Figure III-26. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 3cm d'épaisseur dosé à 4% de fibres de bambou.	120
Figure III-27 . Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 4cm d'épaisseur dosé à 2% de fibres de bambou.	120
Figure III-28. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 4cm d'épaisseur dosé à 4% de fibres de bambou.	121

Liste des tableaux

Tableau I-1: Densité relative des éclisses de bambou trouvées au Cameroun	20
Tableau I-2: Effets des nœuds et de la position de la tige de bambou sur la densité relative.....	21
Tableau I-3: Porosité des fragments d'espèces de bambou trouvés au Cameroun	21
Tableau I-4: Effects of nodes and position of the bamboo culm on the porosity of bamboo.....	21
Tableau I-5: Comparaison des propriétés mécaniques entre espèces de bambou et de bois, (Benoît Hargot, 2009).....	25
Tableau I-6: Quelques matériaux locaux de construction à base de terre et de végétaux (Tai Thu, 2010)	34
Tableau I-7: Energie grise et conductivité thermique de certains matériaux de construction, (Source : Bibliothèque des matériaux de construction (extrait), GRECAU, Citemaison.fr, http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php).....	36
Tableau I-8: Conductivité thermique de certains isolants thermiques conventionnels, (Meukam, 2004)	41
Tableau I-9: Conductivité thermique de certains isolants thermiques utilisés au Cameroun (Meukam, 2004).....	41
Tableau I-10: Masses volumiques et conductivités de certains isolants utilisés dans le bâtiment, (Meukam, 2004)	41
Tableau I-11: Paramètres expérimentaux et calculés des propriétés thermophysiques de la latérite, de latérite + pouzzolane et de la latérite + sciure de bois, Meukam, 2004.....	42
Tableau I-12: Conductivité thermique intrinsèque des agrégats granulaires de pouzzolane noire et rouge, Damfeu 2017	43
Tableau I-13 : Taux d'absorption acoustique mesuré selon la norme ISO 11654 des échantillons S1-S7 de laine de mouton, laine minérale, de la mousse de polyuréthane recyclée et des fibres de polyester.....	45
Tableau II-1. Analyse granulométrique et consistance du matériau terre	50
Tableau II-2. Paramètres des différents agrégats utilisés pour le moulage des échantillons de caractérisation mécanique.	51
Tableau II-3. caractéristiques essentielles pour les types de compactages.....	61
Tableau II-4: Qualité du compactage en fonction de la teneur en eau du moulage.....	62
Tableau III-1. Analyse granulométrique et consistance du matériau terre	99
Tableau III-2: Absorption, densités et porosité pour des éprouvettes de poto-poto de 5cm	100
Tableau III-3: Coefficients de poisson du poto-poto de 5cm d'épaisseur	100
Tableau III-4: Résultats expérimentaux de la caractérisation thermophysique et mécanique.....	109
Tableau III-5: Conductivité thermique de certains matériaux de construction au Cameroun.	109
Tableau III-6. Certains caractéristiques physiques du matériau poto-poto	112

Abréviations

1D : une dimension

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

ρC_p : capacité thermique volumique

E : effusivité thermique

λ : conductivité thermique

R_c : résistance à la compression

R_f : résistance à la flexion

FE : éléments finis

BE : éléments de frontière

ODD : objectifs du développement durable

CO₂ : dioxyde de carbone

MIPROMALO : Mission de promotion des matériaux locaux

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

OIF : Organisation Internationale de la Francophonie

BTC : brique de terre comprimée

E_1 : module d'élasticité

NF : Norme française

NC : Norme camerounaise

T.E.O : Teneur en eau optimum

ddl : degré de liberté

FEM : Méthode des éléments finis

BEM : méthode des éléments de frontière

INTRODUCTION GENERALE

Pour atteindre son émergence, le Cameroun a besoin d'utiliser toutes ses potentialités et ressources pour la construction de ses infrastructures. L'utilisation des matériaux locaux dans la construction devient de plus en plus une exigence qui intègre aussi le développement durable. On se rend cependant à l'évidence compte que l'utilisation des matériaux locaux dans la construction est restée bien sommaire se limitant juste à nos modèles traditionnels et culturels de l'habitat. Parmi ces très nombreux matériaux utilisés autour de nous pour la production de l'habitat traditionnel, le poto-poto est très utilisé dans les Régions du Centre, du Sud, de l'Est et une bonne partie du Littoral. La volonté d'économie d'énergie et/ou d'utilisation de l'énergie propre et le recours aux potentialités des matériaux locaux, abondants et susceptibles d'apporter une réponse appropriée nous interpelle donc en tant que scientifiques. Dans cette logique, des aspects tout aussi importants à l'exemple des nuisances sonores et olphatiques, visuels et physiques, constituent des cibles des ODD à réduire considérablement (OIF, <https://www.ifdd.francophonie.org>, 2021).

Cette approche de la maîtrise du confort acoustique et/ou thermophysique des bâtiments nous a poussés à faire l'étude des caractéristiques physiques du poto-poto, matériau couramment utilisé dans la construction traditionnelle, en vue de son usage dans la construction des établissements humains dits conventionnels.

Parmi les possibilités exploratoires des propriétés des matériaux locaux, on retrouve la caractérisation acoustique qui reste l'un des points faibles de l'apport technique au Cameroun pour plusieurs raisons :

- 1- très peu sinon la quasi-totalité des édifices spécialisés au Cameroun notamment de spectacle, d'enregistrement, culturelles, ne font que très rarement appel aux exigences acoustiques des locaux. Ainsi, la prise en compte de ce volet important (acoustique) pour les activités qu'ils sont censés abriter reste sinon absent, tout au plus dérisoire.
- 2- lorsqu'elle est voulue, la prise en compte de l'aspect acoustique dans le bâtiment reste pour le moins onéreuse puisque la totalité des matériaux nécessaires pour sa mise en œuvre (laine de verre, laine de roche, etc...) est importée [INS, 2012];
- 3- l'exploration et la caractérisation des matériaux locaux dans la perspective d'une utilisation en correction ou en isolation acoustique sont très faibles et n'encourage aucune prise de risque.

Du point de vue thermophysique, bien que plusieurs auteurs au Cameroun aient abordé la question, la prise en compte de l'impact environnemental et énergétique dans la politique de construction reste insuffisante et faible. A titre d'illustration, dans les deux grandes villes du Cameroun : Douala et Yaoundé, qui cumulent à elles seules environ 6 millions d'habitants, soit environ le ¼ de la population totale, l'essentiel des constructions utilise des matériaux à fort taux d'émission de CO₂ et à forte empreinte carbone¹ à l'exemple des agglomérés de parpaing de sable et du béton. Notre approche plaide en faveur d'une alternative aux matériaux actuels utilisés dans la construction pour assurer une réduction progressive de l'émission du CO₂ avec

¹ L'empreinte carbone est un indicateur qui vise à mesurer l'impact d'une activité sur l'environnement, et plus particulièrement les émissions de gaz à effet de serre, notamment le CO₂, liées à cette activité. **Note** : Cette notion est parfois confondue à celle d'empreinte écologique. La seconde, dont le CO₂ n'est qu'une composante, couvre un spectre plus large. L'empreinte écologique s'exprime en surface de terre productive requise pour produire les biens et services que nous consommons et absorber les déchets qui en découlent(...). (carbo academy, 2023).

la prise en compte progressive de l'environnement dans le cycle de vie (écoconception) des produits de construction [Ramkumar, Kannan Rajkumar, (2022)].

Au Cameroun et dans la sous-région, les matériaux locaux ne sont utilisés que sous le profit de leur faible coût et sont généralement orientés pour un habitat dit « sommaire » très souvent en milieu rural et/ou périurbain. En choisissant d'explorer leurs caractéristiques physiques, nous ouvrons la voie à l'utilisation des propriétés des matériaux très répandus comme le poto-poto pour la construction durable (écoconstruction). Et pour cause, la construction durable encourage l'utilisation plus abondante de matériaux utilisés à travers le temps grâce aux modèles culturels d'habitat. La modernisation de la construction à base de ces matériaux à plus grande échelle nécessite l'exploration des caractéristiques physiques afin de les standardiser et d'en assurer une utilisation contrôlée et maîtrisée. Cette démarche n'est d'ailleurs pas nouvelle, puisqu'elle est désormais encouragée [AnaClaudia et al., (2022), Kumar, al., (2022), Elnaklah, (2021), Rahman et al., (2012)] à travers un regain d'intérêt pour l'utilisation de matériaux issus de ressources naturelles abondantes comme le bambou, le bois, la paille, les fibres végétales et les matériaux en terre [Delany et Basley (1970), Eduardo, (2021)]. Elle contribue ainsi à limiter les émissions de gaz à effet de serre par leur capacité à piéger le CO₂ et à assurer une régulation naturelle [Das et al., (2012)]. C'est également dans cette perspective que de nombreux travaux se sont intéressés à l'étude des fibres naturelles pour des applications acoustiques grâce à leurs propriétés absorbantes [Hariharan et al., (2021), Ma et Yao, (2012)] comme c'est le cas du bambou [Raja et Rahman (2013)], du coton ou de la fibre de coco [Das et al., 2012]. Il en est de même de nombreux autres auteurs ayant exploré le champ thermique/thermomécanique de certains matériaux naturels renouvelables [Raja et Rahman, (2013), Mekhermeche, (2012), Meukam (2004), Pepple et Ogbanda (2010)].

Plusieurs approches proposent une modélisation adéquatement de la propagation des ondes acoustiques dans les matériaux poreux [Pepple et al., (2010), Allard et Atalla, (2009), Mesgouez et al., (2005), Biot (1956)]. Le modèle le plus général dérive de la théorie de Biot [Biot (1956)], qui décrit le comportement d'un matériau poreux saturé d'un fluide soumis à une excitation acoustique. Aussi, des nombreuses méthodes de mesure des propriétés de transfert dans les milieux poreux existent et sont d'actualité. Elles ont connu plusieurs progrès, notamment suite à l'optimisation des systèmes et programmes informatiques, au développement de nouvelles méthodes capables de représenter avec bonne précision les divers processus de transferts thermiques (conduction ; convection ; rayonnement ; changement de phase...) [Damfeu. (2017)].

Les différents aspects évoqués ci-dessus nous emmènent non seulement à développer de manière permanente une réflexion autour de l'étude des propriétés physiques de nos propres matériaux locaux, mais aussi d'en faire la vulgarisation afin d'encourager une production à grande échelle. Une fois que les caractéristiques scientifiques essentielles de ces matériaux locaux (qui ne sont utilisés jusqu'ici uniquement que dans nos systèmes ou modes de construction traditionnelle) seront connues, cela pourra favoriser leur usage aisé dans les constructions conventionnelles qui obéissent aux normes de construction dont celles acoustiques et/ou thermiques.

Cette démarche s'inscrit en droite ligne des exigences du développement durable qui recommandent de connaître, avant toute construction d'un bâtiment, les propriétés mécaniques des matériaux qui composent son enveloppe tout comme leurs caractéristiques thermiques et acoustiques [Campeau, (2017)].

Comme évoqué plus haut, le poto-poto est un exemple de matériau local. Il est poreux, composite et composé de deux matières dont l'une est géo-sourcée: la terre humide malaxée sous forme de pisé et l'autre, bio-sourcée : les fibres de bambou. Ces deux matériaux ont chacun des caractéristiques mécaniques et thermophysiques [Pepple et al., (2010)] qui permettent de définir le profil thermique d'un bâtiment construit à partir de ces derniers. La composition du poto-poto fait de lui une structure complexe et le prédispose donc à un comportement bénéfique du point de vue acoustique grâce aux microfissures dues au retrait lors du séchage de la terre projetée sur l'ossature bambou [Pettang et Foudjet, (2000)].

L'utilisation du poto-poto dans la construction de l'habitat traditionnel au Cameroun est très répandue dans les régions telles que l'Est, le Sud, l'Ouest et le Centre [Pettang et Foudjet, (2000)]. Les autres matériaux rencontrés sont le béton de pouzzolane (Foumbot), le béton de bois (Bafoussam) ou le béton de paille dans le Nord [Houben, (2009)]. La plupart de ces matériaux ayant une aptitude à limiter les émissions de gaz à effet de serre grâce à leur capacité à piéger le CO₂ et à assurer une régulation naturelle. De plus, l'utilisation de ces matériaux locaux par ailleurs biodégradables et disponibles, permet également de réduire les coûts de construction et les coûts énergétiques, puisque les dépenses liées aussi à la consommation énergétique deviennent à partir de leur comportement thermique fortement réduites.

Ainsi, dans le présent travail, nous aborderons l'étude des propriétés physiques d'un l'éco-matériau local qu'est le poto-poto à travers:

- 1) une caractérisation thermophysique et mécanique [Kowa et al., (2021)] dont les objectifs visés seront de :
 - ☞ examiner l'influence sur les propriétés mécaniques de l'ajout des fibres de bambou de Chine sur un bloc de terre non latéritique ;
 - ☞ vérifier comment l'utilisation de cette terre avec simple ajout de fibres sans ciment est utilisable comme matériau de remplissage de l'enveloppe d'un bâtiment ;
 - ☞ proposer un modèle simple de caractérisation de ses propriétés thermophysiques dans le but de vérifier comment il satisfait aux propriétés d'un matériau isolant thermique.
- 2) une caractérisation acoustique [Kowa et al., (2022)] qui nous permettra de vérifier si le poto-poto présente des bonnes propriétés acoustiques notamment en moyenne et basse fréquence.

Ces différents objectifs que nous avons élaborés autour de la problématique des caractéristiques physiques du poto-poto nous amène à la question centrale de recherche suivante :

Comment contribuer à l'exploration des caractéristiques physiques du Poto-poto afin de confirmer scientifiquement son rôle à la fois de matériau écologique² et d'éco-matériau qui compte sur l'échiquier du développement durable?

Cette question de recherche a permis d'orienter notre travail vers une approche à la fois numérique et expérimentale. Le présent document qui en est un rendu se subdivise en trois grands chapitres :

Le premier chapitre, intitulé état de l'art, présente non seulement un éventail sur la typologie des matériaux locaux que l'on retrouve au Cameroun comme alternatives aux matériaux conventionnels de construction généralement énergivores, mais aussi, il met en exergue certains travaux déjà menés au sujet de la caractérisation desdits matériaux dans différents aspects notamment thermophysique, mécanique et acoustique.

Dans le deuxième chapitre intitulé matériaux, matériel et méthode, le document présente les matériaux utilisés, le protocole de confection des éprouvettes, les dispositifs expérimentaux de mesure ainsi les modèles mathématiques qui ont servi pour la caractérisation du poto-poto.

Les résultats de la caractérisation acoustique, thermophysique et mécanique du poto-poto font l'objet du troisième chapitre.

Le présent travail se termine par une conclusion générale qui rappelle non seulement l'essentiel des résultats obtenus dans le cadre de notre recherche, mais aussi envisage une perspective des futurs travaux de recherche.

² Un matériau écologique est non toxique pour l'environnement et pour la santé humaine, issu des filières locales, donc limite les coûts de transport. Sa production ou sa mise en œuvre ne nécessite pas une production d'énergie supplémentaire. Il répond aux normes exigées. Il est aussi souvent assimilé à un éco matériau qui est un matériau qui répond aux critères techniques exigés et qui possède des critères environnementaux.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

INTRODUCTION

Face à l'urgence des réponses aux défis sociaux et environnementaux, le secteur du bâtiment tente d'opter pour de nouvelles façons de construire, plus durables. C'est plus particulièrement le cas au Cameroun et en Afrique, qui gardent une croissance démographique importante et donc une demande de plus en plus grandissante en besoins énergétiques, en besoins d'habitats et de logements. Et pourtant, la meilleure façon d'assurer le développement durable passe par la réduction de toutes les ressources énergétiques, une telle démarche étant bénéfique tant sur le plan financier que sur le plan de la protection de l'environnement.

L'essentiel des bâtiments ou établissements humains, qu'ils soient d'usage industriel ou d'habitation, constituent des « puits » de consommation d'énergie important si l'on désire y maintenir un confort thermique permanent et acceptables par les occupants. La question de l'économie d'énergie devient alors une priorité compte tenu des exigences du développement durable dans un contexte de dérèglement climatique. Dans ce registre, un nouveau paradigme doit être envisagé à travers des actions qui militent en faveur de la protection de l'environnement et de la diminution de la consommation énergétique. Cela pourrait se traduire par une amélioration de la conception thermique et de l'efficacité énergétique des bâtiments. Dans une telle perspective, le concept de matériaux locaux, qui a connu ses premières prémices dès la fin des années 1970 [Dejeant et al., (2021)] prend tout son sens.

En effet, l'appellation « local » renvoie directement à la notion de disponibilité, de proximité, d'accessibilité, donc d'économie, alors que celle de « matériau » implique celle d'une matière première qui doit être transformée avant d'être utilisée avec éventuellement un possible réemploi ou recyclage en fin de vie. L'usage de matériaux locaux en construction peut alors être défini comme : « construire son habitat en privilégiant les ressources matérielles et humaines disponibles et accessibles localement, avec des impacts bénéfiques sur les plans économique, social, culturel et environnemental, tant au niveau local que global ».

Ces matériaux locaux sont le résultat de la transformation ou de l'assemblage d'une ou de plusieurs ressources naturelles extraites à proximité du site de construction. Idéalement ils nécessitent très peu, voire pas du tout de transformation pour constituer des éléments ou composants pouvant remplir diverses fonctions (supporter, isoler, clore, etc.) dans un édifice donné avec une économie maximale d'énergie non renouvelable pour sa construction puis son usage. Ils peuvent être classés en deux catégories principales :

- ✓ les matériaux locaux «bio-sourcés» d'origine végétale ou animale : la matière qui les constitue est issue de la biomasse ;
- ✓ les matériaux locaux «géo-sourcés» d'origine minérale : la matière qui les constitue est issue des couches géologiques ou pédologiques de la croûte terrestre.

Au Cameroun, les matériaux utilisés sont très divers, de par leurs caractéristiques et leurs usages, ce qui a donné naissance à des habitats ruraux ou urbains très variés. Les savoirs et savoir-faire qui leur sont associés peuvent être le résultat de traditions très anciennes, mais aussi de pratiques plus récentes. Certains d'entre eux sont d'ailleurs le résultat d'échanges culturels ayant insufflé des idées de renouvellements et d'innovations [Dejeant et al., (2021)].

Sous l'influence de la globalisation, ces pratiques ont toutefois eu tendance à disparaître. Pourtant, ces intelligences constructives « traditionnelles » constituent un vivier important d'innovations, pouvant jouer un rôle majeur en substitution ou complément des matériaux

conventionnels qui nécessitent des étapes de transformation avec d'importantes consommations d'énergie et de production de gaz à effet de serre, de déchets dont certains sont fort polluants.

Dans cette partie de notre travail, nous présenterons d'une part l'historicité et l'éventail de la typologie des matériaux locaux au Cameroun susceptibles d'être des alternatives aux matériaux conventionnels de construction généralement énergivores, mais aussi, nous allons présenter certains travaux déjà menés au sujet de la caractérisation des certains matériaux dans leurs aspects thermophysique, mécanique et acoustique.

I- Typologie des matériaux locaux au Cameroun

Le continent africain est riche de nombreuses ressources naturelles utilisables pour la construction. Terre(s), pierres, sables, bois, fibres, etc., sont des ressources très largement disponibles, même si de façon hétérogène, au regard de la variété des contextes géographiques, géologiques et climatiques. Elles sont donc exploitables de façon différenciée, et ce d'autant que les qualités et propriétés intrinsèques de chacune varient aussi selon les caractéristiques spécifiques de chaque territoire. Cette diversité physique s'ajoute à une importante diversité culturelle. Ceci résulte en une mosaïque de situations, y compris à l'intérieur d'un même pays, ce qui a engendré une grande richesse de cultures constructives traditionnelles. C'est le cas au Cameroun qui présente une typologie d'habitat très variée avec une cartographie d'habitations mettant en exergue plus de 14 types d'habitation [*BEGUIN et al., 1952*] présentant des architectures originales les uns autant que les autres. Ainsi donc, qu'il s'agisse des Kapsiki, des Mousgoum, des Toupouri, des Moundang, des Dourou, des Mboum, des Foulbé, des Tikar, des Bamoun, des Bamiléké, des Baya ou encore des peuples de la Forêt, les cultures constructives traditionnelles existent toujours même s'il est vrai que les ressources mises en jeu ont fait l'objet d'études et de propositions d'améliorations.

En fonction des territoires, des ressources présentes à proximité et, des spécificités géographiques, en fonction des pratiques sociales et culturelles, des besoins et moyens propres à chaque communauté ou société, des habitats se sont matérialisés dans des formes singulières et très variées. Ce qui constitue une grande partie de notre patrimoine bâti a été possible grâce aux techniques de construction et aux savoirs associés aux matériaux issus de la transformation de ressources locales qu'elles soient minérales, végétales et animales. Ces techniques de construction ont été perfectionnées au cours du temps, souvent à travers des processus d'expérimentation, pour répondre à de besoins précis.

Avec l'avènement de nouveaux procédés de production et de construction à l'ère industrielle, de nouvelles technologies de construction ont émergé et se sont diffusées à l'échelle mondiale. Même si elles persistent encore à de nombreux endroits, les cultures constructives dites « traditionnelles » ont vu leurs champs d'application se réduire, voire disparaître pour certaines, ainsi que les savoirs associés. Dans les zones peu accessibles ou lorsqu'elles sont très fortement ancrées dans les pratiques locales, celles-ci se maintiennent. Dans de nombreux endroits, les matériaux locaux cohabitent avec les « matériaux thermo-industriels ».

A la suite de la crise de l'énergie du début des années 70, des initiatives ont été lancées pour « produire autrement » et considérer les matériaux locaux comme alternatives viables aux techniques de construction énergivores [*Dejeant et al., (2021)*]. La terre crue pour ne citer qu'elle devient alors incontournable [*PAULUS, 2014*]. Au Cameroun comme dans d'autres endroits de l'Afrique et du monde, de nombreuses expérimentations et recherches sont menées en vue de réactualiser les matériaux locaux et les techniques de construction « traditionnelles ».

». Et dans cette perspective, les matériaux locaux se projettent vers un renouveau à l'aune des objectifs du développement durable.

En effet, depuis environ une trentaine d'années, on a constaté un retour en grâce des matériaux locaux, qui bénéficient d'un cadre et d'un contexte beaucoup plus favorable. D'un côté, les connaissances scientifiques ont largement progressé et sont beaucoup plus solides : les matériaux locaux font l'objet de recherches et ont gagné en reconnaissance. D'un autre côté, la prise de conscience de la réalité du changement climatique et les besoins en habitat durable sont de plus en plus réels. La menace exercée sur les milieux naturels et humains par les pratiques actuelles du bâtiment, avec leurs conséquences socio-économiques, accentue l'intérêt porté à des matériaux et des techniques en phase avec les objectifs de développement durable³. Au Cameroun par exemple, une nouvelle politique publique en matière de promotion des matériaux locaux a vu le jour à travers la MIPROMALO (créée en 1990 et réorganisée en 2018) dont le but est de valoriser l'emploi des matériaux localement fabriqués en vue de réduire les coûts de réalisation des équipements nationaux. Des cadres réglementaires ont donc commencé à évoluer pour s'adapter et intégrer ces pratiques encadrées parfois par des politiques publiques s'engageant en faveur de la construction durable.

Comme évoqué plus haut, terre(s), bambou, pierres, sables, bois, fibres, etc., sont des ressources très largement disponibles au Cameroun. Nous allons, dans la suite de cette première partie du chapitre, présenter quelques techniques de construction à base de quelques-uns de ces matériaux notamment la terre, mais aussi présenter quelques propriétés physiques du bambou, étant entendu que ces deux matériaux (terre, bambou) constituent essentiellement le matériau composite poto-poto dont la caractérisation physique fait l'objet de nos travaux.

a) Le matériau terre

i) Rappel historique

La terre crue, utilisée depuis plusieurs millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux à l'exemple de l'arche de Ctésiphon en Irak (Figure I-1a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (Figure I-1b) par exemple), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (Figure I-1c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Figure I-1d) et encore bien d'autres [Doat et al., 1979]. Les sites archéologiques en terre crue sont donc présents sur tous les continents habités. Cela est dû au fait que « la terre est l'un des trois premiers matériaux, au même titre que la pierre et le bois » [Anger & Fontaine, (2009)].

³ Le développement durable est l'idée que les sociétés humaines doivent vivre et répondre à leurs besoins sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. Concrètement, le développement durable préconise d'organiser la société de manière à lui permettre d'exister sur le long terme. Cela implique de prendre en compte à la fois les impératifs présents mais aussi ceux du futur, comme la préservation de l'environnement et des ressources naturelles ou l'équité sociale et économique.

La définition « officielle » du développement durable a été élaborée pour la première fois dans le Rapport Brundtland en 1987. Ce rapport était la synthèse issue de la première commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU (<https://youmatter.world/fr>).



Figure I-1. a) Arche de Ctésiphon ; b) Pyramide d'El-Lahoun ; c) Ziggourat d'Etemenanki ; d) Cité Chan-Chan (Jehanne PAULUS, 2014)

La raison qui a mené ces civilisations à utiliser un tel matériau aurait été sans doute le fait de « construire avec ce que l'on a sous les pieds » [Anger & Fontaine, (2009)]. Si on prend l'exemple de la Grande Muraille de Chine, on peut voir que celle-ci s'adapte tout au long de son parcours à la nature du sol sur lequel elle est construite. Ainsi, on retrouve des parties construites en pierre sur la roche, en terre sur la terre et même parfois en sable dans certaines parties désertiques. En effet, vu l'ampleur des territoires traversés par cet édifice, celui-ci a été construit à l'aide des matériaux locaux afin de limiter le transport de la zone d'extraction à celle de chantier. Exploiter les matériaux locaux afin de bâtir son logement est un comportement universel. Et souvent, la terre est le seul matériau disponible [Anger & Fontaine, (2009)]. Des études estiment que 30% au moins de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17% des constructions inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre » [Anger & Fontaine, (2005)]. De plus, la terre est relativement facile à extraire et à utiliser : de simples outils comme une pelle ou des planches en bois sont largement suffisants dans la plupart des cas. Les constructions en terre crue sont majoritairement présentes dans presque toute l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine comme on peut le voir sur la Figure I-2. On les retrouve également en Chine et en Inde dans les habitats vernaculaires. En Europe par contre, cette façon de construire a pratiquement disparu, mais les bâtiments en terre crue restent tout de même présents dans le paysage, comme un témoignage du passé. On les retrouve au Danemark, en Suède, en Allemagne, dans les Pays de l'Est, mais également en Espagne, en France, en Grande-Bretagne et en Belgique [Doat et al., (1979)]. L'Europe compte tout de même plusieurs millions de constructions en terre, mais il s'agit surtout de bâtiments anciens. Ceux-ci sont toujours habités mais nécessitent un entretien annuel relativement cher [Anger, (2011)].



Figure I-2. Architecture de terre dans le monde (Source : <https://craterre.org/>)

ii) Un matériau granulaire

- Constitution du sol

La terre est un matériau granulaire composé de plusieurs catégories de grains. Ceux-ci, selon leur origine, lui confèrent un vaste panel de couleurs, textures et aspects. Si on réalisait une coupe verticale du sol, on verrait que celui-ci est constitué de plusieurs couches horizontales superposées (Figure I-3). Ces dernières sont appelées les « horizons ».

L'horizon A, de couleur plus foncée que les couches inférieures, correspond à la terre végétale de surface. Il s'agit d'un mélange de matières minérale et organique. Elle est donc peu conseillée pour la construction. En effet, elle est trop riche en matières organiques et produirait de ce fait des matériaux non-suffisamment solides et dans lesquels des végétaux pourraient se développer.

L'horizon B, quant à lui, est la terre utilisée dans la construction et l'horizon C correspond à de la roche en décomposition. Il se situe donc à mi-chemin entre la roche et la terre. Sous cet horizon C, nous retrouvons ensuite la roche mère. La terre étant déjà un matériau désagrégé, celle-ci ne s'altère pas avec le temps (si elle est correctement protégée de l'eau) contrairement aux autres matériaux de construction qui rouillent, pourrissent ou sont attaqués chimiquement. De ce fait, le matériau terre présente un avantage conséquent par rapport aux autres matériaux : une fois le bâtiment en fin de vie, la terre peut soit être réutilisée pour construire un nouvel édifice, soit être rendue au sol d'où elle provenait [Anger & Fontaine, (2009)].

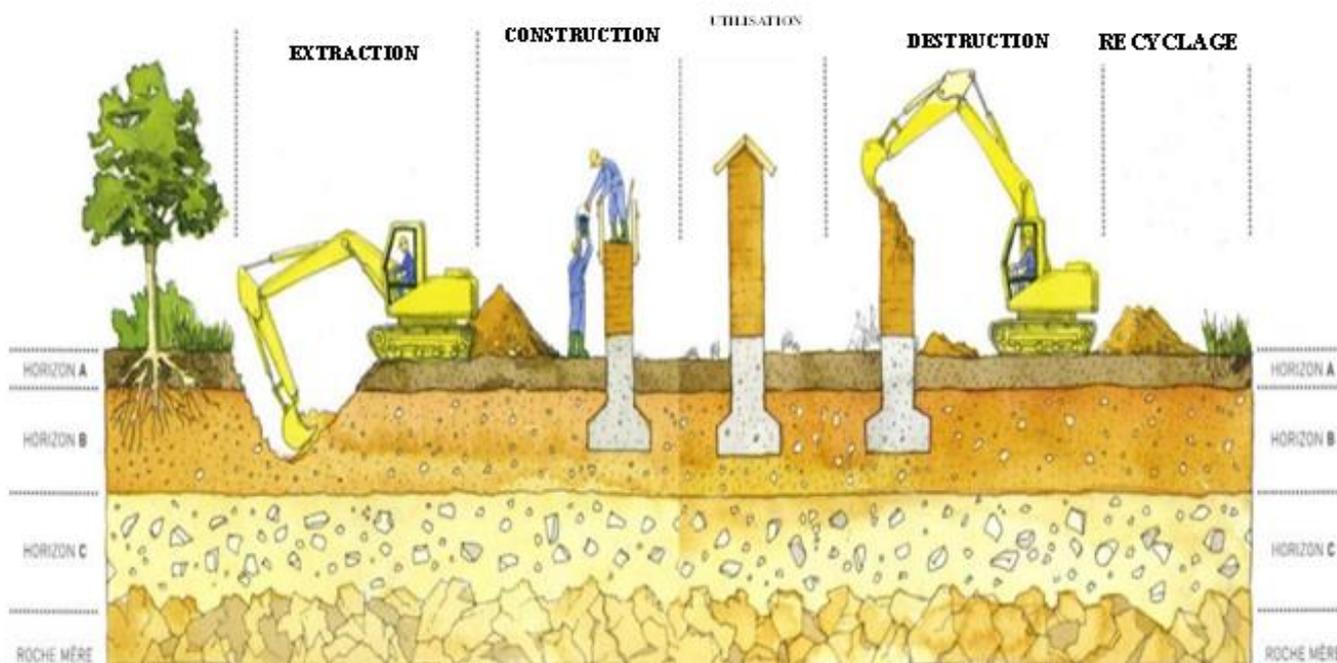


Figure I-3. La terre, un matériau recyclable (Anger & Fontaine, 2009)

- Fractions granulométriques

Comme dit précédemment, la terre est constituée de fractions de granulométries différentes, qui révèlent le degré de transformation de la roche-mère. On peut ainsi classer les grains de la façon suivante (Figure I-4) :

	Taille
Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 60 μm
Silts	entre 60 μm et 2 μm
Argiles	au-dessous de 2 μm

Figure I-4. Classification des grains (Anger & Fontaine, 2009)

La proportion de ces constituants varie d'une terre à l'autre, ce qui conditionne son usage. À l'exception des argiles, tous ces composants sont des fragments de roche de tailles et formes différentes. Ils constituent le squelette granulaire de la terre et lui apportent leur rigidité. Les cailloux sont de formes angulaires ou arrondies et constituent la partie grossière de la terre. Les graviers, ronds ou anguleux également, « constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait » [Guillaud & Houben, (1995)]. Les sables sont caractérisés par leur grande friction interne, leur structure ouverte et leur perméabilité. Les silts sont semblables aux sables mais sont de dimension inférieure. Ils présentent un certain degré de cohésion interne dû à la présence de films d'eau entre les particules.

iii) Les différentes techniques de construction en terre

Si nous regardons les différents bâtiments érigés, nous pouvons nous rendre compte de ce qu'il existe une panoplie de typologies constructives. En effet, il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC), mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle demande une courbe granulométrique différente ainsi que des états hydriques et hygrométriques différents.

H. Guillaud & H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre (Figure I-5), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité.

à la chaux est d'environ 1 W/m.K et celle d'un BTC stabilisé au ciment est d'environ 1,2 W/m.K. Lorsque des fibres sont ajoutées à la terre, on observe une diminution de la conductivité thermique pouvant aller jusqu'à 50% avec l'augmentation de la teneur en fibres [Rahman & Riza, (2015) ; Sore, (2013) ; Taallah, (2014) ; Courard, (2012)].

Les BTC ont également une très bonne inertie thermique, comparable à celle des bétons cellulaires, bien supérieure à celle d'un aggloméré de ciment. L'étude réalisée par Alpuche et al. (2013) qui compare le comportement thermique d'un mur réalisé en blocs de béton cellulaire à un mur en BTC montre qu'ils ont tous deux un comportement similaire en ce qui concerne leur inertie thermique, bien qu'ils aient des propriétés thermiques différentes (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermique,...) : leurs inerties leur permettent un déphasage du transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment durant la phase de surchauffe. Le mur en terre offre tout de même une température superficielle extérieure plus stable dans le temps avec de faibles oscillations de température contrairement aux blocs de béton cellulaire. Les deux matériaux permettent de garantir une température intérieure stable et confortable [Alpuche et al., (2014)].

La chaleur spécifique d'un matériau correspond à la quantité d'énergie calorifique qu'il faut apporter à une unité de sa masse pour que sa température s'élève de 1°K. Pour des briques de même taille, la chaleur spécifique des BTC stabilisées au ciment est d'environ 900 J/kg.K tandis qu'elle est d'environ 1030 J/kg.K pour les briques cuites.

La diffusivité thermique représente la vitesse de propagation d'une onde dans le matériau. Plus elle est faible, plus la chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Elle est d'environ $3,6 \cdot 10^{-4}$ m²/h pour des BTC stabilisés au ciment tandis qu'elle est d'environ $1,8 \cdot 10^{-3}$ m²/h pour les briques de terre cuite. Les BTC présentent donc un déphasage plus important que les briques cuites entre le moment où la température est captée par une face du matériau et le moment où elle atteint l'autre face [Argilus, (2012)].

- **Les avantages de la BTC**

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue.

Si on compare la technique des BTC à la technique du pisé, la première permet d'étaler la fabrication sur une période plus longue tout en diminuant la fissuration des murs grâce à un retrait de séchage s'effectuant sur chaque brique et non sur toute la longueur du mur. En outre, les BTC permettent une plus grande liberté dans la conception architecturale ainsi que dans la mise en œuvre.

Si on compare la technique des BTC à la technique des briques d'adobe, la première permet d'utiliser une aire de fabrication, séchage et stockage de surface moins importante que dans le cas de l'adobe grâce à une superposition immédiate des briques.

De plus, suite à l'utilisation de presses pour la fabrication des BTC, les briques sont de formes plus régulières et ont un fini meilleur. Les presses permettent également de produire des blocs aux formes diverses grâce au système de moules. La stabilisation n'est pas obligatoire pour l'entièreté du bloc : on peut choisir de ne stabiliser que la surface extérieure des briques. Les BTC présentent également une résistance à la compression supérieure à celle des adobes. Par contre, pour les deux comparaisons, les BTC demandent un temps de fabrication plus long ainsi que la possession d'une presse.

En faisant une comparaison entre les BTC et les blocs de sable-ciment, les premiers « offrent une plus grande capacité d'opposition à l'infiltration directe ou par capillarité de l'eau de pluie ou de ruissellement » [Guillaud et al., 1995]. Comparées aux briques cuites, les BTC ne demandent aucune énergie de cuisson [Doat et al. (1979); Cañas, Cid-Falceto & Mazarrón, (2012)].

- **La terre cuite**

Construire et isoler simultanément constitue un pari mis en œuvre par la terre cuite grâce au bloc de terre muni d'un grand nombre d'alvéoles et de parois quinconcées. Elle sert de matériau de construction et présente des qualités de rigidité et de tenue mécanique. Grâce à son épaisseur considérable (37.5 cm) et les 19 rangées d'alvéoles, ce matériau allonge le parcours thermique en réduisant les déperditions énergétiques (Richard, 1995).

La terre cuite est un matériau à isolation répartie qui a un coefficient de conductivité $\lambda = 0.46\text{W/m.K}$ pour un tesson de en verre cuite standard et $\lambda = 0.37\text{W/m.K}$ pour un tesson allégé par incorporation de sciure ou de polystyrène. Sa forte inertie permet une bonne régulation de la température et préserve la fraîcheur des locaux. Incombustible, il ne dégage pas de gaz toxique en cas d'incendie. De plus, il est non polluant et résout les problèmes de recyclage (Meukam, 2004).

Quelques caractéristiques de la terre crue [Dejeant et al., 2021]

- ✓ **Disponibilité** : Abondamment disponible, sur place ou à proximité, ou alors issue des déchets de carrières ou des terres d'excavation, en particulier en zone urbaine.
- ✓ **Extraction** : Peu de conflit avec d'autres intérêts ou d'impact en termes d'occupation du sol. Une bonne gestion est nécessaire pour éviter certains impacts (érosion, glissements de terrain, fosse dangereuse et insalubre).
- ✓ **Circularité** : Potentiel de valorisation des terres d'excavation et des déchets de carrières. Non stabilisé, c'est un matériau aisément réutilisable et recyclable à l'infini ou pouvant retourner aux terres agricoles.
- ✓ **Énergie et émissions** : Non stabilisé, c'est un matériau bas carbone et à faible énergie grise (transformation et mise en œuvre) y compris pour des systèmes mécanisés.
- ✓ **Confort intérieur** : Matériau non toxique et dont l'inertie thermique et l'aptitude à réguler l'humidité assurent un climat intérieur sain et un confort thermique permettant la réduction des besoins de chauffage ou de climatisation.
- ✓ **Caractéristiques physiques** : Matériau incombustible et imputrescible, sensible à l'eau et présentant une bonne résistance en compression et non en traction. L'ajout d'additifs (fibres) ou d'armatures améliore ses capacités de traction y compris face aux tremblements de terre.
- ✓ **Aspects socioculturels** : Potentiel de préservation et de revalorisation des patrimoines architecturaux et des savoir-faire d'une grande valeur culturelle et sociale. Potentiel de contribution à une meilleure inclusion sociale à travers la revalorisation de pratiques souffrant de préjugés négatifs.
- ✓ **Durabilité** : Bien construits et correctement entretenus, les bâtiments en terre démontrent une très longue durée de vie.

- ✓ **Aspects économiques** : Très variables selon l'ajout de matériaux industriels et le coût de la main-d'œuvre, principalement. Le coût en numéraire peut être très bas pour une maison de qualité en auto-construction.
- ✓ **Esthétique et flexibilité d'usage** : Par l'étendue des nuances, le grain de la matière, ou encore sa diversité et flexibilité d'usage, la terre crue offre la possibilité de travailler une grande diversité de formes, de teintes et de textures.

Parmi les autres variétés et techniques d'usage impliquant la terre crue comme matériau structurel, on peut citer le pisé, la bauge, l'adobe, le torchis, la brique de terre moulée, la brique de terre comprimée.



Figure I-6. Murs homogène en pisé : élevés en compactant la terre dans des coffrages, avec des fouloirs manuels ou pneumatiques, (Dejeant et al., 2021)

Cette technique modernisée telle que présentée sur la figure I-6 est répandue en Europe, en Chine en Afrique du Nord, mais elle se développe ailleurs dans le monde.

La figure 1-7 illustre des murs en bauge, très répandus dans la région du nord-ouest et du Nord, sont des murs de terre façonnés à la main par levées successives. Leur épaisseur peut varier de 5 à 60 cm en fonction de l'usage et de la présence ou non de fibres dans la terre.

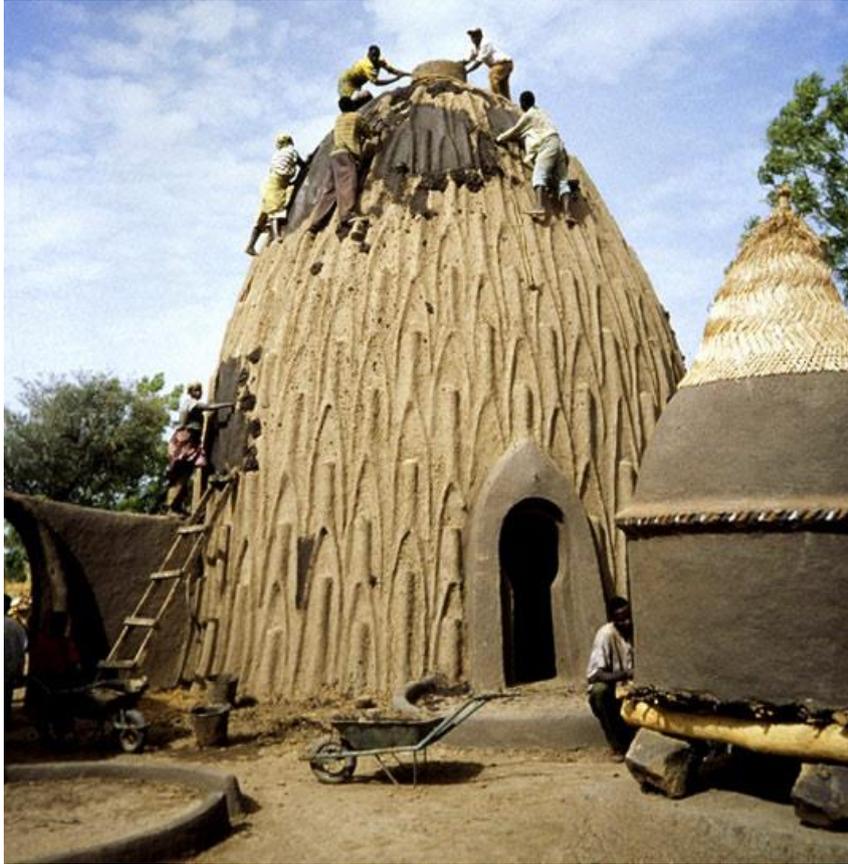


Figure I-7. Technique de mise en œuvre d'une construction en bauge, (CRATerre, 1998)



Figure I-8. Technique de mise en œuvre du torchis

La figure 1-8 illustre une construction en torchis. Il consiste à habiller une ossature porteuse de poteaux et tiges de bois ou bambou avec de la terre fibrée. Cela permet de construire extrêmement vite avec un volume très limité de matériaux. Cette technique est répandue dans les régions de l'Est, du Sud et du Centre.



Figure I-9. Mise en œuvre de l'adobe

L'adobe ou Brique de Terre Moulée (BTM) présentée sur la figure 1-9, est une brique de terre crue, moulée et séchée à l'air libre. La terre argileuse est parfois additionnée de sable et/ou de paille. Cette technique est la plus populaire et très répandue dans la Région de l'Ouest.



Figure I-10. Mise en œuvre de la brique de terre comprimée

Le Bloc de Terre Comprimée (BTC) illustrée sur la figure 1-10 est fait de terre compactée à l'aide de presses manuelles ou mécanisées. Il est généralement stabilisé à environ 6% de ciment. Cette technique a été introduite à partir de 1950, dans le cadre de programmes d'habitat économique [Dejeant *et al.*, 2021].

b) Le bambou de structure

Le bambou structurel est considéré comme une alternative efficace au bois d'œuvre, à la fois en raison de sa vitesse de croissance, de sa résistance mécanique et de ses qualités environnementales. Il permet les mêmes usages que le bois sous forme d'ossature ou en charpente de toit. Il est peu coûteux, facilement disponible, possède des propriétés physiques et mécaniques comparables à celles du bois et présente de nombreux avantages, tant pour sa culture que pour les attributs physiques [Chaowana, (2013)].

Ses qualités écologiques sont un formidable atout pour répondre aux actuels défis environnementaux : croissance rapide, rendement à l'hectare de plus du double de ceux connus pour le bois (jusqu'à 20-30 T/ha.an), alternative aux bois exotiques (déforestation), grande résistance à la sécheresse et à la pollution, assainissement des sols et épuration des eaux usées, un système racinaire à rhizomes empêchant l'érosion des sols, haut rendement photosynthétique, assimilation des carbones et production d'oxygène, formation de bosquets et de reboisements attirant diverses espèces d'oiseaux et d'animaux, source alimentaire (plus souvent comestibles) [Hargot, (2009), Verina *et al.*, (2010)].

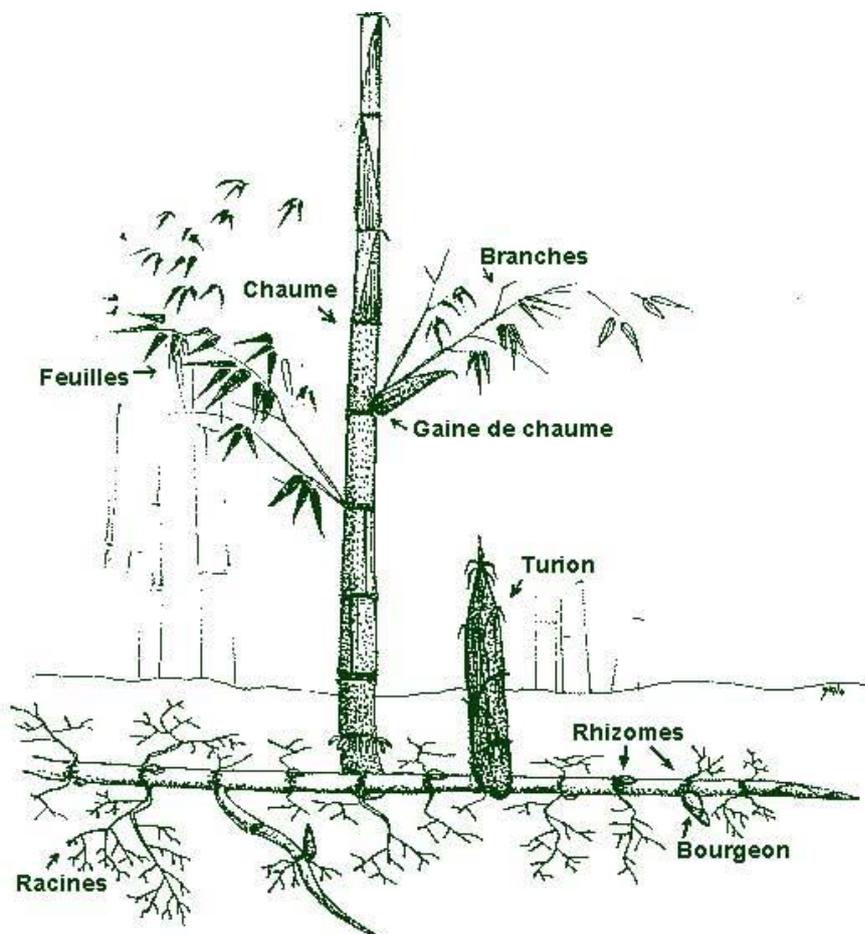


Figure I-11. Les différentes parties du bambou, (Hargot, 2009)

i) Propriétés physiques du bambou

La convenance du bambou pour des applications structurelles ainsi que pour la fabrication de produits composites dépend largement de ses propriétés physiques telles que la densité relative (ou poids spécifique), la teneur en humidité, la stabilité dimensionnelle, la conductivité thermique et la porosité.

En Asie, le bambou est assez courant pour les ponts, les échafaudages et les habitations, mais il s'agit généralement d'un matériau de structure extérieure temporaire. En outre, les propriétés générales des chaumes de bambou sont basées sur les caractéristiques anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques, lesquelles dépendent de l'espèce, du site/sol, des conditions climatiques, du traitement sylvicole, de la technique de récolte, de l'âge, de la densité, du taux d'humidité, de la position dans la chaux, des nœuds ou des entre-nœuds et de la biodégradation [Narasimhamurthy et al., (2013)].

✓ Densité relative

La densité relative du bois de chaume est une mesure de la quantité de matière solide présente dans le bambou et c'est un indice utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques du chaume. La densité relative dépend de la structure anatomique du bambou comme la quantité et la distribution des fibres autour des faisceaux vasculaires ainsi que le diamètre des fibres et l'épaisseur de la paroi cellulaire. La gravité spécifique du bambou varie d'environ 0,5 à 0,79, ce qui fait que la densité moyenne est d'environ 648 kg/m³ [Narasimhamurthy et al., (2013)].

La densité relative du bambou augmente des couches les plus internes à la partie périphérique du chaume et le long de la hauteur du chaume, du bas vers le haut [Janssen (2000), Amada et al. (1996), Anwar et al. (2005) et Fokwa et al. (2012)]. Elle augmente également avec l'augmentation du pourcentage de fibres. D'après les études réalisées sur les fentes de bambou de *Gigantochloa Scortechinii* par Anwar et al., la densité relative est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi de la chaume [Anwar et al., (2005)].

Les densités relatives d'*Arundinaria alpina* et d'*Oxytenanthera abyssinica*, deux espèces de bambou présentes dans la forêt tropicale humide du bassin du Congo, telles que déterminées par les études menées par Fokwa Didier [Fokwa et al., (2012)], sont représentées dans les tableaux I-1 et I-2.

Tableau I-1: Densité relative des éclisses de bambou trouvées au Cameroun

N°	Espèces	Densité relative					
		Couche de chaume					
		Couche intérieure (70%)			Couche extérieure (30%)		
		Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
01	<i>Arundinaria alpina</i>	0.333	1.093	1.125	1.579	1.680	1.690
02	<i>Oxytenanthera abyssinica</i>	0.816	0.778	0.999	1.839	1.858	2.371

Source: Caractérisation physique de deux espèces de bambou du Cameroun, [Fozao, (2019)].

Tableau I-2: Effets des nœuds et de la position de la tige de bambou sur la densité relative

N°	Position le long du chaume Espèces	Densité relative					
		Sans nœud			Avec nœuds		
		Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
01	Uphill Arundinaria alpina	1.080	1.110	1.120	1.530	1.370	1.160
02	Valley Arundinaria alpina	1.012	0.937	0.909	1.140	1.230	1.430
03	Oxytenanthera abyssinica	1.090	1.820	1.650	1.510	1.960	1.670

Source: Caractérisation physique de deux espèces de bambou du Cameroun, [Fozao, (2019)].

✓ Porosité du bambou

Le bambou est un matériau de construction alternatif à l'acier, mais l'absorption d'eau est l'un des principaux inconvénients lorsqu'il est utilisé dans des conditions environnementales exposées [Wakchaure et al., (2012)]. L'existence d'une porosité ouverte au sein du matériau en bambou favorise les propriétés d'absorption du matériau. Par conséquent, les espèces à forte porosité absorbent l'eau plus rapidement que les espèces à faible porosité. La porosité de l'Arundinaria alpina et de l'Oxytenanthera abyssinica, deux espèces de bambou présentes dans la forêt tropicale du bassin du Congo, déterminée à partir d'études menées par Fokwa Didier et autres [Fokwa et al., (2012)] est représentée dans les tableaux I-3 et I-4.

Tableau I-3: Porosité des fragments d'espèces de bambou trouvés au Cameroun

N°	Position le long du chaume Espèces	Porosité (%)					
		Couche de chaume					
		Couche interne			Couche externe		
		Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
01	Arundinaria alpina	27.60	24.20	23.23	15.60	16.11	7.41
02	Oxytenanthera abyssinica	53.03	52.44	41.45	1.140	32.74	23.28

Source: Caractérisation physique de deux espèces de bambou du Cameroun, [Fozao, (2019)].

Tableau I-4: Effects of nodes and position of the bamboo culm on the porosity of bamboo

N°	Espèces	Porosité (%)					
		Sans noeud			Avec noeuds		
		Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
01	Uphill Arundinaria alpina	34.00	42.30	29.40	40.63	21.00	37.50
02	Valley Arundinaria alpina	37.80	23.75	17.60	21.26	18.34	17.20
02	Oxytenanthera abyssinica	20.96	31.10	6.38	23.57	34.87	9.38

Source: Caractérisation physique de deux espèces de bambou du Cameroun, [Fozao, (2019)].

✓ Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un matériau joue un rôle très important dans la détermination de la rigidité de ce matériau. D'après les recherches menées par Janssen [*Janssen (2000)*], le module d'élasticité du bambou est directement lié au pourcentage de fibres présentes dans son chaume. Selon ces études, Janssen a déclaré qu'en raison de la gradation fonctionnelle des fibres dans la section transversale, la rigidité est augmentée de 10% par rapport à la rigidité d'une distribution uniforme du même volume de fibres [*Janssen (2000)*]. En utilisant un module d'élasticité de 70.000 N/mm² pour la cellulose et en supposant qu'une fibre de bambou est composée d'environ 50% de cellulose, le module apparent ou effectif des fibres est d'environ $E = 35.000 \text{ N/mm}^2$.

Les résultats des tests effectués sur les chaumes de bambou ont montré que la fraction volumique des fibres varie dans le sens horizontal, augmentant de la partie intérieure à la partie extérieure du chaume. Dans la plupart des chaumes de bambou, le pourcentage de fibres sur les parties extérieures et intérieures du chaume est d'environ 60% et 10% respectivement. En utilisant ces données, le module d'élasticité des fibres externes et internes est de 60% et 10% de 35 000MPa (c'est-à-dire 21.000 MPa et 3.500 MPa) respectivement [*Janssen (2000)*].

Le bambou est un matériau à gradation fonctionnelle et comme son chaume peut être considérée comme un matériau composite naturellement mélangé de fibres de cellulose et de matrice de lignine, le principe des mélanges pour composite peut être utilisé pour déterminer le module d'élasticité ou la résistance de la section du chaume de bambou, si les valeurs correspondantes pour les fibres et la matrice sont connues [*Amada et al., (1996), Ghavami et al., (2003), Ghavami (2008), Li et Shen (2011)*]. Selon cette règle, le module d'élasticité de la tige de bambou peut être donné par l'expression mathématique suivante [*Verma et al., (2012)*].

$$E = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1.2)$$

Où E_f et V_f sont respectivement le module d'élasticité et la fraction volumique des fibres de cellulose, tandis que E_m et V_m sont respectivement le module d'élasticité et la fraction volumique de la matrice. Cependant, la distribution non uniforme des fibres dans la matrice empêche l'application directe de cette équation pour déterminer le module d'élasticité du bambou. De plus, cette équation suppose une liaison parfaite entre les fibres et la matrice.

Dans le bambou, la distribution des fibres suit un modèle organisé avec une plus grande concentration de fibres sur la surface extérieure du chaume. En établissant comment cette variation se produit, les équations de base de l'approche des matériaux composites peuvent être modifiées afin de modéliser le comportement mécanique du bambou.

✓ Résistance à la flexion (ou au pliage)

La résistance à la flexion du bambou est très faible par rapport à celle du bois car la lignine, qui se trouve entre les fibres, est très faible pour absorber les contraintes de traction. Dans ses études, Janssen a estimé la contrainte de flexion à la rupture pour le bambou séché à l'air et celle du bambou vert à respectivement 0,14 et 0,11 fois sa densité en kg/m³ [*Janssen, (2000)*]. Selon les études présentées dans *Guadua Bamboo*, la résistance à la flexion de la plupart des espèces de bambou varie entre 50 et 150 N/mm² et est en moyenne deux fois plus forte que celle de la plupart des bois de construction conventionnels. Les variations au sein d'une même espèce peuvent être dues aux différentes méthodes de test, à la qualité de l'échantillon et à la teneur en humidité de l'échantillon du bambou testé.

Dans un essai de flexion typique, le mode de défaillance n'est pas la fracture des fibres mais plutôt la fissuration longitudinale du matériau due à la fracture de la lignine plus faible qui lie les fibres entre elles. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors d'une simple flexion du bambou, des contraintes de compression sont produites sur la partie supérieure de la poutre, dans la direction parallèle aux fibres. Cette compression provoque des contraintes de traction latérales, dues à l'effet de Poisson sur la matrice de lignine entre les fibres de la poutre de bambou. La capacité de la matrice de lignine à résister aux contraintes de traction est relativement faible. Janssen donne une valeur critique de la contrainte transversale de 0,0013 qui peut être utilisée pour établir la capacité de flexion du bambou [Janssen, (2000)].

✓ **Résistance à la compression**

Le bambou a une résistance à la compression plus élevée que le bois, la brique ou le béton [Mary (1996), Evelin (2002), et Ogunbiyi, et al., (2015)]. Selon la norme ISO 22157, il existe deux types de tests de résistance à la compression qui doivent être effectués sur le bambou. Il s'agit de la résistance à la compression parallèle au grain et de la résistance à la compression perpendiculaire au grain. De nombreux chercheurs ont réalisé des études sur la résistance à la compression du bambou plein. Janssen [Janssen, (2000)] a estimé que la résistance à la compression ultime du bambou séché à l'air est d'environ 0,094 fois sa densité mesurée en kg/m^3 , tandis que pour le bambou vert, elle est d'environ 0,075 fois sa densité, la densité étant mesurée en kg/m^3 . Selon les études présentées sur le bambou Guadua, la résistance à la compression du bambou se situe approximativement entre 40 et 80 MPa, ce qui est deux à quatre fois la valeur correspondante de la plupart des espèces de bois. En général, les propriétés mécaniques du bambou sont deux à trois fois plus élevées que les valeurs correspondantes des bois conventionnels. Il a été réalisé que la résistance à la compression du bambou est significativement affectée par l'âge et la teneur en humidité des échantillons. Le bambou à faible teneur en humidité a une résistance à la compression plus élevée que le bambou à forte teneur en humidité.

Au cours d'un essai de compression typique, l'échantillon développe souvent des fissures verticales et des renflements latéraux (comme un tonneau en bois). Le frottement causé par le contact avec les plaques de chargement maintient l'échantillon ensemble et cela peut affecter la résistance à la compression du matériau. Par conséquent, il a été suggéré par Arce-Villalobos (1993) [Michael (2013)] que des plaques de chargement sans frottement soient utilisées pendant les essais. Arce-Villalobos (1993) affirme également que la lignine joue un rôle important dans la défaillance du bambou sous compression, car les forces tangentielles d'expansion entraînent des contraintes tangentielles critiques. La résistance à la compression du bambou est inférieure à sa résistance à la traction.

✓ **Résistance à la traction**

Il a été démontré que la résistance à la traction du bambou est assez élevée et varie considérablement d'une espèce à l'autre. Le bambou a été cité comme ayant des valeurs de résistance à la traction similaires à celles de l'acier doux dans certains cas [Mary (1996), Evelin (2002) et Laroque (2007)]. La résistance à la traction du bambou est comparable à celle du bois, mais sa résistance à la compression est supérieure de 10 % à celle du bois. Bien

que la résistance à la traction de l'acier soit 2,5 à 3,0 fois supérieure à celle du bambou et la gravité spécifiée 6 à 8 fois celle du bambou, en comptant la résistance à la traction/le poids unitaire (bambou contre acier), la résistance à la traction du bambou est 3 à 4 fois supérieure à celle de l'acier [Ogunbiyi, et al., (2015)]. Comme pour le module d'Young, la résistance à la traction est principalement influencée par le rapport volumique des fibres de bambou [Janssen (1981)]. D'après les études menées par Amada et al. (1996, 1997), la résistance à la traction des échantillons de bambou Mousou (*Phyllostachys edulis* Riv.) de deux ans varie entre 140 et 230 MPa, la valeur moyenne étant d'environ 160 MPa. Cette valeur était plus élevée (environ 3 fois plus élevée) que celle des bois communs tels que le sapin, le pin et l'épicéa, dont la résistance à la traction varie entre 30 et 50 MPa.

En utilisant la règle des mélanges, la résistance à la traction de la matrice de lignine a été estimée à 50 MPa et celle d'un faisceau vasculaire à 610 MPa (soit 12 fois plus). Le module d'élasticité en traction était de 2 GPa et 46 GPa pour la matrice et le faisceau vasculaire respectivement [Amada et al., (1996,1997)]. En raison de leurs fibres enchevêtrées, les nœuds de bambou présentent un comportement plus isotrope et une résistance à la traction plus faible [Amada et al., (1997)]. Alors que le bambou a une bonne résistance à la traction dans la direction des fibres, une valeur critique de la résistance du bambou est la résistance à la traction perpendiculaire aux fibres unidirectionnelles. La matrice de lignine agit seule pour résister à la contrainte appliquée lorsque la tension est appliquée dans la direction transversale. Cela conduit à des fissures et à des ruptures. Des études ont montré que le bambou se brise à une contrainte transversale spécifique d'environ 0,001 et que cette valeur pourrait être utilisée comme critère de limitation pour la conception [Arce-Villalobos (1993)]. Cette valeur peut également être corrélée à la performance dans le sens longitudinal puisque le bambou a un coefficient de Poisson stable d'environ 0,3 [Janssen (2000)].

✓ Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement de la matrice de lignine est souvent le facteur limitant la résistance. Par conséquent, la fente longitudinale et la résistance au cisaillement sont des caractéristiques importantes pour le bambou utilisé dans la construction. En comparaison avec le bois, la section creuse du chaume a moins de surface pour résister au cisaillement que le bois, bien que le bambou ne présente pas de défauts tels que des nœuds. Le bambou présente cependant un avantage par rapport au bois pour résister au cisaillement car il n'a pas de rayons comme le bois. Les rayons sont mécaniquement faibles et, par conséquent, le bambou résiste mieux au cisaillement que le bois. Toutefois, cet avantage peut être annulé dans la plupart des cas en raison de la nature creuse du bambou.

Les fibres de bambou ne sont orientées que dans le sens longitudinal ; par conséquent, les chaumes de bambou ont deux plans de cisaillement asymétriques. Il s'agit d'un plan de cisaillement transversal à la section transversale de la tige et d'un plan de cisaillement parallèle aux fibres [Janssen (2000)]. La présence de ces deux plans de cisaillement rend difficile la réalisation de tests de cisaillement sur une tige de bambou entière. Une méthode de test a été mise au point à l'université technique d'Eindhoven pour effectuer des tests de cisaillement sur des chaumes de bambou entier. Ce test s'est avéré fiable [Janssen (2000)].

Selon les études présentées sur le bambou Guadua, la contrainte de cisaillement parallèle au grain est environ 10 fois inférieure à la résistance à la compression et même 20 fois inférieure à la résistance à la traction de la même espèce de bambou. Par ailleurs, selon des études réalisées

par Janssen [*Janssen (2000)*], la résistance au cisaillement du bambou séché à l'air est environ 0,021 fois la densité, la densité de l'espèce de bambou étant mesurée en kg/m³. La résistance au cisaillement du bambou est souvent deux fois plus élevée que la résistance au cisaillement des essences de bois populaires [*Janssen (2000)*].

En prenant en compte la grande variabilité du comportement mécanique du bambou, certaines de ses caractéristiques mécaniques peuvent être classées en comparaison avec le bois dans le tableau suivant. Ces valeurs ne prennent pas en considération le bambou vert, fraîchement coupé.

Tableau I-5: Comparaison des propriétés mécaniques entre espèces de bambou et de bois, (Benoit Hargot, 2009)

Matériau		D	C// [N/mm ²]	T// [N/mm ²]	Flexion statique			Cis.// [N/mm ²]
					E [kN/mm ²]	σ_{rupt} [N/mm ²]	Lim. él. [N/mm ²]	
Bambou	Min.	0.6	45.6	129.9	10,761	71.0	51.6	19.8
	Max.	1	85.4	289.8	20,063	159.2	106.6	22.8
	Moy.	0.7	63.7	193.8	14,117	116.9	78.9	20.8
Bois	Min.	0.4	29.3	73.1	8,100	29.3		2.9
	Max.	0.5	49.9	107.6	13,400	70.0		8.4
	Moy.	0.4	37.8	95.0	10,071	42.3		7.3

D = Densité ; *C//* = Compression parallèle aux fibres ; *T//* = Traction parallèle aux fibres ; *E* = Module d'élasticité ; σ_{rupt} = Contrainte de rupture ; *Lim. él.* = Limite élastique ; *Cis//* = Cisaillement parallèle aux fibres.

✓ Comportement non linéaire du bambou

Fondamentalement, on peut distinguer deux types de relations constitutives dans le comportement des matériaux d'ingénierie. Il s'agit du type dans lequel la relation entre la contrainte et les incréments de déformation est linéaire et du type dans lequel les relations sont non linéaires. Ce dernier type inclut la théorie endochronique [*Bazant (1979)*]. La modélisation constitutive du comportement non linéaire du bambou peut être traitée en utilisant les principes développés dans ce type de relation constitutive.

La possibilité de déformations plastiques, de fissuration et de viscoélasticité est prise en compte dans l'étude du comportement des matériaux à base de bois lors de la description du comportement de ces matériaux au-delà de l'élasticité linéaire. Au-delà des limites de l'élasticité linéaire, la rupture du matériau peut être décrite comme fragile ou ductile selon l'importance de la contrainte plastique du matériau. Les dommages seront décrits comme fragiles lorsqu'une fissure est amorcée sans une forte contrainte plastique, tandis que la ductilité se produira lorsque le matériau subit d'importantes déformations plastiques avant de se rompre [*Kolari (2007)*]. Une rupture fragile se produit dans un matériau lorsque :

$$\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon^e} < 1, \quad (1.3)$$

où ε^p est la déformation plastique et ε^e est la déformation élastique.

Les chaumes de bambou testés sous une charge de compression uniaxiale ont montré un certain degré de ductilité avant la rupture. D'après les résultats des tests obtenus par [Fozao D. S. Foudjet E. A., Fokoua D., and Kouanm A., (2014)], le rapport donné dans l'équation (1.3) n'a pas été satisfait. Ce rapport était toujours supérieur à 1. Plusieurs fissures ont été observées dans le matériau avant la rupture complète. Cela justifie l'utilisation de la théorie de la plasticité et des principes de la mécanique des dommages pour étudier le comportement de ce matériau sous une charge de compression uniaxiale monotone et cyclique.

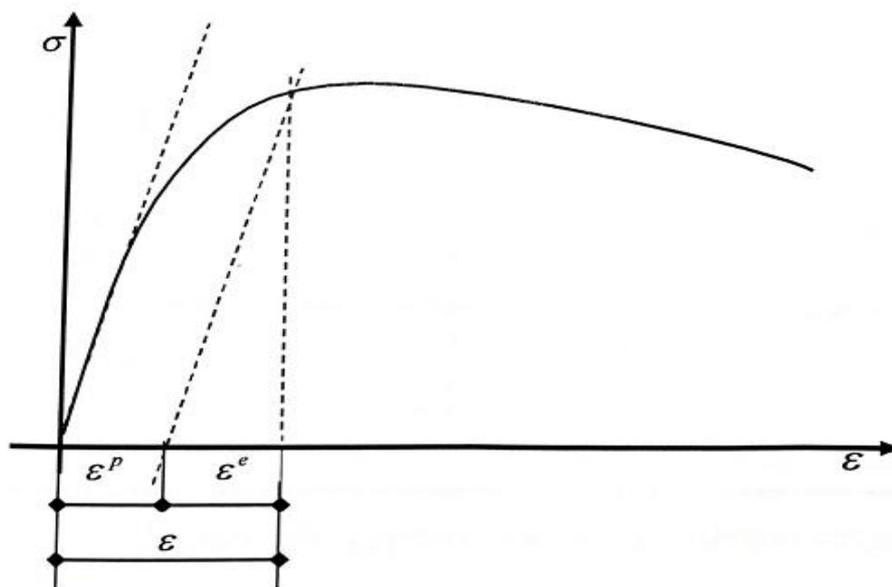


Figure I-12. Comportement non linéaire de matériaux d'ingénierie typiques, (Fozao, 2019)

On peut supposer que la non-linéarité du bambou consiste à la fois en un glissement plastique et en une micro-fissuration du matériau lorsque la charge augmente progressivement. Comme le montre la courbe de la figure 1.12, la contrainte totale du matériau est constituée de la contrainte élastique récupérable et de la contrainte plastique permanente. Au-delà de la zone élastique, le comportement du bambou sous une charge de compression monotone est donc hautement non linéaire puisque, lors de la décharge, seule la déformation élastique ϵ peut être récupérée à partir de la déformation totale ϵ .

✓ Comportement du bambou en termes de durcissement élastique et d'assouplissement de la contrainte

La théorie classique de la plasticité a été largement utilisée pour expliquer le comportement plastique des matériaux d'ingénierie tels que l'acier, l'aluminium, le cuivre et le béton. La courbe de contrainte-déformation du bambou de la figure 1.4 montre qu'il existe de nombreuses similitudes entre le comportement du bambou sous une charge de compression uniaxiale monotone et celui d'un matériau élastoplastique idéalisé avec durcissement par déformation. Par conséquent, la théorie classique de la plasticité peut également être utilisée pour expliquer le comportement du bambou sous une charge de compression uniaxiale monotone.

La courbe de la figure I-13 montre que le matériau présente un comportement presque linéaire jusqu'à la limite proportionnelle indiquée par le point B. Après ce point, le matériau est progressivement affaibli par des microfissures jusqu'au point C, correspondant à la contrainte

maximale. Du point B au point C, on peut voir que la contrainte augmente avec l'augmentation de la déformation, bien qu'à une vitesse réduite.

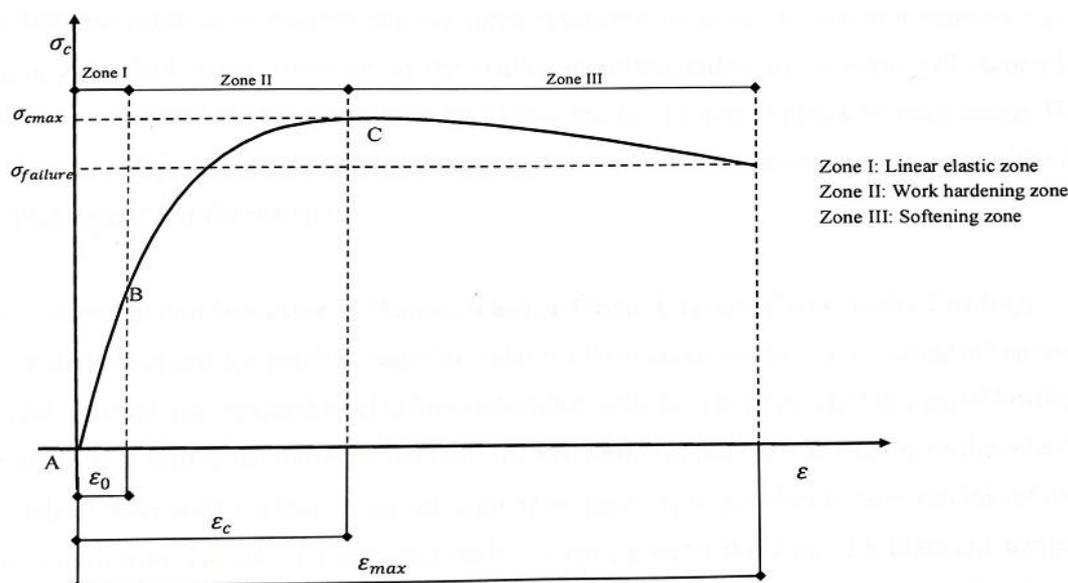


Figure I-13. Courbe monotone typique de contrainte-déformation uniaxiale pour le bambou, (Fozao, 2019)

La zone entre les points B et C correspond à la zone de déformation ou d'écrouissage. Au-delà du point C (c'est-à-dire dans la zone de post-crête), la contrainte dans le matériau diminue progressivement à mesure que la déformation augmente. Par conséquent, le matériau est considéré comme présentant des effets de ramollissement de la contrainte. Lorsque l'état de contrainte d'un matériau diminue avec l'augmentation des déformations, la capacité de charge de ce matériau diminue. Cette réduction de la capacité de charge est connue sous le nom de ramollissement par déformation.

Le comportement de ramollissement se produit généralement lorsque la forme du corps et les conditions limites induisent un état de déformation non homogène à un endroit particulier du matériau. Cela peut entraîner une localisation de la déformation. Un état de déformation localisée peut se produire lorsque, après un point d'instabilité, toutes les déformations supplémentaires se concentrent dans une région petite mais finie appelée bande de cisaillement [De Borst et al., (2013)]. Cela peut se produire lorsque les conditions de charge externe ne varient pas. La structure peut commencer à se décharger élastiquement en dehors de la zone localisée lorsque toutes les déformations sont localisées dans cette zone. La localisation des contraintes peut être déclenchée par la forme non uniforme du corps et de la microstructure du matériau, ce qui entraîne un état de déformation non homogène [Dorgan (2006)]. On peut penser que les bandes de cisaillement résultant de l'inhomogénéité du bambou sont dues à l'hétérogénéité du matériau et aux défauts présents dans le matériau tels que les micro-fissures et les micro-vides. La localisation peut être attribuée à un couplage de mécanismes inélastiques tels que la croissance de micro-fissures et de micro-vides avec le sillon plastique.

De manière globale, le bambou présente de nombreux avantages tant du point de vue de ses qualités physico-chimiques impressionnantes comme nous venons de voir, que du point de vue de la protection de l'environnement et du développement durable.

Les avantages du bambou du point de vue de la protection de l'environnement et du développement durable sont multiples (*generation-bambou.org*) :

- ☞ il fixe 30% de plus de CO₂ que les arbres. Jusqu'à 12 tonnes de CO₂/ha/an (3 tonnes pour une forêt de feuillus) et libère de ce fait plus d'oxygène ;
- ☞ il améliore l'infiltration de l'eau dans le sol (2 fois plus qu'une forêt de feuillus) ;
- ☞ il limite l'érosion des sols (réseau racinaire très dense sur 60 centimètres de profondeur) et limite le lessivage des sols (infiltration en profondeur de nutriments... ou polluants) ;
- ☞ il restaure des sols appauvris en participant à l'élimination de certaines toxines du sol (phyto-remédiation) ;
- ☞ il pompe l'eau du sol quand elle est disponible en surface, sans assécher les nappes phréatiques ;
- ☞ sa culture nécessite peu ou pas d'engrais, pas de produits phytosanitaires ;
- ☞ le bambou présente une faible consommation d'énergie. Il a une bien meilleure balance énergétique que d'autres matériaux de construction. Il faut 8 fois moins d'énergie pour créer un bâtiment en bambou, qu'en ciment, pour une même capacité (*Roach, 1996*) :
Acier : 1500 Ciment : 240 Bois : 80 Bambou : 30 ;
- ☞ son recyclage est facile.

c) La Pierre Naturelle

La pierre en tant que matériau de construction est utilisée depuis longtemps comme élément structurel de maçonnerie. Sa disponibilité variable selon les territoires et les difficultés d'extraction et de taille qu'elle pose parfois a conduit à la réserver plus souvent aux architectures prestigieuses ou monumentales. Aujourd'hui, les moyens modernes ont permis de faciliter son extraction et sa taille.

La diversité des formations géologiques dont elle est issue se traduit naturellement par une grande variété de pierres aux caractéristiques distinctes (granite, calcaire, grès, ardoise, pierre volcanique, marbre, latérite, etc.). Les architectures en pierre jouent avec des éléments structurels de murs et piliers, en remplissage ou en revêtement comme on peut le voir sur la figure I-14 ci-dessous.

En tant que matériau géo-sourcé, la pierre possède des caractéristiques très similaires à la terre (circularité, sobriété énergétique, confort intérieur, etc.) [*Dejeant et al., (2021)*].

- ✓ **Disponibilité** : Matériau disponible en quantité dans de nombreuses zones, notamment montagneuses. Certaines zones peuvent se trouver assez éloignées d'une carrière de pierre de bonne qualité. La latérite, très présente dans le Sahel fournit le bloc de latérite taillée (BLT) utilisé dans la maçonnerie.
- ✓ **Extraction** : Les pierres sont généralement extraites des carrières, mais peuvent aussi être issues des rivières (galets). Une bonne gestion des carrières est indispensable. Son transport peut affecter les routes rurales. La pierre peut aussi provenir du nettoyage des champs ou des pierres d'excavation.
- ✓ **Circularité** : Potentiel de valorisation des déchets des champs et des pierres d'excavation. C'est un matériau couramment réutilisé et réutilisable à l'infini.

- ✓ **Énergie et émissions** : Si la pierre est extraite à proximité, c'est un matériau bas carbone et à faible énergie grise (extraction, transformation et mise en œuvre).
- ✓ **Confort intérieur** : Inertie thermique et non-toxicité assurent un climat intérieur sain et un bon confort thermique.



Figure I-14. Revêtement d'un pan de mur en pierre

- ✓ **Caractéristiques physiques** : Selon le type de roche, ce matériau peut être très robuste, durable dans le temps et peu sensible à l'humidité. Les éléments de maçonnerie en pierre ont une résistance à la compression élevée et une faible résistance en traction. Ils peuvent être sensibles aux remontées capillaires.
- ✓ **Aspects socioculturels** : Potentiel de préservation et de revalorisation des patrimoines architecturaux et des savoir-faire associés.
- ✓ **Durabilité** : Bien construits et correctement entretenus, les bâtiments en pierre ont une très longue durée de vie.
- ✓ **Aspects économiques** : Très variables selon la distance de la carrière, les difficultés d'extraction et de taille, l'ajout de matériaux industriels et le coût de la main-d'œuvre.
- ✓ **Esthétique et flexibilité d'usage** : Matériau généralement apprécié, qui renvoie à l'image des monuments prestigieux. La pierre présente une palette de couleurs, de textures et de formes possibles étendue. Son usage est cependant moins flexible que d'autres écomatériaux.

d) Le bois d'œuvre

Le bois est très apprécié pour ses qualités esthétiques, sa légèreté, sa résistance et sa facilité de mise en œuvre dans des bâtiments à architecture légère. Le bois est encore couramment utilisé au Cameroun, qu'il soit approvisionné par la filière artisanale informelle ou par la filière industrielle, mais peu d'exploitations sont gérées durablement.

En outre, de nombreuses pratiques actuelles (séchage inadapté, rapidité d'exécution, etc.) contribuent à donner une image dégradée du bois, d'autant que le meilleur bois est souvent destiné à l'exportation.

Matériau biosourcé, le bois présente plusieurs atouts majeurs qui en font un matériau de choix pour l'écoconstruction s'il est géré durablement. Il est devenu au cours des dernières années un puissant levier d'évolution des techniques constructives, de renouvellement de l'architecture et de développement économique.

Il est bien souvent reconnu par la normalisation et est confronté à moins de freins réglementaires que la plupart des autres matériaux bio ou géosourcés.

Caractéristiques [Dejeant et al., (2021)]

- ✓ **Disponibilité** : La forêt occupe 22% des terres africaines, majoritairement répartie en zone tropicale. 75% de ces forêts ne disposent pas d'un plan de gestion durable et la déforestation s'accélère. Les mangroves sont encore plus menacées. À l'état actuel, la ressource disponible est donc limitée.
- ✓ **Extraction** : Ressource renouvelable, mais peu renouvelée en Afrique. La surexploitation a un impact négatif sur l'environnement (biodiversité, stabilité des sols, changement climatique, ressource en eau). À l'inverse une exploitation responsable a un impact très positif.
- ✓ **Énergie et émissions** : Potentiel puits de carbone si la forêt est gérée durablement. À l'inverse, le bilan carbone est très défavorable. L'énergie intrinsèque (et bilan carbone) à sa production varie selon certains facteurs (transport, procédés industriels, traitements).
- ✓ **Circularité** : Matériau biodégradable qui autorise aisément le réemploi et le recyclage (sans traitement toxique). Les déchets de production sont valorisables.
- ✓ **Confort intérieur** : Matériau respirant et isolant, il participe au confort ambiant et à un climat sain (sans traitement nocif). Il a une faible inertie thermique.
- ✓ **Caractéristiques physiques** : Matériau aux propriétés très intéressantes : résistance à la traction et à la flexion, léger. Le bois permet des solutions adaptées en zone sismique et cyclonique. Selon l'essence de bois, matériau sensible à l'humidité, aux champignons et aux insectes. Matériau propagateur de feu, mais présentant une combustion lente et une stabilité au feu, permettant de retarder les dommages.
- ✓ **Durabilité** : Très variable selon l'essence du bois et l'attention portée tout au long du cycle de vie du bâtiment (de l'abattage à l'entretien). Les éléments en bois ont une durée de vie potentiellement très longue et sont faciles à réparer ou à remplacer.
- ✓ **Aspects socioculturels** : De nombreuses communautés dépendent de la forêt pour leur survie et leur revenu. L'accès au bois de qualité détermine souvent la capacité des populations à se loger de manière adéquate et abordable. La valorisation de la filière bois présente un grand intérêt à la fois pour l'environnement, le bien-être de nombreuses populations, les économies locales, le patrimoine culturel et l'accès à l'habitat.
- ✓ **Aspects économiques** : Coûts très variables selon l'essence de bois, le transport, les procédés industriels et les traitements. Matériau rapide d'emploi. Gain en surface (murs moins épais qu'en maçonnerie).
- ✓ **Esthétique et flexibilité d'usage** : léger, souple, résistant et facile à travailler, le bois offre une grande richesse d'emploi et d'expressions architecturales telle que le montre

la figure I-15 ci-dessous. Le système à ossature est très flexible, facile à transformer et à agrandir.



Figure I-15. Maison en ossature bois, Ec(H)ome, (2010).

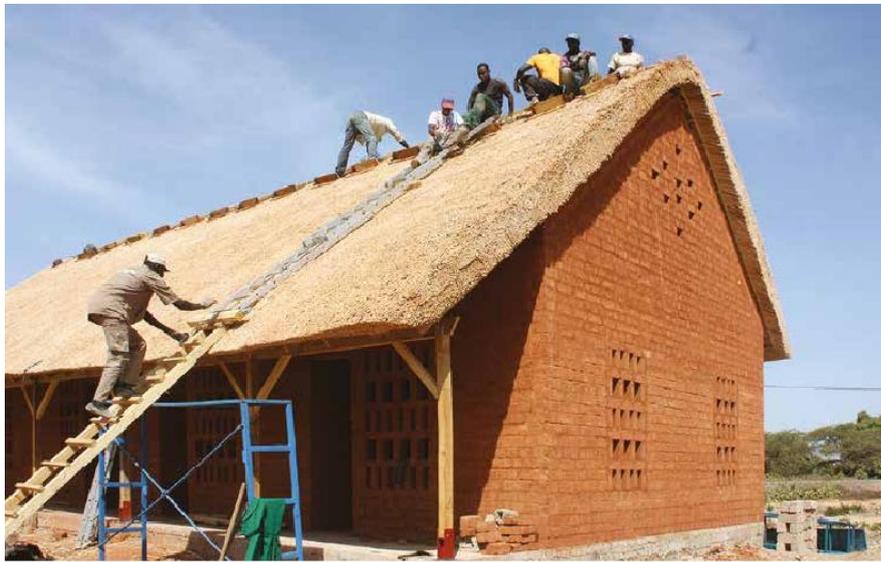
Le bois peut trouver une multitude d'usages : en structure, ossature porteuse, murs, planchers et charpente, ou en second œuvre, parois légères, menuiseries ou revêtement des sols, murs et plafonds.

e) Les Fibres Naturelles

Les matériaux à base de fibres naturelles, ou matériaux bio-sourcés, sont des matériaux partiellement ou totalement issus de la biomasse d'origine végétale ou animale, telle que le bois (bois d'œuvre et produits dérivés), le bambou, les palmes, le chaume (roseaux, herbes ou paille) et autres fibres naturelles (sisal).

Des centaines d'espèces végétales sont largement utilisées dans le monde principalement pour les toitures, mais aussi pour les murs, les planchers et des éléments secondaires (cordes, nattes). Des matériaux innovants viennent compléter la large gamme de produits et d'applications : isolants (laines, bottes de paille, etc.), mortiers et bétons (terre-paille, etc.), panneaux ou encore dans la chimie du bâtiment (colles, adjuvants, peintures, etc.).

Ces matières végétales, non seulement offrent une belle architecture visible sur la figure I-16 ci-dessous, mais aussi des solutions extrêmement pertinentes et constituent une formidable opportunité pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et stocker une grande quantité de carbone.



*Figure I-16. Centre artisanal du Typha, Maka Diama, Sénégal.
Architecte : Atelier Migrateur Architecture*

Caractéristiques des fibres naturelles [Dejeant et al., (2021)]

- ✓ **Disponibilité** : Les matériaux biosourcés d'origine végétale — hors bois — sont disponibles, ou potentiellement, sur tous les territoires, y compris en zones arides. De nombreuses espèces spontanées et cultivées sont disponibles en Afrique (herbes variées, typha, bambou, roseaux, pailles de céréales, feuilles de palmes, sisal).
- ✓ **Extraction** : Matière renouvelable, issue de végétaux à croissance rapide, provenant de trois types de gisements : végétation spontanée, coproduits agricoles ou culture spécifique à cet usage. Leur culture est peu gourmande en eau et en intrants. Elle a l'avantage de stabiliser les sols et de pouvoir préserver (ou restaurer) les écosystèmes naturels.
- ✓ **Énergie et émissions** : L'énergie grise de production est généralement faible, voire nulle. L'empreinte carbone est très favorable grâce au stockage de carbone.
- ✓ **Circularité** : Non traités, ces matériaux autorisent aisément le réemploi ou le recyclage, ou sont biodégradables. Certains matériaux sont issus de la valorisation des déchets ou de coproduits.
- ✓ **Confort intérieur** : Matériaux possédant de très bonnes propriétés thermiques et phoniques. Selon leur usage, ils permettent de ventiler, de filtrer la lumière ou d'assurer une bonne qualité de l'air intérieur (perspirants, sains).
- ✓ **Caractéristiques physiques** : Très variables selon les végétaux et les conditions d'usages. Matières généralement performantes en traction, avec un bon rapport résistance-poids. Potentiellement combustibles, sensibles aux agents biologiques, à l'humidité et aux agressions et faiblement résistantes à la compression. En resserrant/compressant les fibres ou en les noyant dans un mortier, ces inconvénients sont considérablement réduits. Elles peuvent offrir de bonnes performances structurelles et participent à réduire les risques (dommages et blessures) en cas de tremblement de terre et de forts vents.
- ✓ **Aspects socioculturels** : De nombreuses pratiques traditionnelles existent s'appuyant sur un triptyque gestion du territoire-artisanat-architecture. Elles font face à des préjugés

et à un processus d'abandon. Leur revalorisation présente donc un grand potentiel à la fois pour l'environnement, l'économie locale et le patrimoine culturel.

- ✓ **Durabilité** : La durabilité des éléments issus de matière végétale est très variable, selon le type de végétal, l'usage, la qualité de mise en œuvre ou encore l'utilisation de traitement. Une couverture de palme dure de 3 à 10 ans alors qu'une couverture de chaume de qualité et entretenue a une espérance de vie de plus de 30 ans.
- ✓ **Aspects économiques** : Coûts extrêmement variables. La matière première est généralement bon marché, voire gratuite. Son niveau de transformation, artisanale ou industrielle impacte plus ou moins son coût. Ainsi, de nombreuses applications traditionnelles peuvent n'exiger aucune ressource en numéraire alors que des panneaux muraux industriels se placent au même niveau que des matériaux conventionnels.
- ✓ **Esthétique et flexibilité d'usage** : Les fibres végétales recèlent des potentiels esthétiques très forts. Elles offrent une grande flexibilité d'usage et des expressions architecturales et artistiques illimitées.

Les fibres végétales retrouvent une place de choix dans la production des nouvelles architectures contemporaines. Les pistes d'emplois, réinterprétant le patrimoine traditionnel se multiplient.

Dans cette partie du chapitre, nous avons fait un recensement et une présentation non exhaustive de la grande diversité et de la beauté architecturale de certains matériaux locaux disponibles au Cameroun (terre, pierre, bois, fibres, ...) ainsi que de certaines de leurs caractéristiques propres qui en font de véritables éco-matériaux. Nous allons dans cette seconde partie du chapitre, compléter ce travail de recensement en présentant certains travaux qui se sont intéressés à la caractérisation de certains de ces matériaux tant du point de vue acoustique, thermique que mécanique.

II- Problématique des matériaux de construction et leur production

1- Analyse du cycle de vie des matériaux de construction

Le choix des matériaux adéquats est une exigence encadrée par des normes afin de limiter les risques d'effondrements d'une structure, de limiter l'impact environnemental et d'assurer un milieu serein et confortable. Le choix d'un matériau adéquat se fait sur la base de nombreux critères : économique, esthétique, propriétés physiques et impact environnemental.

Tous ces critères doivent être pris en compte dans l'analyse du cycle de vie du matériau qui intègre toute la chaîne depuis l'extraction de matières premières jusqu'à sa démolition comme l'indique la figure I-17. Il s'agit donc d'avoir une connaissance globale du matériau à utiliser en respectant l'environnement et en privilégiant les ressources locales.

Parmi les matériaux de construction, on distingue ceux dits conventionnels, issus de la production industrielle (ciment, tôle ondulée, verre...) et ceux qu'on peut qualifier de matériaux locaux tels que le bois, la terre stabilisée, la terre cuite, la pierre, etc...



Figure I-17. Analyse du cycle de vie d'un bâtiment

Ainsi, les matériaux locaux pourraient s'assimiler aux matériaux appliqués avec des techniques traditionnelles ou améliorées et traités en vue d'en accroître les performances. A l'exemple des BTC: Brique de Terre Comprimée, BTS: Brique de Terre stabilisée, brique de terre cuite..., les matériaux locaux offrent de réelles garanties de qualité de vie, notamment en termes de confort acoustique et thermique. Ils permettent une économie d'isolation et de climatisation grâce à leurs propriétés (Damfeu 2017).

Le tableau I-6 présente quelques matériaux locaux de construction et leurs techniques de mise en œuvre.

Tableau I-6: Quelques matériaux locaux de construction à base de terre et de végétaux (Tai, 2010)

Matériau	Technique	Description de la technique employée
Terre (géossourcé)	Adobe	La technique de l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques avec de la terre et à les laisser sécher au soleil. On le connaît aussi sous le nom de « brique de terre crue » et « banco ». On ajoute parfois du sable ou des matières organiques (fumier, paille) à la terre.
	Banco	
	Brique de Terre crue	
	Brique de Terre Comprimée	La terre est comprimée au moyen d'une presse pour façonner des briques de terre comprimées. Après séchage, elles seront utilisées de la même façon que les briques d'adobe, les briques cuites ou les agglomérés de ciment.
	Pisé	Le pisé est un système constructif en terre crue. On le met en œuvre dans des coffrages, appelés banchage.
	Brique géopolymère	Cette brique est fabriquée à base d'argile latéritique, avec un peu de géopolymère liant. La brique géopolymère peut être produite par des petites briqueteries avec peu d'équipements et de charges financières. C'est une brique peu coûteuse et adaptée aux climats chauds.
	Bois	Le bois a une densité beaucoup plus faible que le béton ou la terre, il est donc plus approprié en régions chaudes et humides. C'est un matériau naturel et dans une certaine mesure, renouvelable.

Matériau	Technique	Description de la technique employée
Végétaux (biossourcés)	Chaume	Le terme chaume désigne généralement la paille après les moissons ou d'autres tiges ligneuses. Il permet une bonne isolation thermique. Le principal problème est la vulnérabilité au feu. Ainsi, se développe une technologie de couche protectrice contre les incendies.
	Torchis	Le torchis est une technique de construction du type ossature en bois. Traditionnellement, l'ossature porteuse principale est constituée de poutres de bois, complétée par un clayonnage à base de bois souples (appelés fuseaux, éclisses), ou de jonc, roseau et bambou. Ces fuseaux sont hourdés, c'est-à-dire enroulés d'un mélange de terre à l'état plastique auquel sont souvent ajoutées des fibres végétales ou animales.
	Chanvre	Le chanvre dont le nom scientifique est <i>cannabis sativa</i> est une plante dioïque de la famille des cannabacées. on l'utilise pour la fabrication des bétons de chanvre qui est un mélange de deux constituants de nature très différentes, à savoir un granulats d'origine végétale et/ou un liant à prise hydraulique et aérienne.

2- Matériaux locaux à bases de fibres végétales

Parmi les matériaux naturels d'origines végétales mentionnés dans le tableau 1-6, les études sur les bétons de chanvre (Samri, 2008; Thai, 2010; Goudet, 2012; Oumerziane, 2013), ont prouvé que ce matériau présente d'énormes potentialités pour contribuer à la construction durable. Il rentre dans la constitution de la plupart des matériaux de construction d'origine végétale en Europe.

Dans les pays africains, les fibres végétales constituent l'essentiel des adjuvants qui, mélangés à de la terre, aboutissent à des matériaux généralement plus performants, il faut relever que les matériaux locaux de construction sont généralement géossourcés, qu'il s'agisse de brique de terre (BT); de la brique de terre cuite (BTC); de la brique de terre stabilisée (BTS); des briques de terre avec incorporation de fibre de palmier ou de gousse de mil ou de sciure de bois ou encore de pouzzolane (*Damfeu 2017*). Bien plus, avec la diversité des végétaux : fibre de bambou, coque d'arachide, fibre de rotin, fibre de noix de coco, fibre de kapok, fibre de chaume, etc., il est nécessaire d'investiguer sur leur utilisation en tant que matériaux à renforcement de béton, ou alors investiguer sur l'impact qu'ils auraient sur d'autres matériaux locaux pour une isolation thermique optimale. L'utilisation des matériaux à fibres végétales qui sont renouvelables, recyclables et durables peut être une bonne réponse dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être de confort et de réduire les impacts environnementaux. L'utilisation des matériaux à base de végétaux présentent de nombreux avantages :

- ✓ les ressources sont abondantes et renouvelables: les végétaux se renouvellent selon la saison et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources fossiles charbon, pétrole et gaz seront épuisées d'ici quelques siècles. Par conséquent, l'utilisation des végétaux évite l'épuisement de ressources ;
 - ✓ les matériaux à base de végétaux sont à faible énergie grise : l'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la démolition du matériau ou à son élimination en fin de vie.
- La figure I-18 présente l'énergie grise de certains matériaux utilisés dans le bâtiment.

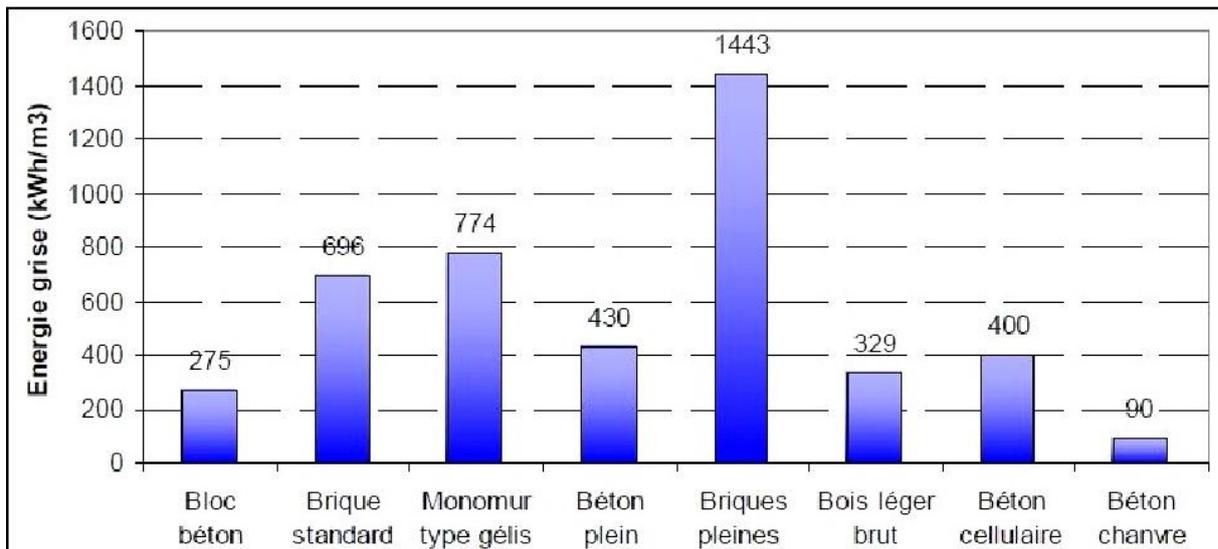


Figure I-18: Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment (citemaitions.fr)

On remarque que l'énergie grise du béton de chanvre est plus faible que les autres du fait de la faible quantité d'énergie nécessaire pour sa production et la limitation des consommations liées au transport.

3- Maîtriser la consommation d'énergie grise : une astuce en faveur de la construction durable

L'énergie consommée pour la production, la mise en place et l'élimination ou le recyclage des matériaux de construction ne doit pas être négligée. Cette énergie, appelée énergie grise, représenterait de 700.000 à 1 million de kWh pour une maison classique. Cette énergie équivaudrait à sa consommation de chauffage pendant 50 à 100 ans (*laboratoire GRECAU, Ecoles d'architectures de Bordeaux et Toulouse/Citemaison.fr*).

La réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment impose donc de prendre en compte à la fois ses performances thermiques pour réduire la consommation de chauffage ou d'électricité, mais aussi l'énergie grise qu'il contient. L'énergie grise contenue dans un matériau, ramenée au nombre d'années d'utilisation, est plus faible si :

- ✓ sa production ne nécessite pas beaucoup d'énergie ou s'il s'agit d'un matériau naturel peu transformé,
- ✓ s'il provient d'un lieu proche du lieu de construction,
- ✓ s'il a une longue durée de vie,
- ✓ s'il est recyclable ou si son élimination nécessite peu d'énergie.

Le tableau 1-7 donne les valeurs de l'énergie grise et de la conductivité thermique de quelques matériaux de construction.

Tableau I-7: Energie grise et conductivité thermique de certains matériaux de construction, (Source : Bibliothèque des matériaux de construction (extrait), GRECAU, Citemaison.fr, <http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php>).

Matériaux	Energie grise (kWh.m ³)	Conductivité thermique (W/m.k)
Panneau contreplaqué	4000	0.100
Panneau en bois massif 3 couches	1636	0.140
Brique pleine (cuite)	1443	1.00

Matériaux	Energie grise (kWh.m ³)	Conductivité thermique (W/m.k)
Enduit de ciment	1235	0.800
Verre cellulaire 160 kg/m ³ (plaque)	1200	0.057
Laine de roche 160kg/m ³	1006	0.047
Brique standard 20 cm	696	0.39
Monomur type 3B Bellenberg	600	0.120
Bois lourd (hêtre, chêne)	500	0.020
Plâtre courant pour enduit intérieur	552	0.57
Laine de verre 35 kg/m ³	470	0.039
Laine de roche 70kg/m ³	432	0.042
Béton plein	430	1.650
Bois léger brut, séché à l'air (sapin, épicéa)	329	0.140
Bloc béton (parpaing de ciment)	275	0.952
Laine de roche en vrac	216	0.065
Pisé (2000kg/m ³)	100	1.2
Laine de mouton et autres laines animales	56	0.060
Béton de chaux-chanvre 270 kg/m ³	54	0.130
Laine de chanvre, lin, coton	48	0.060
Béton terre-paille 600 kg/m ³	18	0.170
Ponce naturelle	16	0.120

Le choix de l'usage des matériaux doit également tenir compte de la quantité de gaz à effet de serre émise au cours de leur cycle de vie, et de leur caractère non renouvelable.

Du point de vue des aspects d'émission des gaz à effet de serre, les émissions engendrées par les matériaux à base de produits végétaux sont plus faibles (*Damfeu 2017*). Pendant la croissance des végétaux, ils absorbent le CO₂ contenu dans l'atmosphère. Cette activité se réduit considérablement avec la durée de vie desdits végétaux (*Damfeu 2017*). Il devient de fait urgent, face aux préoccupations liées au réchauffement climatique et aux enjeux environnementaux, de réfléchir à la mise en œuvre d'un programme d'efficacité énergétique dans le bâtiment afin d'améliorer le confort thermique intérieur pendant les périodes très chaudes, dans le but de limiter le recours aux appareils de climatisation. Cette approche justifie l'importance de la mise en œuvre des matériaux locaux de bonne isolation thermique qu'il urge d'en indiquer quelques-uns généralement utilisés dans le secteur du bâtiment.

4- Isolation thermique dans le bâtiment

Le but de l'isolation thermique est donc de freiner considérablement l'échange de chaleur. Dans le bâtiment, le type d'isolation le plus utilisé est l'isolation par l'extérieur. L'inertie thermique renforcée que procure l'isolation thermique, permet aux parois (mur, sol, toitures) du bâtiment d'absorber la chaleur puis la restituer sur le long terme (il en est de même pour la fraîcheur) (*Damfeu 2017*). Ainsi, cette chaleur ou cette fraîcheur accumulée selon les saisons, est progressivement diffusée dans les pièces de l'habitation, ce qui amène une stabilité de la température procurant un meilleur confort tant en temps de froid et qu'en temps de chaleur, et donc des économies d'énergies induites accompagnées d'une diminution des émissions de CO₂. Une maison bien isolée perd moins de chaleur ou de fraîcheur au court du temps et assure un bon confort thermique.

Les isolants thermiques diffèrent les uns des autres par de nombreux paramètres. Parmi les propriétés thermophysiques des matériaux décrits comme isolants dans le bâtiment, la conductivité thermique (λ) et la capacité thermique (C_p) sont celles dont les valeurs sont les plus fréquemment demandées: La conductivité thermique permet de comparer le pouvoir

d'isolation thermique d'un matériau par rapport à un autre tandis que la capacité thermique compare le pouvoir d'inertie thermique. Différents types d'isolants sont couramment utilisés dans les bâtiments. Ils peuvent être de trois natures: industriels, synthétiques ou naturels.

i. Les isolants industriels

✓ Les laines minérales

L'isolation en laine minérale est constituée soit de la laine de roche, soit de la laine de verre. Dans la laine de roche ($\lambda=0,034$ à $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Wagelmans et al., 2009), le matériau de base est la roche volcanique donc une photo est présentée à la figure I-19 a). Dans la laine de verre ($\lambda=0,034$ à $0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Wagelmans et al., 2009), le matériau de base est le verre, donc une photo est présentée à la figure I-19 b). Ils sont disponibles en rouleaux ou matelas (pour toitures plates), panneaux semi-rigides (comme isolant pour mur creux) et panneaux en laines rigides (utilisés dans des sols flottants).

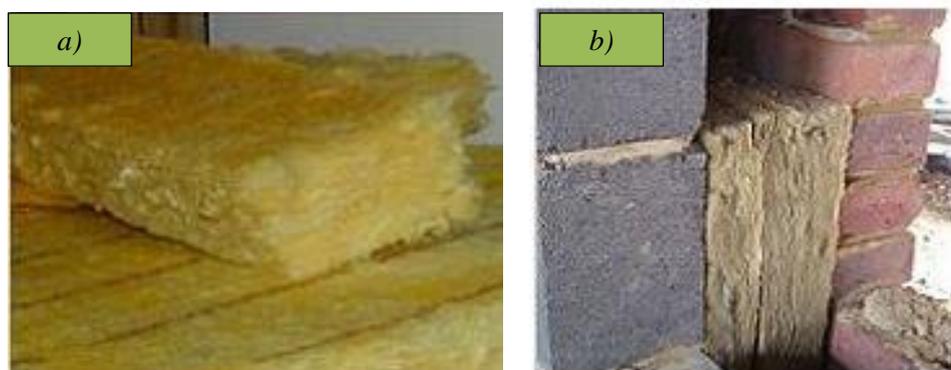


Figure I-19. Laines minérales: a) Laine de verre; b) laine de roche dissimulée entre deux murs

ii. Les isolants synthétiques

Les isolants synthétiques présentent une valeur isolante meilleure que celle des laines minérales. Ils sont hydrophobes et conviennent à un environnement humide (Damfeu, 2017). Dans cette catégorie, on distingue :

- ✓ le polystyrène expansé (EPS), sa valeur isolante est inférieure aux autres matériaux synthétiques, si bien que les panneaux doivent être plus épais (figure I-20a). Sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,038 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Wagelmans et al., 2009);
- ✓ le polystyrène extrudé (XPS), il absorbe moins que l'EPS, mais isole mieux (figure I-20b). Sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Wagelmans et al., 2009);
- ✓ le polyuréthane (PUR), il isole mieux que l'EPS et le XPS, sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Wagelmans et al., 2009). Il est disponible en panneau recouvert d'un revêtement en bitume ou en aluminium (figure I-20c).

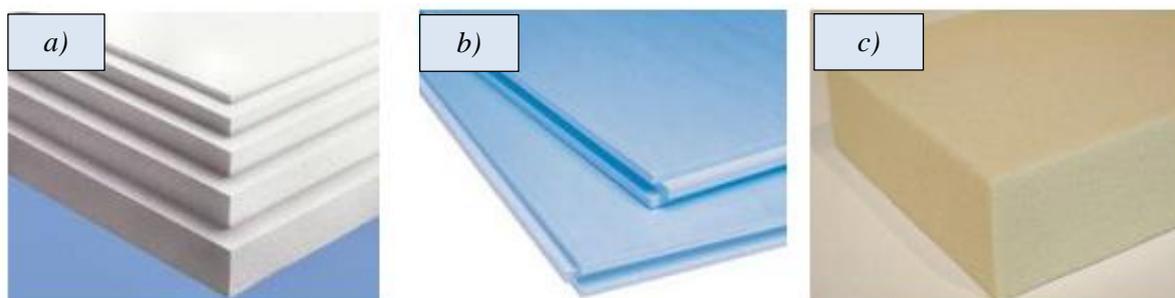


Figure I-20. Les isolants synthétiques: a) EPS; b) XPS; c) PUR

iii. Les isolants naturels

✓ Les fibres de bois

Ce sont des isolants d'origine végétale. Ils sont constitués de fibres de bois agglomérées avec la lignine de bois. La figure 1-21 montre un exemple de fibre de bois. Les fibres de bois ont une densité plus importante que les laines minérales, ce qui leur confère une meilleure efficacité contre la chaleur. Il existe des isolants dérivés des bois appelés laine de bois dont la conductivité thermique est comprise entre 0,052 à 0,06 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Wagelmans et al., 2009; Ngohe-Ekam, 2006).



Figure I-21. Exemple de fibres de bois

✓ Les laines naturelles

Ce sont les laines de chanvre; de lin; de coton ; de mouton, de plume de canard.... Un exemple de laine naturelle est illustré par la figure I-22. Tous ces produits sont naturels à la base, mais ils doivent subir des traitements pour être ignifuges (Damfeu, 2017).



Figure I-22. La laine de chanvre

✓ La paille

La paille, illustrée par la figure I-23, est un composé naturel utilisé entre deux ossatures. Elle est ensuite recouverte d'un enduit pour la protéger de la pluie. C'est un produit assez léger, car sa masse volumique oscille entre 80 kg m^{-3} et 100 kg m^{-3} . En raison de sa faible masse volumique, Elle présente une conductivité thermique qui varie entre $0,033$ à $0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Wagelmans et al., 2009).



Figure I-23. Les fibres de paille

III- Travaux de recherches sur la caractérisation de certains matériaux locaux disponibles au Cameroun : la terre, le chanvre, la fibre de palmier, bambou.

De nombreux travaux se sont intéressés à l'étude des caractéristiques physiques de certains matériaux naturels couramment utilisés au Cameroun à des fins de construction. Parmi les matériaux caractérisés, on retrouve les ceux faits en terre, en bambou, en chanvre, en pouzzolane, en fibre de palmier, etc.

a) Sur l'aspect de la caractérisation thermophysique et/ou mécanique

Dans les pays sous les tropiques où les climats sont réputés chauds, l'amélioration du confort thermique y est donc nécessaire et cela passe par le recours aux méthodes de climatisation. La climatisation indiquée en contexte de changement climatique est une climatisation naturelle dont la mise en œuvre passe par un choix adéquat des matériaux locaux appropriés pour limiter les apports en chaleur. Il est donc de plus en plus conseillé de recourir aux matériaux dont le profil thermique est connu et adapté pour le remplissage des murs de bâtiments et des parois afin de garantir une isolation thermique du bâtiment.

L'amélioration du confort thermique dans un bâtiment passe par la mise en œuvre des matériaux performants qui peuvent assurer une bonne isolation thermique. Ces matériaux doivent non seulement présenter une bonne résistance à la transmission de la chaleur, mais aussi, avoir une bonne résistance mécanique (Meukam, 2004).

Les isolants thermiques conventionnels les plus connus varient les uns aux autres par certains paramètres parmi lesquels la densité, (Busschaert, 1996). (cf. tableau 1.8).

Tableau I-8: Conductivité thermique de certains isolants thermiques conventionnels, (Meukam, 2004)

Matériaux	Masse volumique ρ (k/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Laine de verre minéral	18	0.004-0.056
Polystyrène expansé	18	0.040-0.046
Polyuréthane	35	
Polystyrène extrudé	35	0.031-0.034
Laine de bois	150	0.052-0.065
Perlite expansé	90	0.060

Les conductivités thermiques de quelques matériaux utilisés dans la construction au Cameroun sont présentées dans le tableau 1.9 :

Tableau I-9: Conductivité thermique de certains isolants thermiques utilisés au Cameroun (Meukam, 2004)

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Béton de fibre de bois	300-400	0.12
Béton de copeau de bois	450-650	0.16
Béton de pouzzolane		0.52
Liège de bambou	150-250	0.048
Paille	300-400	0.12
Carton		0.14-0.35
Carton comprimé		0.26
Sciure de bois	190-215	0.06 - 0.07
Terre sèche	1000-2000	0.17-0.58
Terre à 10% d'eau	1000-2000	0.50-2.1
Terre à 20% d'eau	1000-2000	0.8-2.6
Terre battues (mur)	1700	0.99
Contre-plaqué		0.12
Bois lourds		0.15-0.23
Bois légers		0.12
Terre cuite	1800-2000	1.15
Kapok		0.035 à 30°C

Dans le bâtiment, il existe une grande variété d'isolants thermiques. Le tableau I-10 présente les masses volumiques et les conductivités thermiques de certains isolants utilisés dans le bâtiment (Reknaguel, 1995).

Tableau I-10: Masses volumiques et conductivités de certains isolants utilisés dans le bâtiment, (Meukam, 2004)

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Bloc de terre comprimée	1700- 1900	1.05
Terre cuite	1700-2100	1-1.35
Béton		
Béton plein (granulats)	1600-2400	0.8-1.15
Béton caverneux (granulats)	1000-2000	0.35-0.7
Béton de pouzzolane	1000-1200	0.35
Béton de perlite	400-800	0.24-0.31
Béton de bois	250-650	0.10-0.16

Matériau	Masse volumique $\rho(\text{kg/m}^3)$	Conductivité thermique $\lambda(\text{W/m.}^\circ\text{C})$
Béton cellulaire traité à l'autoclave	375-825	0.16-0.33
Plaques à fibres de bois		
	450-550	0.16
	350-450	0.12
	250-350	0.10
Bois naturel spéciaux		
Balsa	60-120	0.052
Bois lourd	800-1000	0.29
Mousse rigide à base de polychlorure de vinyle	25-48	0.031-0.034
Mousse rigide à base de polyuréthane		
Plaque expansé en continu	30-40	0.029
Bloc expansé en discontinu	30-60	0.030-0.033

Meukam (2004) a étudié les propriétés thermiques des briques de terre avec l'ajout de pouzzolane naturelle et sciure de bois. Il est arrivé à la conclusion que l'ajout de pouzzolane ou de la sciure de bois permet de diminuer considérablement la conductivité thermique de la latérite. Il a trouvé des valeurs de la conductivité réduite de l'ordre 55% pour le mélange de la latérite et la pouzzolane et de l'ordre 45% pour le mélange de la latérite et de la sciure de bois par rapport à la latérite naturelle (cf. tableau 1.11).

Tableau I-11: Paramètres expérimentaux et calculés des propriétés thermophysiques de la latérite, de latérite + pouzzolane et de la latérite + sciure de bois, Meukam, 2004

	Pression compactage (bar)	Diffusivité Thermique $\times 10^7$ (m^2/s)			conductivité thermique			Capacité calorifique (kJ/kg)		
		a_{ex} (2.29)	a_{ca}	Ecart (%)	λ_{ex}	λ_{ca}	Ecart (%)	$\rho_{\text{ex}}C_{\text{ex}}$	$\rho_{\text{ex}}C_{\text{ca}}$	Ecart (%)
Latérite	20	5.39	4.19	22	1.03	1.04	0.96	2265	2063	9.92
	15	5.18	4.87	5.98	0.87	1.01	13	1949	1872	3.95
	10	4.6	3.82	16	0.79	0.89	11	2484	2111	15
Latérite + pouzzol.	20	4.01	3.79	5.49	0.56	0.62	9.68	1803	1664	7.71
	15	3.83	3.85	0.52	0.49	0.60	18	1777	1705	4.05
	10	3.74	3.71	0.80	0.46	0.58	20	1842	1718	6.73
Latérite + sciure	20	3.03	4.92	38	0.46	0.44	4.35	1134	1305	13
	15	2.61	4.26	38	0.43	0.38	5.56	1299	1490	12
	10	2.34	4.33	45	0.36	0.34	5.56	1278	1365	6.37

Damfeu (2017) a étudié les propriétés thermiques de la brique de pouzzolane noires et rouges. Le tableau 1.12 indique les valeurs de conductivité thermique obtenues, bien meilleures (environ 68% en moyenne) par rapport à celles de brique de parpaing de sable.

Tableau I-12: Conductivité thermique intrinsèque des agrégats granulaires de pouzzolane noire et rouge, Damfeu 2017

agré	D (mm)	Modèle	Modèle	Modèle	Modèle
		Parallèle λ_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Maxwell λ_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	self-consistent λ_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Bruggerman λ_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)
PZN	1	0,315	0,379	0,468	0,248
	0,8	0,314	0,358	0,495	0,252
	0,4	0,323	0,358	0,472	0,262
	0,2	0,327	0,368	0,474	0,275
PZR	1	0,256	0,308	0,465	0,202
	0,8	0,272	0,313	0,442	0,218
	0,4	0,282	0,315	0,426	0,228
	0,2	0,210	0,342	0,450	0,252

Samri, (2008), a étudié trois matériaux poreux : le béton cellulaire autoclavé, le béton de chanvre et la brique de terre cuite à perforations verticales. Le béton cellulaire autoclavé est un matériau minéral fabriqué exclusivement à partir des matières premières naturelles et résulte d'un mélange d'eau, de sable, de chaux, de ciment et d'air. Lors du processus d'autoclavage, des microcellules d'air sont créées, il présente alors une porosité fermée très importante. Pour ce qui concerne les propriétés mécaniques de ces matériaux, la résistance en compression se situe autour de 3 MPa, cette résistance augmente avec la masse volumique. Par contre les bétons de chanvre possèdent des propriétés mécaniques faibles (résistance en compression variant de 0,35 MPa à 0,80 MPa) ce qui est en accord avec les travaux de Assangwing [Assangwing, (2010)], par rapport au béton autoclavé. Ceci montre qu'on ne peut pas l'utiliser comme élément porteur à haut niveau, en revanche, les fortes déformations que ce béton est capable de supporter le rend intéressant comme matériau de remplissage.

Bilong et al., (2009), ont étudié les possibilités d'amélioration des propriétés physiques et mécaniques des briques de latérite avec incorporation de la pouzzolane, de la chaux industrielle et l'argile thermiquement activé (Thermally Activated Clay (TAC)) à 750°C. Des investigations effectuées dans ses études, il arrive aux conclusions selon lesquelles, l'augmentation du pourcentage de chaux dans les briques de terre augmente la résistance à la compression du produit final et fait décroître légèrement la densité apparente et le taux d'absorption d'eau.

Nguyen, (2010) a étudié l'influence de la nature du liant sur les propriétés du béton de chanvre (aggloméré de chènevotte et d'un liant à base de chaux). Il a examiné les propriétés du liant employé qui est un mélange de chaux aérienne, de chaux hydraulique et de pouzzolane commercialisé sous le nom de Tradical PF70. Il a obtenu des résistances en compression variant entre 0,1 MPa et 2,9 MPa en fonction des compositions et de la nature du granulats.

Mbessa et al., (2011) ont étudié l'influence de la pouzzolane naturelle de Djoungo (région Littoral du Cameroun) sur les propriétés mécaniques de quelques géobétons. Ils sont arrivés à la conclusion que la substitution de moins de 25% de poudre de pouzzolane (granulométrie inférieure à 80µm) en lieu et place du ciment CPJ 35 dans un géobéton n'est plus envisageable comme béton pour une structure porteuse.

Bessennouci, (2010) a montré que l'ajout de fibre de palmier (Beni saff-Algérie) dans la composition de béton conduit à la formation d'un béton léger ayant une résistance mécanique

qui respecte les normes de génie civil et présente de bonne performance thermique. Mais dans son étude il ne donne aucune information sur la manière dont les propriétés thermiques ont été déterminées.

b) Sur l'aspect de la caractérisation acoustique

De nombreux travaux ont été réalisés dans le cadre de la caractérisation acoustique des matériaux. On peut, sans être exhaustif citer :

Koizumi et al., (2002) démontrent que la fibre de bambou présente des bonnes caractéristiques d'absorption du son. Elle (fibre de bambou) possède des propriétés acoustiques équivalentes à celles de la laine de verre (97% à 1000 Hz, 98% à 4kHz), qui croît tant en basse, moyenne qu'en haute fréquence avec l'épaisseur, et en moyenne et haute fréquence avec la densité telle que le montre la figure I-24.

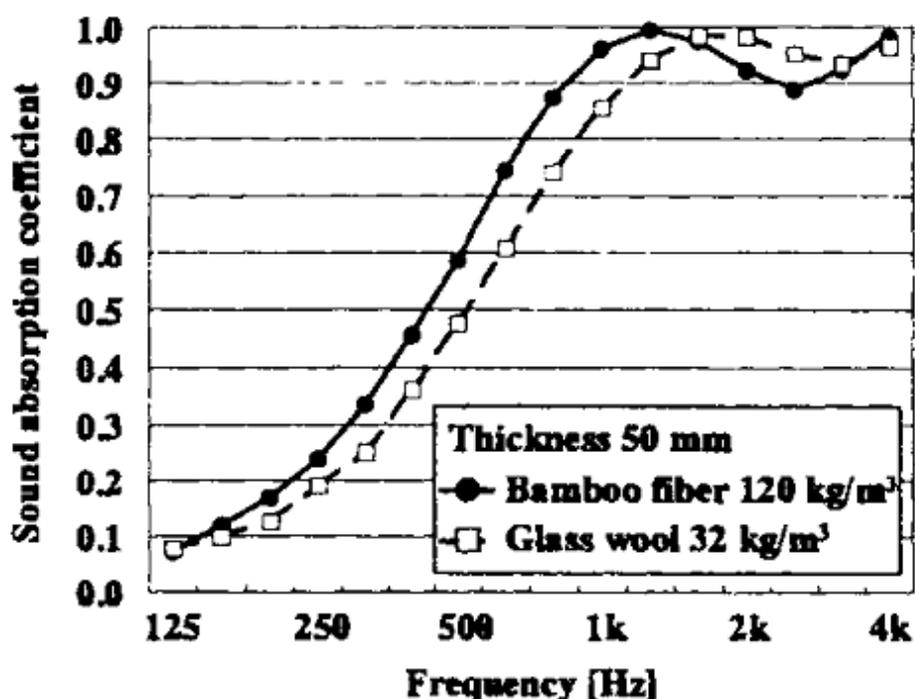


Figure I-24. Comparaison du coefficient d'absorption de la fibre de bambou et de la laine de verre (Koizumi et al., 2002)

Berardi et Iannace, (2015), dans leurs travaux sur la caractérisation acoustique des fibres naturelles pour les applications d'absorption ont démontré que les fibres de bois naturel présentent des valeurs élevées d'absorption du son tant à basse fréquence, 500 Hz (89% à 650 Hz qu'à moyenne fréquence supérieure à 1650 Hz (environ 98%) cf. figure I-25.

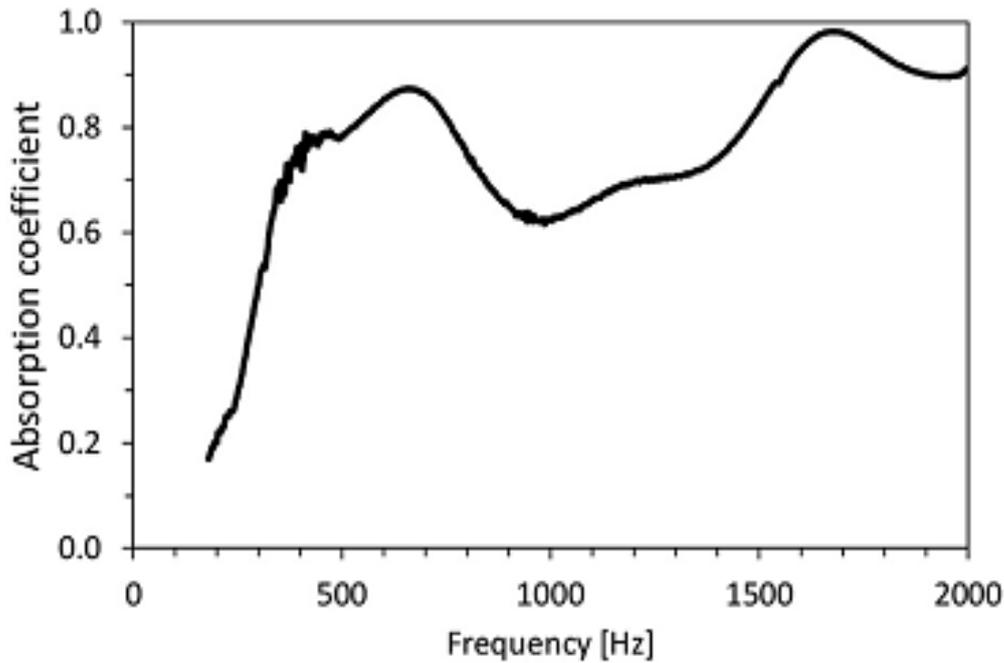


Figure I-25. Coefficient absorption des fibres de bois pur de 6 cm d'épaisseur

Asdrubali et al., (2015), ont présenté une revue de l'étude acoustique des matériaux isolants non conventionnels pour les constructions durables parmi lesquels le roseau qui présente de très bonnes performances d'absorption acoustique telles que le montre la figure I-26.

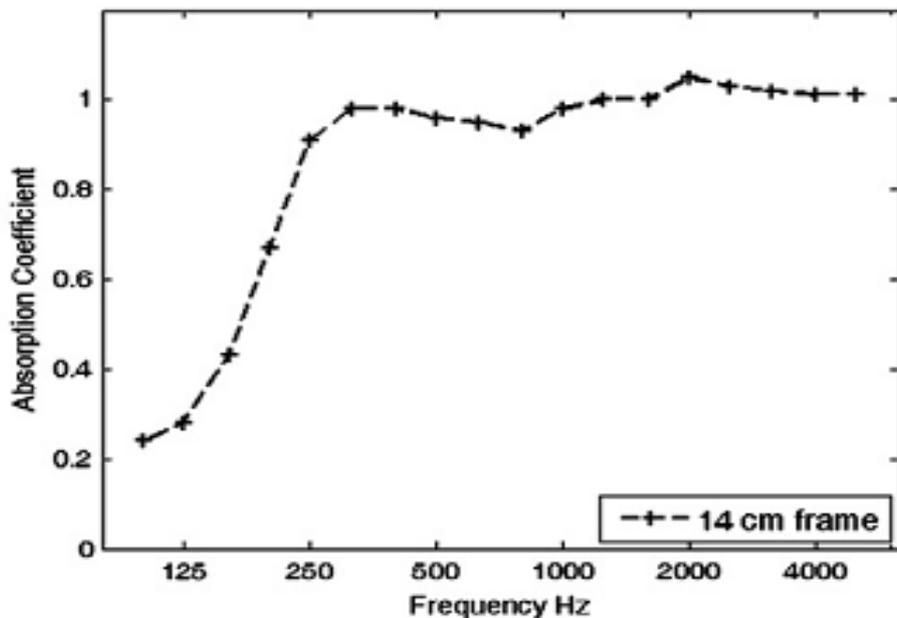


Figure I-26. Coefficient absorption d'un échantillon de 14 cm d'épaisseur d'un panneau de roseau, (Asdrubali et al., 2015)

Romina et al., (2017), en faisant une comparaison entre les coefficients d'absorption acoustique en champ diffus des échantillons de laine de mouton (S1-S7), de la laine minérale, de la mousse de polyuréthane recyclée et des fibres de polyester, ont pu montrer, comme on peut le voir sur la tableau 1-13 ci-dessous, que les échantillons de laine de mouton ont une capacité d'absorption acoustique identique, voire même supérieure, pour les échantillons S2, S5 et S6, à celle de la laine minérale ou de la mousse de polyuréthane recyclée et des fibres de polyester.

Tableau I-13 : Taux d'absorption acoustique mesuré selon la norme ISO 11654 des échantillons S1-S7 de laine de mouton, laine minérale, de la mousse de polyuréthane recyclée et des fibres de polyester.

Sample	α_w (11654:1958)	Absorption Class
S1	0.75	C
S2	0.80	B
S3	0.75	C
S4	0.75	C
S5	0.85	B
S6	0.80	B
S7	0.75	C
Mineral Wool	0.65	C
Recycled Foam	0.65	C
PET	0.70	C

CONCLUSION

Dans ce chapitre, il était question de passer en revue l'exploration des potentialités des matériaux locaux au Cameroun. Cette revue a permis non seulement de faire un recensement de la richesse des matériaux disponibles localement, mais aussi, de parcourir certains travaux déjà menés, du point de vue de la caractérisation thermophysique, mécanique ou acoustique desdits matériaux. Nous avons beaucoup plus insisté sur les matériaux terre et bambou compte tenu de qu'ils seront les principaux constituants du matériau poto-poto, objet de nos travaux dans le cadre de cette thèse.

Que ce soit les techniques d'usage impliquant la terre crue (pisé, bauge, torchis, brique de terre moulée, brique de terre comprimée), le bambou, la pierre naturelle, le bois d'œuvre, les fibres naturelles, le sable, nous avons ainsi présenté (sans être exhaustif) séparément ces différents matériaux en relevant les caractéristiques de certains ou en présentant les propriétés mécaniques des autres. Les voies alternatives aux matériaux conventionnels semblent désormais s'agrandir dans ces différents aspects thermophysique, mécanique ou acoustique, d'autant plus qu'ils font partie de plus en plus des thématiques de recherche plus ou moins développées actuellement.

Si on peut se féliciter de ces avancées scientifiques sur les propriétés physiques de la terre et du bambou, il reste tout de même que très peu de travaux ont été consacrés à l'étude des propriétés thermophysiques, mécaniques et acoustiques d'un matériau constitué des deux à la fois à l'exemple du poto-poto, d'où l'intérêt de notre travail sur la caractérisation de ce matériau répandu au Cameroun.

Dans le chapitre qui va suivre, nous allons faire la présentation des matériaux, des dispositifs expérimentaux ainsi que des modélisations nécessaires pour la caractérisation du poto-poto.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

INTRODUCTION

Dans le premier chapitre de ce travail, nous avons d'une part, recensé la richesse des matériaux disponibles localement, et parcouru certains travaux déjà menés dans la perspective de caractérisation desdits matériaux. Le poto-poto qui fait l'objet de notre étude étant constitué de la terre et du bambou, deux matériaux dont les propriétés ont été présentées dans le chapitre 1, nous allons nous appesantir dans ce chapitre sur la démarche qui sera mise en œuvre pour sa caractérisation en partant des matériaux utilisés. La méthodologie d'identification du matériau terre, les dispositifs expérimentaux ainsi que les outils mathématiques qui ont servi pour cette caractérisation seront présentés. Cette démarche sera axée à la fois sur des essais réalisés en laboratoire ayant permis une identification géotechnique partielle ou complète de nos échantillons, des essais mécaniques réalisés pour la vérification des normes de génie civil de nos échantillons, la formulation des différents échantillons et les protocoles y afférents.

Par ailleurs, la présentation des différentes méthodes de caractérisation : thermophysique pour la détermination des paramètres E , λ et ρC_p , et acoustique pour la détermination des coefficients d'absorption acoustique du poto-poto, fera également l'objet du présent chapitre.

2.1. Matériaux et protocole de confection des éprouvettes

2.1.1. Matériaux

A) La terre

Dans le cadre de notre travail, le matériau terre présenté sur la figure II-1 ci-dessous provient d'un massif argileux prélevé dans la ville Yaoundé (Cameroun) sur le site d'Etetak dans l'arrondissement de Yaoundé 2.

Pour les travaux de caractérisation thermophysique et mécanique, les différents échantillons remaniés et représentatifs des sites ont été prélevés suivant les recommandations de la norme NF EN 932-1 (1996). Les quantités utilisées pour les essais en laboratoires ou prises d'essai ont été prélevées par quartage, à partir des grands échantillons représentatifs des matériaux suivant la norme NF EN 932-2 (1999).



Figure II-1. Terre prélevée

i) Analyse granulométrique optimale du matériau terre

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse granulométrique et une étude de la consistance du matériau terre suivant la Norme Camerounaise pour BTC : NC 102-114, 2002-2006. Le but de cette analyse granulométrique est de déterminer les propriétés physique et géotechnique dans la perspective de l'utilisation de notre matériau dans le remplissage de l'enveloppe d'un bâtiment. Sa courbe de texture indiquée à la figure II-2, montre qu'elle est légèrement hors de son fuseau granulaire.

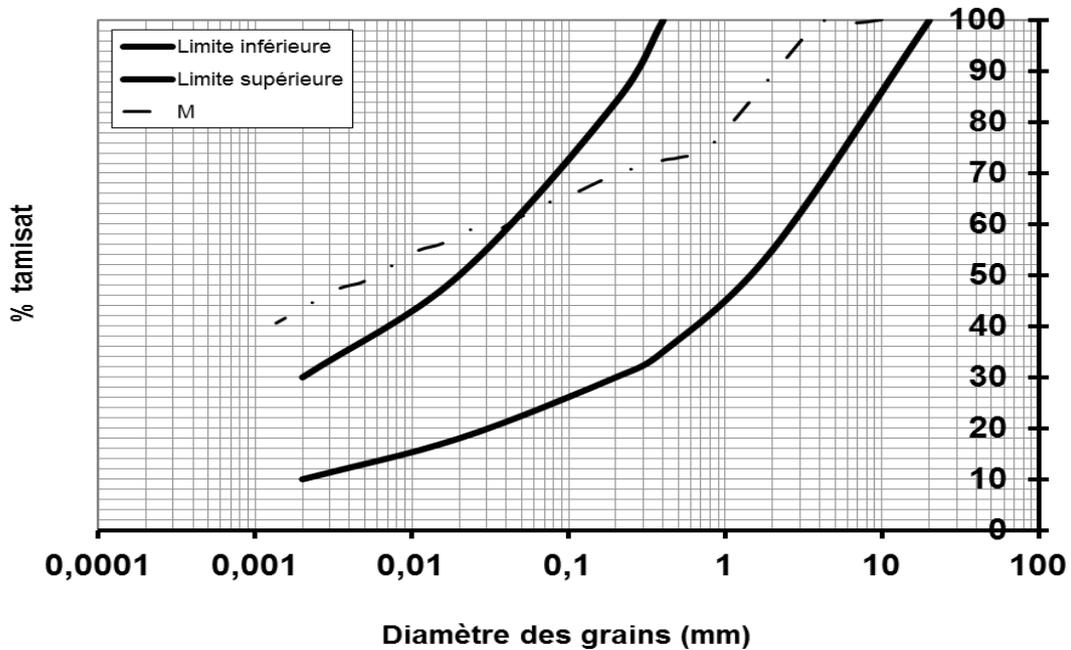


Figure II-2. Diagramme de texture de notre matériau terre

ii) Représentation graphique des résultats du tamisage

Les points de mesure sont représentés dans un système d'axes semi-logarithmique et relié éventuellement entre eux par des segments de droite : sur l'axe des abscisses, une échelle logarithmique à base 10 représentant la dimension des ouvertures des tamis à maille carrée, en ordonnée, le pourcentage pondéral des tamisat cumulés. La figure II-3 présente la courbe d'analyse granulométrique.

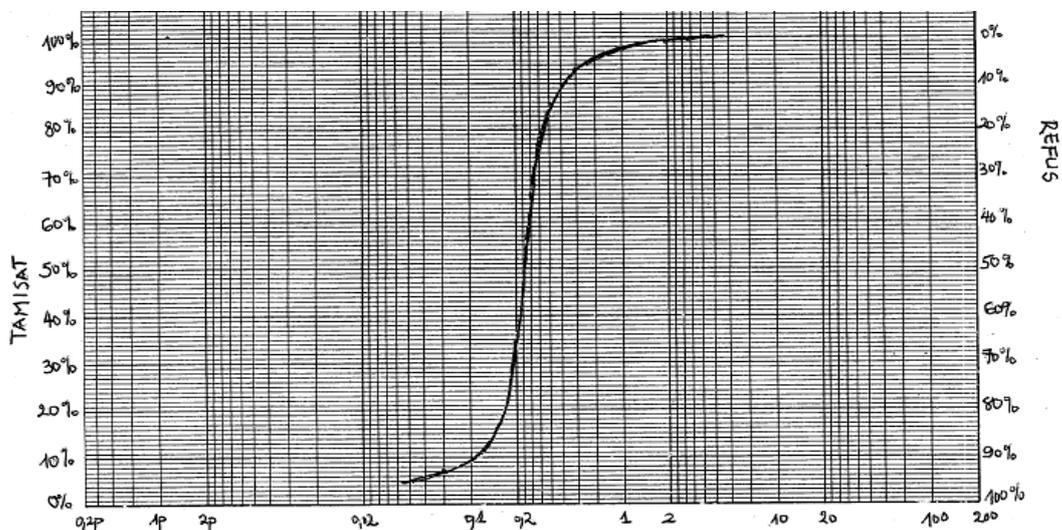


Figure II-3. Courbe d'analyse granulométrique

Les résultats de la synthèse granulométrique de cette terre sont présentés dans le tableau II-1.

Tableau II-1. Analyse granulométrique et consistance du matériau terre

Synthèse granulométrique					
Couleur	Aspect	% de graviers $\Phi > 2mm$	% de sable $2 \geq \Phi \geq 0,2mm$	% de limons $0,02 \geq \Phi \geq 0,002mm$	% d'argile $\Phi \leq 0,02mm$
Rouge	Argileux	10,75	30,53	18,27	40,45
Limite de consistance (%) (limite d'Atterberg)					
Limite de liquidité		58,87			
Limite de plasticité		31,84			
Indice de plasticité		27,03			
Poids spécifique		2,542			
Teneur en eau naturelle (%)		30,20			
Essai proctor					
Teneur en eau optimal		17,5			
Densité optimal		1,633			

Au vu des résultats du tableau II-1, cette terre a un taux d'argile de 40,45%, ce qui est largement au-dessus de la limite recommandée par la norme camerounaise NC 102-114 (*Bilong et al., 2009*) pour les briques de terre comprimé qui est de 30%. Ceci peut se justifier, dans la mesure où sa courbe de texture (figure 2-2) n'est pas totalement dans le fuseau granulométrique. Ceci montre déjà que l'utilisation, de cette terre nécessite l'ajout des adjuvants dans le but de le solidifier davantage. Son indice de plasticité de 16% est conforme à la norme pour l'utilisation d'un matériau de remplissage en génie civil ($2\% < I_p < 30\%$), notons néanmoins que sa valeur relativement éloignée de 30%, est déjà un indicateur que cette terre est peu flexible, elle aura donc tendance à se rompre rapidement si elle est soumise à des fortes contraintes en flexion. L'utilisation de cette terre à l'état brut peut être recommandable dans les zones tropicales sèches.

A) Les fibres de bambous de chine

Après prélèvement, le bambou a été séché à une température de 105°C, ensuite à l'aide d'un couteau nous avons défibré à des dimensions respectives selon chaque essai à réaliser : 2 mm d'épaisseur et 15 cm de longueur pour les essais de flexion et du module d'élasticité ; 2 cm d'épaisseur et 3 cm de longueur pour les essais de compression. Avant leur malaxage dans la terre sèche, les fibres de bambou ont été au préalable pré-mouillées afin de neutraliser leur pouvoir absorbant pour éviter les fissurations des éprouvettes à réaliser comme l'indique la figure II-4.



Figure II-4. Fibres de bambou : a) tige de bambou, b) bambou défibré, c) fibre de bambou immergées

2.1.2. Protocole de confection des éprouvettes pour la caractérisation thermophysique et mécanique

Pour la confection des éprouvettes en vue de l'étude des propriétés thermophysiques (cf. figure 2-5), nous avons considéré les caractéristiques de la terre telle que présentées au tableau 2-2 ci-dessous. Nous avons alors réalisé un malaxage préalable de la terre fine et de l'eau pour une bonne intrusion de la pâte. Les lamelles de bambous (respectivement avec les dimensions requises selon l'essai à réaliser) ont ensuite été pré mouillées avant leur introduction dans le mélange sec. Trois types de moules métalliques de forme parallélépipédique (largeur, hauteur, longueur) ont alors été utilisés: 4cmx4cmx16cm (Norme Française Cratère NFP 31-21222,23) pour les essais de flexion, un autre de forme carré 4cmx4cmx4cm (Norme NFP 98-33522,23) pour les essais de compression et 10cmx10cmx4cm pour les essais thermiques.

Une fois les briques confectionnées comme on peut les voir à la figure II-3, elles sont maintenues à la cure pendant 7 jours. Les éprouvettes sont enfin conservées avant démoulage à la température $< 25^{\circ}\text{C}$.

Les compositions des échantillons sont dans le tableau II-2 ci-dessous :

Tableau II-2. Paramètres des différents agrégats utilisés pour le moulage des échantillons de caractérisation mécanique.

	Essai Thermophysique			Essai en compression			Essai en flexion		
	10cmx10 cmx4 cm			4cmx4cmx4cm			4cmx4cmx16cm		
% fibres	m_b (g)	m_T (g)	m_e (g)	m_b (g)	m_T (g)	m_e (g)	m_b (g)	m_T (g)	m_e (g)
0	0	600	135	0	150	33,75	0	500	112,5
2%	12	588	132,3	3	147	33,075	10	490	110,25
4%	24	576	129,6	6	144	32,4	20	480	108
6%	36	564	126,9	9	141	31,725	30	470	105,75

m_b : masse de bambou, m_T : masse de terre, m_e : masse d'eau

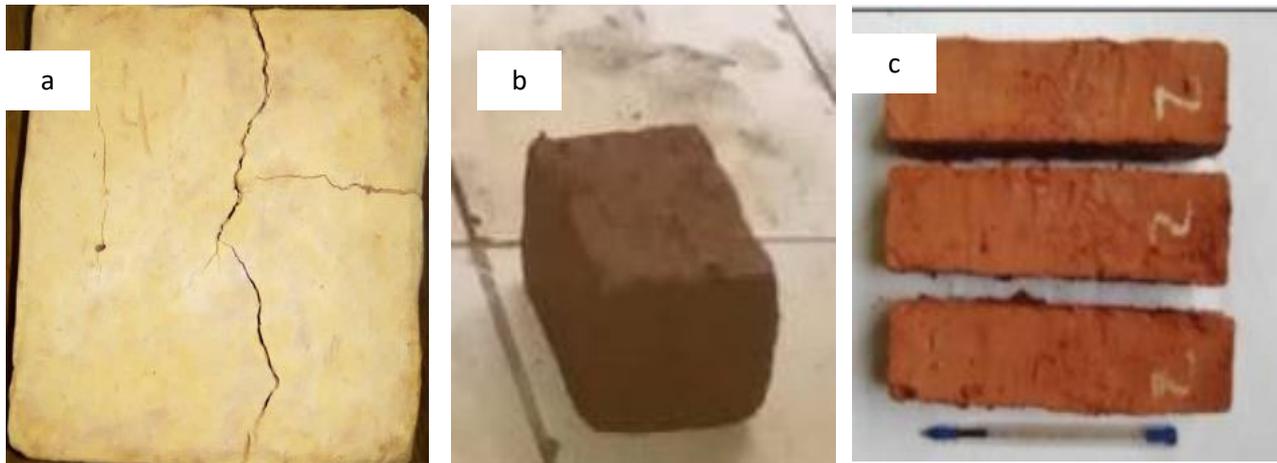


Figure II-5. Epreuves pour les essais : a) pour caractérisation thermophysique b) pour essais de compression c) pour essai de flexion.

La confection des différentes éprouvettes que présente la figure II-5 a obéit au protocole ci-dessous en cinq étapes :

i) Prélèvement puis séchage de la terre

Le matériau terre présenté sur la figure II-6 ci-dessous provient d'un massif argileux prélevé dans la ville Yaoundé (Cameroun) sur le site d'Etetak dans l'arrondissement de Yaoundé II comme mentionné plus haut.



Figure II-6. Terre prélevée et séchée

ii) Préparation des fibres de bambou

Le bambou est séché et découpé en morceaux. Il est ensuite fendu et défibré à une épaisseur inférieure à 2 mm et sectionner à 9,5 cm de long comme indiqué sur la figure II-7.



Figure II-7. Bambou sec défibré

Après cette étape de la préparation des matériaux, on procède à la confection des moules qui faciliteront le moulage et le démoulage de nos éprouvettes. Ainsi, un moule pour les éprouvettes de 3cm (Ep3) en acier de dimension de 10 cm x 10 cm x 3 cm, ouvert sur les deux faces inférieure et supérieure, et un autre moule pour éprouvette 5 cm (Ep5) en acier de dimension 10 cm x 10 cm x 5 cm ouvert sur les deux faces inférieure et supérieure ont été confectionnés. La figure II-8 illustre une vue d'un moule Ep5.



Figure II-8. Moule en acier Ep5 de dimension 10 cm x 10 cm x 5 cm

iii) Fabrication des éprouvettes proprement dites

a) Eprouvettes pour la caractérisation thermophysique

La confection des éprouvettes pour la caractérisation thermophysique est décrite sur le schéma de la figure II-9 ci-dessous.

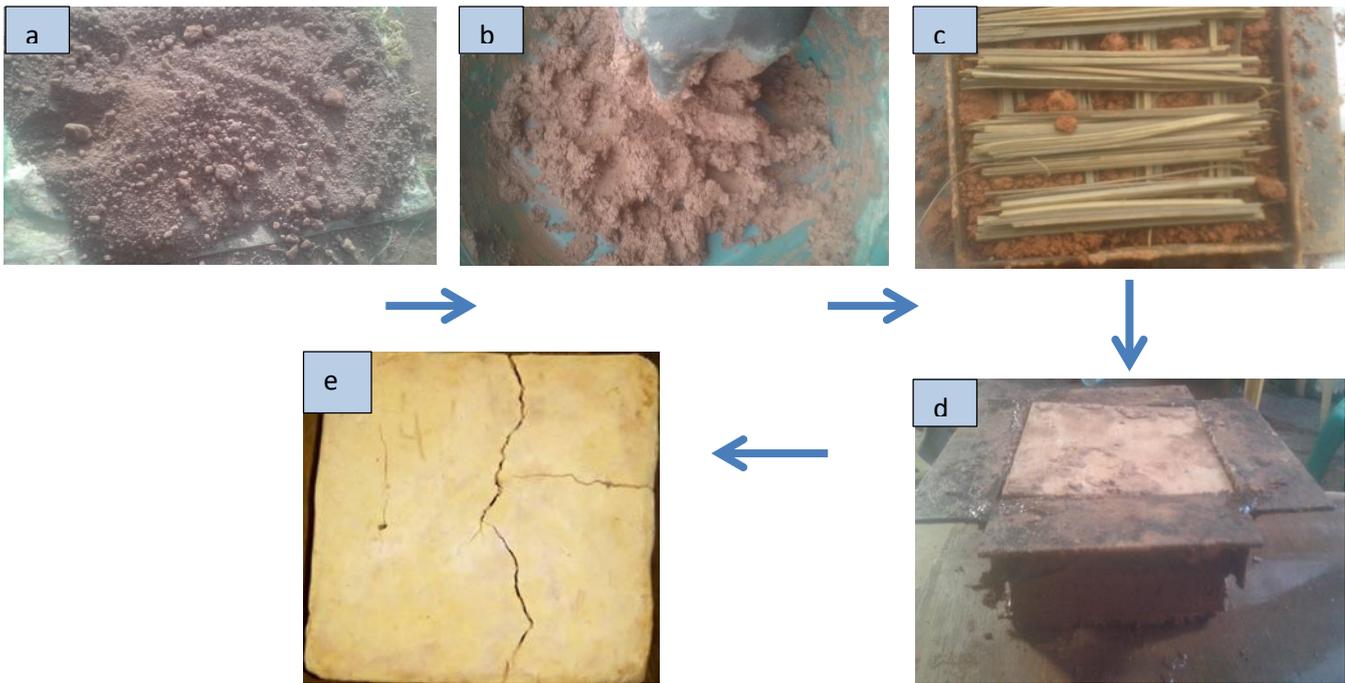


Figure II-9. Etapes de préparation des éprouvettes de poto-poto pour la caractérisation thermophysique : a) Terre prélevée puis séchée, b) humidification et broyage, c) ajout des fibres de bambou, d) formulation et moulage, e) démoulage et séchage.

En ce qui concerne la caractérisation acoustique, le bambou est séché et découpé en morceaux. Il est ensuite fendu et défibré à une épaisseur d'environ ± 1 mm et sectionner en longueur en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette (3 cm, 4 cm et 5 cm de long). Pour ce qui est des moules, nous les avons confectionnés de forme cylindrique du fait de la forme du porte échantillon sur le dispositif expérimental.

Ainsi, trois types de moule cylindrique en acier de 30 mm de diamètre ont été conçus dont l'image est présentée par la figure II-10.

- ✓ un moule cylindrique pour les éprouvettes de 3 cm (Ep3) de longueur;
- ✓ un moule cylindrique pour les éprouvettes de 4 cm (Ep4) de longueur;
- ✓ un moule cylindrique pour les éprouvettes de 5 cm (Ep5) de longueur.



Figure II-10. Moule cylindrique pour la confection des éprouvettes de poto-poto pour la caractérisation acoustique

b) Eprouvettes pour la caractérisation acoustique

La confection des échantillons pour la caractérisation acoustique est décrite sur le schéma de la figure II-11 ci-dessous.

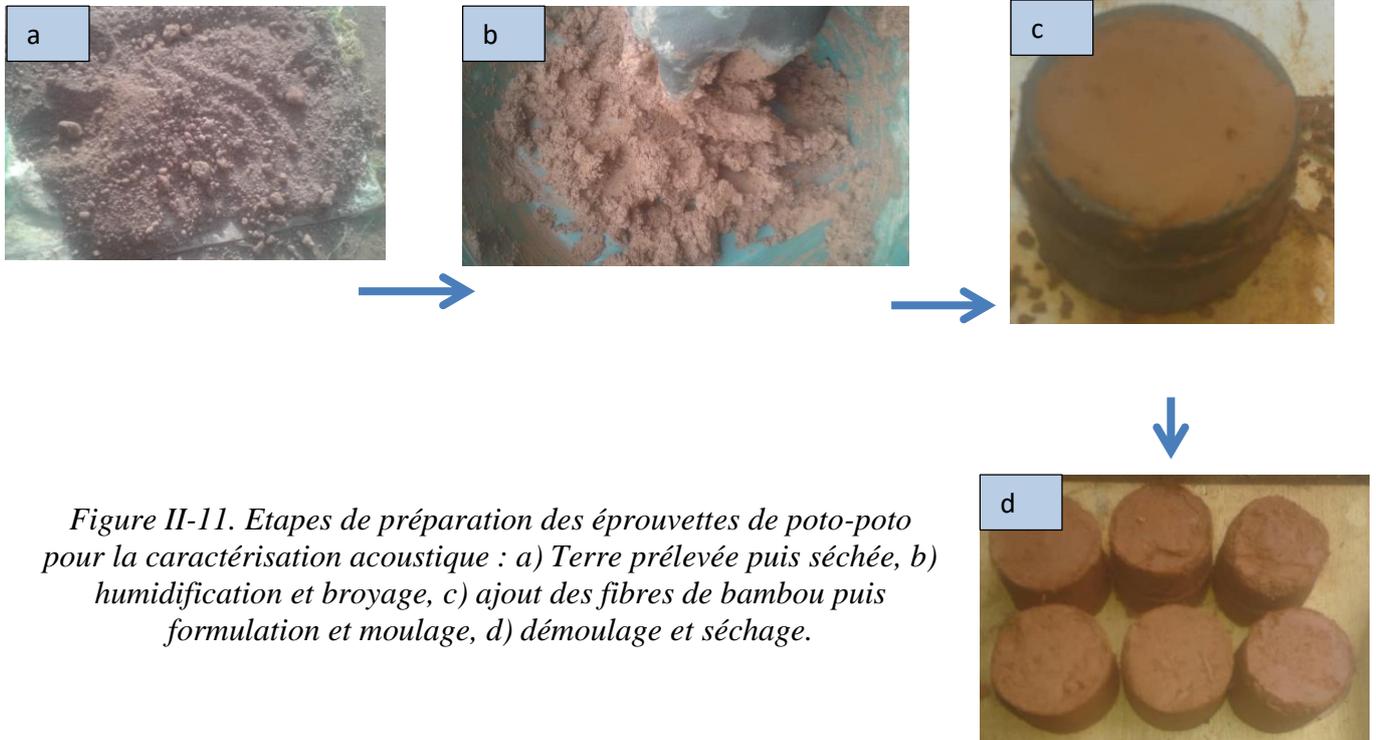


Figure II-11. Etapes de préparation des échantillons de potopoto pour la caractérisation acoustique : a) Terre prélevée puis séchée, b) humidification et broyage, c) ajout des fibres de bambou puis formulation et moulage, d) démoulage et séchage.

iv) Mode opératoire

Le matériau terre est étalé et séché au soleil pendant 48 heures jusqu'à la masse constante. Ensuite on prélève une masse (M) de ce matériau séché et on l'humidifie à un taux de 46,36% puis on le malaxe à la main pendant 10 à 15 minutes pour une meilleure homogénéisation de la pâte. La pâte étant devenue homogène, en mesurer 600 g pour le moule (Ep3) et 850 g pour le moule (Ep5) pour façonner les échantillons de 0% de bambou.

Les échantillons de 2%, 4% et 6% de bambou sont façonnés sur la base de la masse totale Ep3 et Ep5 à 0%.

Pour le faire, peser 300 g de matériaux humide pour l'échantillon Ep3 et 450 g de matériau pour Ep5 et mettre dans les différents moules. Tasser à la main et introduire les fibres de bambou entrecroisées en fonction des différents pourcentages. Ensuite compléter la seconde moitié du matériau humidifié dans le moule tout en tassant progressivement jusqu'à remplissage.

Pour démouler, placer la plaque de contreplaqué sur la partie supérieure du moule avec les deux pouces du doigt. Exercer une force verticale en tirant le moule vers le haut jusqu'à la libération complète de l'échantillon.

Sécher les différents échantillons à l'ombre à une température ambiante de 25°C pendant 24 heures pour éviter le choc thermique. Enfin exposer à l'air libre pendant la période ensoleillée pendant 36 heures au moins selon les dimensions des échantillons.

2.2. Méthodologie d'identification

2.2.1. Caractérisation des Constituants

Les essais ont été effectués successivement dans les laboratoires du B.I.G (Bureau d'Investigations Géotechniques), de la MIPROMALO (Mission de Promotion des Matériaux Locaux) et de géotechnique de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé.

➤ Formulation : Pourcentage massique des constituants.

Afin de déterminer quelles sont les quantités massiques à mettre en œuvre pour les différents échantillons des essais, nous avons estimé les pourcentages massiques des intrants de l'échantillon à savoir le bambou et la terre.

L'échantillon considéré pour cette évaluation est composé d'un pavé de terre de $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ armé avec des fibres bambou de section $1 \times 0.5 \text{ cm}^2$. L'espacement et l'agencement des fibres sont présentés par la figure II-12.

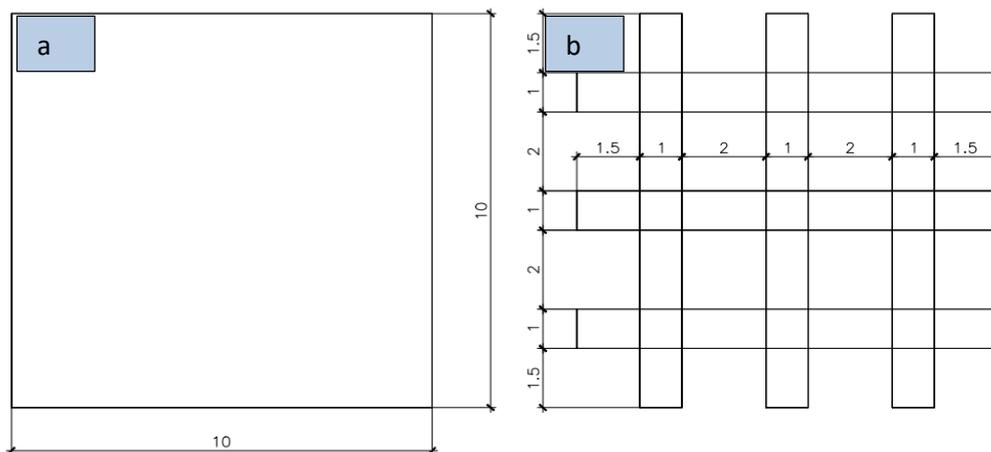


Figure II-12. a. Pavé de terre $10 \times 10 \times 5$ b. Disposition des fibres de bambous

➤ Calcul du pourcentage massique des fibres de bambou dans l'échantillon.

La formule exploitée pour cette caractéristique est la suivante :

$$\%m_b = m_b / m_{terr}$$

or $m = \rho V$, ce qui nous donne : $\%m_b = \rho_b V_b / \rho_{terr} V_{terr}$

En prenant $\rho_b = 640 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{terr} = 1500 \text{ kg/m}^3$ pour des volumes respectifs de 30 cm^3 et 500 cm^3 , l'on trouve : $\%m_b = 2.56\%$.

Dans le cadre de cette recherche et en accord avec le laboratoire BIG, nous avons trouvé intéressant de faire varier ce pourcentage entre 2-6%.

i) Essai de Teneur en Eau naturelle (NF P94-050)

La teneur en eau d'un matériau constitue la fraction d'eau présente dans une masse solide donnée de ce dernier. Il est important de préciser que nous avons réalisé cet essai sur le matériau terre de l'échantillon.

✓ But de l'essai

Le but de cet essai est de connaître exactement quelle quantité d'eau se trouve dans le matériau à son prélèvement sur le terrain car lorsqu'un échantillon est prélevé sur le site, il contient naturellement une certaine quantité d'eau. D'où cet essai qui lui est dédié. La teneur en eau naturelle (W_{nat}) est donc le rapport entre la masse d'eau (m_e) présente dans le matériau et la masse du matériau à sec (m_s) après séchage dans une étuve (figure II-13).

$$W_{nat} = \frac{m_e}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

La valeur obtenue correspond à la teneur en eau naturelle. En multipliant par 100, on l'obtient en pourcentage. La marge d'arrondi est de 0.1. Pour le cadre de notre matériau, nous avons obtenu une teneur en eau naturelle de l'échantillon de 30.2%.



Figure II-13. Une étuve permettant de sécher les échantillons présentes dans les tares

ii) Essai d'analyse granulométrique (Norme NF P94-056)

Le premier test réalisé en laboratoire est l'essai granulométrique. Pour celui-ci, la terre sera simplement passée dans plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, superposés par ordre d'ouverture décroissant. On pourra ainsi déterminer les différents éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles) et leur quantité respective en pesant après dessiccation les différents refus des tamis. Avec les résultats obtenus, on peut tracer sur un diagramme la courbe granulométrique de la terre. On notera la grosseur des grains en abscisse et le pourcentage des tamisats cumulés en ordonnée, exprimant « la proportion en poids par rapport au poids de l'échantillon sec, de grains dont la grosseur est inférieure à la grosseur portée en abscisse » (Doat et al., 1979).

Les résultats de la synthèse granulométrique de la terre utilisée pour nos éprouvettes sont présentés dans le tableau II-1 plus haut.

iii) Essai de poids spécifique (NF P94-054)

Le poids volumique γ_s des particules solides d'un sol est le quotient du poids de ses grains solides w_s au volume v_s qu'elles occupent soit :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.2)$$

✓ But de l'essai

Le but de cet essai est de déterminer la masse réelle ou absolue d'un matériau à l'exclusion des vides et de l'eau (figure II-14).

L'échantillon du sol est séché à l'étuve, puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides. Le poids spécifique de particules solides est le rapport du poids de sol testé au volume du liquide déplacé.

✓ Mode opératoire :

- étuver le matériau pendant 24h à 105°C ;
- étaler le matériau sur une pailleuse ou sur une plaque en marbre table et effectuer le quartage (partage en quatre parties égales) ;
- peser les pycnomètres vides avec leur bouchons w_1 ;
- introduire délicatement à l'aide de la spatule la prise d'essai dans les pycnomètres dont on a nettoyé les surfaces extérieures et faire un relevé des masses w_2 ;
- les pycnomètres sont ensuite remplis à moitié d'eau déminéralisée maintenue à la température ambiante ;
- agiter les pycnomètres pour immerger toutes les particules de sol ;
- si de petites bulles subsistent au fond des pycnomètres, agiter les pendant quelques minutes pour les dégazer complètement ;
- laisser immerger pendant 24h pour permettre une absorption maximale de l'eau par les grains ;
- compléter le volume restant des pycnomètres avec de l'eau distillée jusqu'à débordement ;
- les pycnomètres sont nettoyés et pesés (w_3) ;
- vider, nettoyer et remplir d'eau distillée chaque pycnomètre jusqu'au repère des bouchons, l'ensemble une fois essuyé est pesé (w_4).



Figure II-14. Réalisation de l'essai de poids volumique.

✓ Expression des résultats

Le poids volumique des particules solides est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\gamma_s = \gamma_w \cdot \frac{W_1 - W_2}{W_4 + W_2 - W_1 - W_3} \quad (2.3),$$

avec :

γ_s : poids spécifique du sol ;

γ_w : densité de l'eau à la température lue ;

w_1 : poids du pycnomètre à vide ;

w_2 : poids du pycnomètre contenant la prise d'essai ;

w_3 : poids du pycnomètre contenant l'eau et le sol ; w_4 : poids du pycnomètre rempli d'eau.

La valeur du poids volumique des particules solides γ_s est la moyenne arithmétique de deux mesures effectuées sur le même matériau.

iv) Essai de détermination des Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Les limites d'Atterberg définissent les limites entre les différents états de consistance pour la partie du sol passant à travers un tamis de 0,4mm. On retrouve les états suivants : état de dispersion, état liquide, état plastique, état solide avec retrait et finalement, état solide sans retrait.

Entre l'état liquide et l'état plastique, on retrouve la limite de liquidité W_l . Celle-ci se mesure à l'aide de l'appareil de Cassangre (figure II-15 a). La terre contenant une certaine teneur en eau est étalée dans une coupelle et est divisée en 2 par une rainure de minimum 4cm de long et 1cm de large. Cette coupelle est ensuite soumise à un certain nombre de chutes de 1cm de hauteur sur une surface dure. Lorsque la rainure se referme sur une longueur de 1cm, le nombre de coups total est comptabilisé et mis en rapport avec la teneur en eau. Une droite d'évolution est tracée pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité correspond à la teneur en eau lorsque 25 coups ont dû être appliqués pour refermer la rainure sur 1cm.

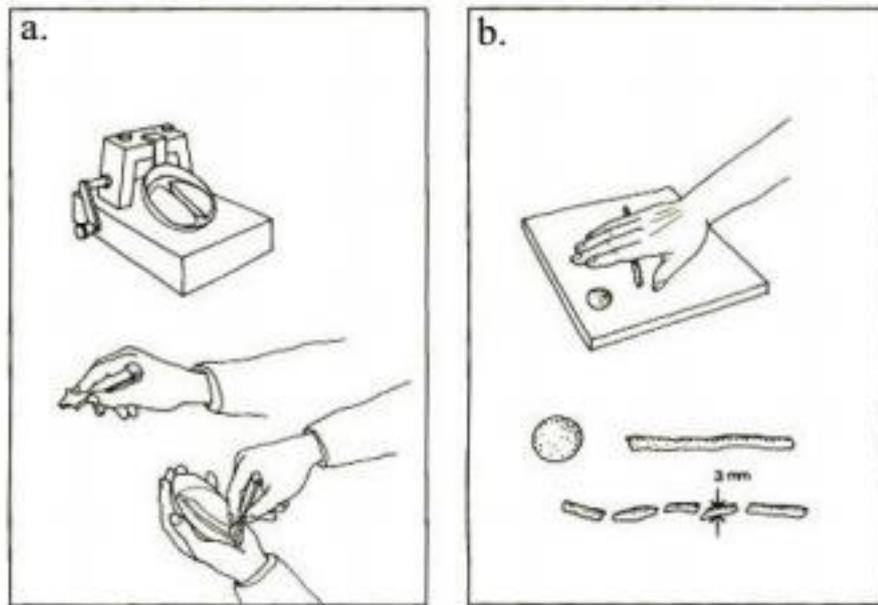


Figure II-15. Limite d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre

Entre l'état plastique et l'état solide, on retrouve la limite de plasticité W_p . Elle correspond à la teneur en eau que contient un petit boudin de terre de 3mm de diamètre lorsqu'il se rompt en morceau (Figure II-15b). Avec la limite de liquidité et la limite de plasticité, on peut calculer l'indice de plasticité I_p du sol, équivalent à $I_p = W_l - W_p$. Si le résultat est compris entre 5 et 10, la plasticité est faible. S'il se situe entre 10 et 20, la plasticité est moyenne et si le résultat est supérieur à 20, la plasticité est forte. La limite de retrait se situe entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait. Elle correspond à la teneur en eau qu'il ne faut pas dépasser pour que le volume reste constant, c'est-à-dire la teneur en eau limite à laquelle tous les grains sont encore en contact. La limite d'absorption W_a correspond quant à elle à la teneur en eau maximale qui peut pénétrer dans la terre. Si cette dernière limite est inférieure à la limite de retrait, le matériau se trouve à l'abri du gonflement, ce qui est préférable pour la construction. Afin d'avoir une idée du gonflement et du retrait du sol, il faut calculer le coefficient d'activité C_a qui est le rapport entre I_p et le pourcentage de grains inférieurs à $2\mu m$:

$$C_a = \frac{I_p}{\% \text{argiles}(\Phi < 2\mu m)} \quad (2.4)$$

v) Essai Proctor

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale (T.E.O.) de compactage. Cette teneur en eau est celle qui permet d'assurer un enrobage de chaque grain du sol afin qu'ils puissent se réarranger de la façon la plus compacte possible. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre. L'interprétation des résultats obtenus est la suivante : « si la masse volumique sèche obtenue à la T.E.O. est comprise entre 1650 et 1760 kg/m³, le résultat est assez médiocre, entre 1760 et 2100 kg/m³, le résultat est très satisfaisant, le matériau assez argileux. Entre 2100 et 2200 kg/m³, le résultat est excellent, le matériau riche en gros éléments. Entre 2200 et 2400 kg/m³, le résultat est exceptionnel » (Doat et al., 1979). La T.E.O. peut également être estimée rapidement sur chantier. Pour cela, il suffit de laisser tomber sur une surface dure une boule de terre d'une hauteur de 1,10m. Si celle-ci se décompose en 4 ou 5 morceaux, c'est que la teneur

en eau est correcte. Par contre, si elle s'aplatit sans se désagréger, c'est qu'elle contient trop d'eau et si elle s'émiette, c'est qu'elle en contient trop peu (Doat *et al.*, 1979).

Il existe deux (02) types d'essai Proctor : essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié dont les caractéristiques essentielles pour les types de compactages sont celle présentes dans le tableau 2-3.

Tableau II-3. caractéristiques essentielles pour les types de compactages

CARACTERISTIQUES	ESSAI PROCTOR NORMAL	ESSAI PROCTOR MODIFIE
Poids de la dame	2.49 kg	4.538 kg
Hauteur de chute	30.5 cm	45.7 cm
Nombre de couches	3	5
Nombre de coups	25	55

MOULE A UTILISER	DIMENSIONS DES MOULES	NOMBRE DE COUPS
Moule Proctor ⁴	H=11.5cm, Q=10.2cm	25
Moule C.B.R ⁵	H=11.5cm, Q=15cm	55

De manière pratique, on réalise successivement 5 essais dans le but de déterminer les coordonnées des 5 points d'essais. Pour notre cas, nous avons réalisé 4 essais pour 4 points d'essais, car nous avons constaté qu'au 4^e point, on a la confirmation de la chute de la courbe.

A partir des résultats du tableau, on trace la courbe d'équation $\gamma_d = f(\omega)$ sur laquelle on détermine un maximum correspondant à la teneur en eau optimale (ω_{opt}).

Le compactage consiste à fournir au matériau une énergie mécanique par l'intermédiaire d'un compacteur ou d'une dame pour l'essai Proctor. En effet, pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau ω d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec γ_d en fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui représente un optimum Proctor. Quand l'on a :

- ❖ $\omega < \omega_{opt}$: l'eau en quantité faible joue un rôle de lubrifiant non négligeable et de ce fait la densité augmente ; le nombre de contact grain-grain étant maximal à $\omega = \omega_{opt}$.
- ❖ $\omega > \omega_{opt}$: le sol commence à se saturer d'eau. Il commence à se former autour des grains solides des ménisques d'eau dont le volume augmente avec la teneur en eau. Cette couche d'eau libre limite le nombre de contact grain-grain d'où une diminution progressive de la densité.

Les calculs de la teneur en eau, de la densité humide et de la densité sèche se font suivants les équations suivantes :

⁴ Un moule Proctor qui est constitué d'un cylindre métallique de diamètre intérieur égale à 101,6 mm et de hauteur 117mm

⁵ Un moule "C.B.R." qui est constitué d'un cylindre métallique de diamètre intérieur égal A 152 mm et de hauteur égale à 152 mm

$$\text{Teneur en Eau (W\%)} \quad W\% = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids matériau sec}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$$\text{Densité Humide } (\gamma_h) \quad \gamma_h = \frac{\text{poids du matériau humide}}{\text{volume du moule}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

$$\text{Densité sèche } (\gamma_d) \quad \gamma_d = \frac{\text{densité humide} \cdot 100}{W\% + 100} \quad (2.7)$$

Les travaux du Laboratoire de Travaux Publics du Cameroun (LTPC) de Yaoundé rapporté par Ottou (1987), présentent dans le tableau 2-4 l'importance de la teneur en eau sur le compactage.

Tableau II-4: Qualité du compactage en fonction de la teneur en eau du moulage

Teneur en eau du moulage en fonction de l'O.P.M	Qualité de compactage en pourcentage de l'O.P.M
L'O.P.M	Compactage impossible ; les grains ne peuvent glisser les uns sur les autres
L'O.P.M + 3%	80 à 92%
L'O.P.M + 5%	79 à 85%
L'O.P.M + 8%	84 à 96%
L'O.P.M + 10 à 17%	72 à 88%

O.P.M : Optimum PROCTOR Modifié

vi) ESSAIS MECANIQUES

✓ Essai Module de Plasticité

a) Essai en flexion

Le principe de cet essai consiste à appliquer un effort de flexion à une éprouvette comme l'indique la figure II-16. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'échantillon. On mesure simultanément les contraintes de déformation au cours de l'essai.



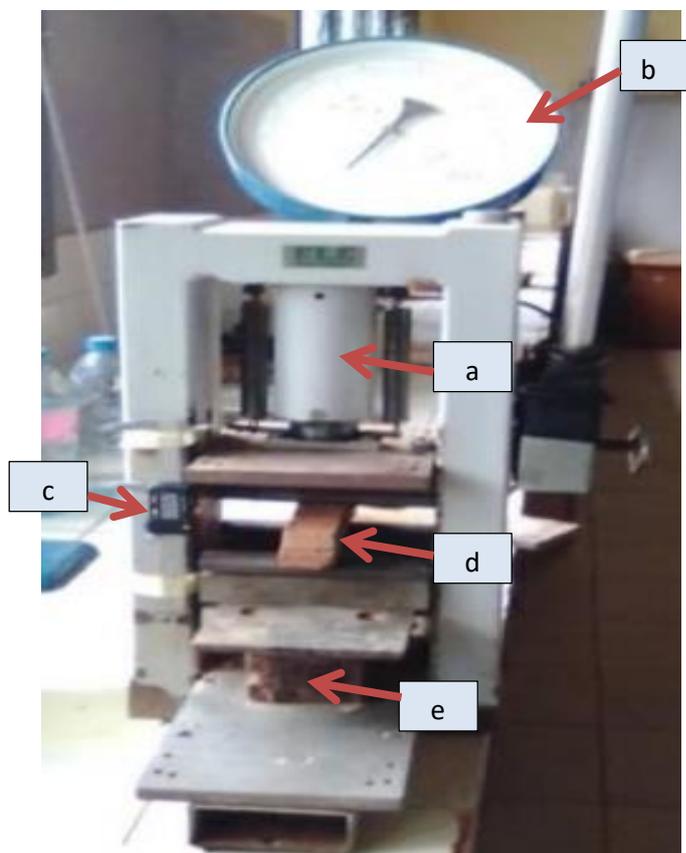
Figure II-16. Eprouvette d'échantillon soumise à l'essai de flexion

Les normes :

- ARS681 : 1996 BTC définie les contraintes de capture,
- EN2562 (10% et 50%) et EN2746 (10% et 25%) définissent la déformation.

Le dispositif expérimental est celui de la figure II-17. Il s'agit d'une presse hydraulique de marque « Elle internationale » type à vitesse constante et faible comprenant :

- Un plateau fixé composé de deux barres parallèles ;
- Un plateau mobile composé d'une barre centrée ;
- Un système hydraulique ;
- Un indicateur d'effort (cadrant de 0-50KN) ;
- Un indicateur de déformation numérique en millimètre.



*Figure II-17. Presse hydraulique pour l'essai de flexion :
a) système hydraulique, b) indicateur d'effort (cadrant de 0-50KN), c) indicateur de déformation numérique, d) échantillon, e) plateau mobile composé d'une barre centrée.*

Les éprouvettes de dimension $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (figure II-18) ont été confectionnées en respectant les différents pourcentages de fibres de bambou (0%, 2%, 4% et 6%) avec une terre au préalable étudiée avec un taux d'humidité de 18% d'eau.

Les éprouvettes sont conditionnées au minimum pendant 07 jours à $\pm 24^\circ \text{C}$ de température au sein du laboratoire, les essais ont été également réalisés dans les mêmes conditions de température.



Figure II-18. Eprouvettes de dimension 4x4x16cm pour l'essai de flexion

Calcul et expression des résultats

Nous avons déterminé la résistance à la flexion en MPa par la formule de l'équation (2.8),

$$R_f = \frac{3FD}{2Lh^2} \quad (2.8),$$

avec :

- F : la charge de l'éprouvette en flexion, mesurée par la machine CONTROLS.CAT No T1004, Mat No3558,
- D = 50mm la distance des appuis cylindriques,
- 2L = 80mm la longueur du bloc,
- h=20mm l'épaisseur moyen du bloc,

La connaissance de la résistance de flexion va nous permettre de déterminer le module d'Young par la relation :

$$E = \frac{R_f}{\varepsilon} \text{ avec } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.9),$$

où ε est la déformation ; L_0 : longueur initiale ; ΔL (d) : allongement.

b) Essai en compression (ARS681 : 1996 BTC) (NC 114, 2002-2006)

La compression est la charge provoquée par l'action de deux forces égales et opposées agissant sur une même ligne parallèle à l'axe de l'élément et tendant à la raccourcir. Le dispositif expérimental est indiqué par la figure II-19.

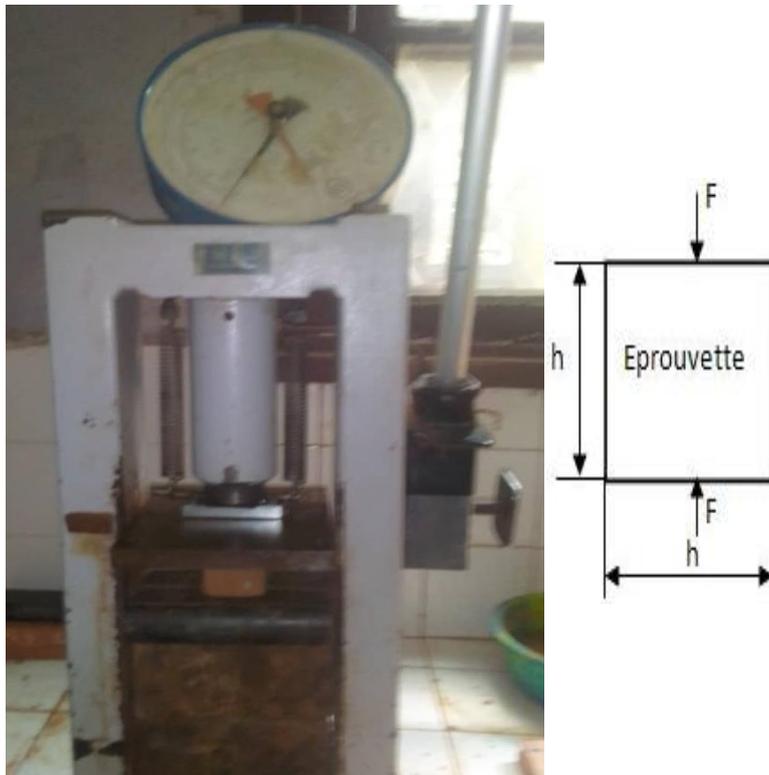


Figure II-19. Dispositif expérimental en compression

La valeur de la résistance à la compression de nos éprouvettes a été obtenue à partir de la formule :

$$R_f = \frac{F}{l^2} \quad (2.10),$$

avec F : charge de rupture à la compression, mesurée en lecture en montée par la machine CONTROLS N° de l'anneau 4117, $F_{\max}=30000\text{N}$).

c) Mesure de la porosité [NC 114, 2002-2006]

La porosité d'un matériau est traduite par le rapport du volume des vides (V_V) sur le volume total (V_T) (Castany, 1982). L'évaluation de la porosité de nos éprouvettes s'est faite de la manière suivante :

- dans un premier temps, les éprouvettes ont été saturées d'eau par immersion pour obtenir les masses humides par pesées. Ensuite, elles ont été séchées puis repesées pour obtenir les masses sèches afin d'en déduire l'absorption d'eau (abs).
- Dans un second temps, nous avons déterminé les densités des éprouvettes en faisant le rapport de la masse sèche par le volume de l'échantillon.

Connaissant ces deux paramètres (absorption d'eau (abs) et densité (ρ)), la porosité a été déterminée à travers la formule (NC 114, 2002-2006):

$$\phi = \rho abs \quad (2.11),$$

avec $abs = \frac{m_h - m_s}{m_s}$, m_h étant la masse humide et m_s la masse sèche.

Après la présentation et description de ces différents dispositifs expérimentaux, nous allons à présent faire une présentation des modélisations mathématiques devant permettre la résolution du problème.

2.3.Outils et modélisation

2.3.1. Outils et méthode de caractérisation thermophysique et mécanique

La recherche fondamentale s'attèle à optimiser du point de vue consommation énergétique les matériaux locaux, matériaux dont on peut améliorer le pouvoir d'isolation thermique en y ajoutant des agrégats qui peuvent être de nature végétales voire organiques.

Les enjeux qui en découlent sont d'avoir un matériau dont on a connaissance des principales caractéristiques : mécaniques, thermophysiques, hydriques et qui respectent les normes environnementales liées au secteur du bâtiment. La connaissance des caractéristiques thermophysiques (conductivité thermique, effusivité thermique, diffusivité thermique, chaleur massique) des matériaux est donc essentielle car, elles permettent de décrire le comportement des matériaux soumis à des transferts thermiques mais aussi leur capacité à stocker de la chaleur.

Par ailleurs, la détermination de ces caractéristiques thermophysiques passe par la maîtrise des techniques d'estimations de certains paramètres. Ces techniques d'estimations ont connu plusieurs progrès, notamment suite à l'optimisation des systèmes et programmes informatiques, au développement de nouvelles méthodes capables de représenter avec bonne précision les divers processus de transferts thermiques (conduction ; convection ; rayonnement ; changement de phase...).

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les méthodes de mesure des propriétés de transport dans les milieux poreux.

Tout d'abord, nous présentons les méthodes de détermination quadripolaire des propriétés thermophysiques associées aux équations qui en découlent, ensuite, nous nous intéressons aux différentes méthodes en régime permanent et en régime transitoire qui permettent la caractérisation d'un milieu consolidé.

2.3.1.1. Modélisation par les quadripôles thermiques

a) La méthode des quadripôles thermiques

La méthode des quadripôles thermiques est une méthode analytique et explicite de modélisation des systèmes linéaires 1D. Elle est utilisée pour la résolution de nombreux problèmes linéaires, mais est beaucoup plus appliquée pour la résolution des problèmes de transfert de chaleur et de masse. Dans sa forme la plus simple, il s'agit de relier linéairement un vecteur composé de transformées de la température et du flux de chaleur sur une surface du milieu considérée à la même quantité sur une autre surface par l'intermédiaire d'une matrice 2×2 appelée matrice de transfert qui constituent ainsi le quadripôle relatif du milieu considéré. Batsale et al (*Batsale, 1994*) a montré la possibilité d'étendre cette méthode à des problèmes 2D et 3D. Ceci implique alors une transformation de Laplace sur le temps :

$$\theta(x, y, z, p) = \int_0^{\infty} T(x, y, z, t) \exp(-pt) dt. \quad (2.11),$$

et une transformation intégrale de type Fourier-cosinus ou sinus sur une ou deux nouvelles variables selon que le problème soit en 2D ou 3D. Dans le cas d'une surface isotherme (Batsale, 1994), on applique une transformation de Fourier en sinus.

$$\tau(\alpha, z, p) = \int_0^{\infty} \theta(\alpha, z, p) \sin(\alpha x) dx. \quad (2.12)$$

Dans le cas d'une surface adiabatique (Batsale, 1994), on applique une transformation de Fourier en cosinus.

$$\tau(\alpha, z, p) = \int_0^{\infty} \theta(\alpha, z, p) \cos(\alpha x) dx. \quad (2.13)$$

Pour revenir à l'espace réel, on peut utiliser les tables de transformées de Laplace ou réaliser une inversion numérique soit par :

- la méthode de Stehfest (Kurtnetsov, 2013), la variation de l'élévation de température peut s'écrire:

$$T(0,0,0,t) - T_i = \frac{\ln 2}{t} \sum_{j=1}^N V_j \theta(0,0,0, j \frac{\ln 2}{t}), \quad (2.14)$$

où les V_j sont des constantes de Stehfest évaluées à partir de la relation (2.15) ci-dessous :

$$V_j = (-1)^{\frac{N}{2}+1} \sum_{k=\frac{j+1}{2}}^{\min(j, \frac{N}{2})} \frac{k^{\frac{N}{2}(2k)!}}{(N/2 - k)!(k-1)!(j-k)!(2k-j)!} \quad (2.15)$$

- l'algorithme de De Hoog (De Hoog, 1982), c'est un algorithme d'inversion numérique « puissant » qui utilise la fonction invlap.m écrits en code MATLAB.

b) Quadripôles en géométrie 1D

Considérons l'exemple simple d'un mur homogène isotrope de dimension latérale L et d'épaisseur e. La conduction de la chaleur dans ce mur est représentée par l'équation (2.16).

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.16)$$

En utilisant la transformée de Laplace (2.11) et en considérant que la température est uniformément égale à zéro à $t=0$, l'équation (2.16) devient :

$$\frac{\partial^2 \theta(x,p)}{\partial x^2} = \frac{1}{a} [p\theta(x,p) - \theta(0,p)] = \frac{p}{a} \theta(x,p) \quad (2.17)$$

où $\theta(x, p)$ est la transformée de Laplace de l'élévation de température $\bar{T}(x, t) = T(x, t) - T_i$, T_i étant la température initiale.

De la même manière, le flux de chaleur monodimensionnel est:

$$\varphi(x, t) = -\lambda S \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Rightarrow \phi(x, p) = -\lambda S \frac{\partial \theta(x, p)}{\partial x} \quad (2.18)$$

où $\phi(x, p)$ est la transformée de Laplace du flux de chaleur $\varphi(x, t)$.

L'utilisation de ces deux équations permet de définir l'équation du mur en régime instationnaire.

$$\begin{aligned} \frac{d\theta(x, p)}{dx} &= -\frac{1}{\lambda S} \phi(x, p) \\ \frac{d\phi(x, p)}{dx} &= -\frac{\lambda S}{a} p \theta(x, p) \end{aligned} \quad (2.19).$$

Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{\lambda S} \\ -\frac{\lambda S}{a} p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} \quad (2.20).$$

En notation simplifiée on a :

$$\frac{d}{dx} \bar{V} = -M \bar{V} \Rightarrow \bar{V}(x, p) = e^{-M \cdot x} \bar{V}(0, p) \quad (2.21).$$

La solution sous forme matricielle s'écrit alors:

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix}_{(x, p)} = \begin{pmatrix} \cosh(qx) & -\frac{\sinh(qx)}{q\lambda S} \\ -\lambda q S \sinh(qx) & \cosh(qx) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix}_{(0, p)} \quad (2.22).$$

En inversant le système, on a:

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix}_{(0, p)} = \begin{pmatrix} \cosh(qx) & \frac{\sinh(qx)}{q\lambda S} \\ \lambda q S \sinh(qx) & \cosh(qx) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix}_{(x, p)} \quad (2.23).$$

En écriture simplifiée, on a:

$$\begin{pmatrix} \theta(0, p) \\ \phi(0, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \theta(e, p) \\ \phi(e, p) \end{pmatrix} \quad (2.24),$$

avec M, la matrice du quadripôle liant l'entrée vectorielle (en $x=0$) à la sortie vectorielle en ($x=e$), $A = \cosh(qx)$, $B = \lambda q S \sinh(qx)$, $C = \frac{\sinh(qx)}{q\lambda S}$, $D = A$.

La figure II-20, montre la représentation matricielle du quadripôle thermique.

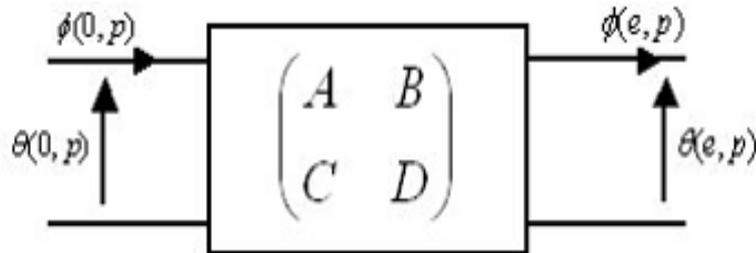


Figure II-20. Quadripôle thermique (Maillet et al., 2000)

L'intérêt pratique de la méthode des quadripôles réside dans le fait qu'on peut résoudre facilement un problème multicouche par une simple mise en cascade des quadripôles reliant le vecteur d'entrée d'un constituant (qui est la sortie de l'autre) à sa sortie (qui est l'entrée du suivant) comme on peut le voir sur la figure II-21 ci-dessous où on a un mur multicouche.

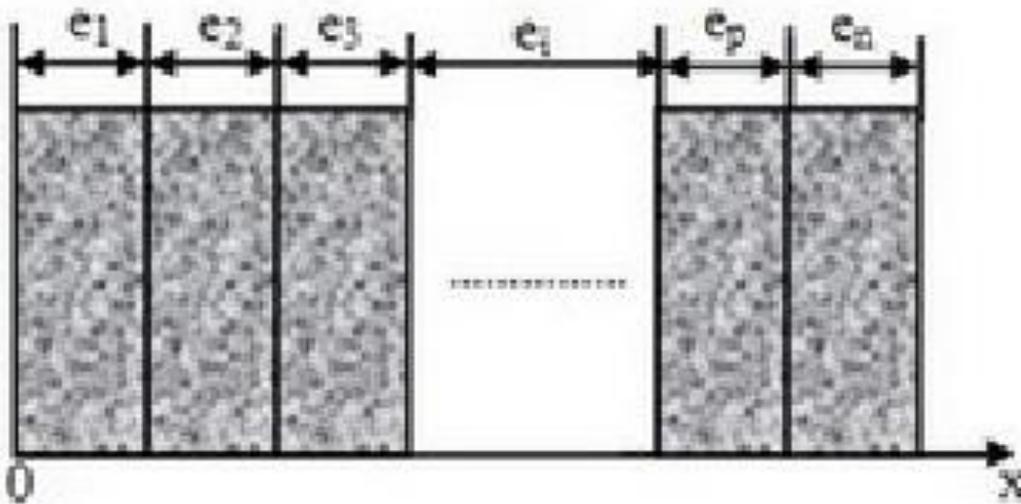


Figure II-21. Mur multicouche, (Damfeu 2017)

La méthode des quadripôles appliquée à ce mur conduit à l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \theta(0, p) \\ \phi(0, p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_0 & C_0 \\ B_0 & D_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 & C_1 \\ B_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} A_i & C_i \\ B_i & D_i \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} A_p & C_p \\ B_p & D_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta(e, p) \\ \phi(e, p) \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

✓ Conditions aux limites

Dans la résolution des problèmes par la méthode des quadripôles, les conditions aux limites peuvent aussi se mettre sous la forme de quadripôles. Une résistance thermique R_{th} , un échange

convectif h ou un flux de chaleur reçue par un système de capacité mc peuvent alors prendre les formes suivantes indiquée sur la figure II-22.

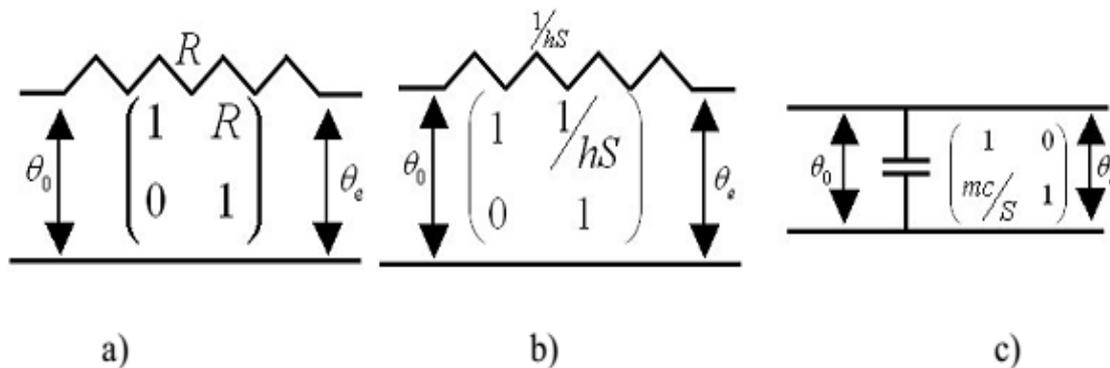


Figure II-22. Quadripôle a) pour une résistance thermique; b) pour un échange convectif; c) pour une capacité calorifique (Maillet et al, 2000)

c) Les principales méthodes de caractérisation thermique

D'une manière générale, la métrologie thermique est la science de la mesure (mesure par contact mécanique, mesure sans contact, mesure des flux, mesure des températures, mesure des coefficients d'échanges) peut se diviser en plusieurs domaines :

- ✓ la métrologie des températures;
- ✓ la métrologie des flux;
- ✓ la métrologie des interfaces;
- ✓ la métrologie des grandeurs thermophysiques.

Dans le cadre du présent travail, nous allons nous limiter à la métrologie des grandeurs thermophysiques. Il s'agira alors pour nous de caractériser à partir des mesures expérimentales de températures, un nouveau matériau en estimant au moyen du choix d'une des techniques, les propriétés thermophysiques de ce dernier.

Parmi les grandeurs thermophysiques à mesurer, nous avons la conductivité thermique, l'effusivité thermique et la capacité thermique volumique.

Plusieurs méthodes de caractérisation existent selon le régime et le type de matériau, permettent d'atteindre plus ou moins rapidement les propriétés thermophysiques recherchées.

Ces méthodes se classent en trois grands groupes à savoir :

- ✓ les méthodes en régime permanent;
- ✓ les méthodes en régime quasi-établi;
- ✓ les méthodes en régime variables.

La démarche commune à toutes ces méthodes consiste dans un premier temps à exciter le matériau thermiquement. En général cette étape s'effectue au moyen des résistances électriques, lampes flash, laser... Ensuite, on s'évertue à enregistrer la réponse en température (et/ou flux) de l'échantillon du matériau à l'aide de thermocouples ou de détecteurs thermiques. En régime permanent, seule la conductivité thermique peut être déterminée, par contre en régime

transitoire, plusieurs paramètres peuvent être identifiés : conductivité thermique, diffusivité thermique, effusivité thermique.

Parmi ces différentes méthodes, les méthodes en régime quasi-établi sont réalisées aux temps longs ($t \rightarrow \infty$) sans tenir compte de la phase transitoire. Contrairement aux méthodes en régime permanent, elles permettent d'évaluer des paramètres comme la capacité thermique volumique, la conductivité thermique, l'effusivité thermique.

Au regard de cette caractéristique, les méthodes en régime quasi-établi vont donc nous intéresser au premier chef dans le cadre de notre travail, car elles nous permettront de déterminer de façon directe les paramètres thermiques recherchés du Poto-poto.

d) Les différentes méthodes de mesures en régime quasi-établi

i. La méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud est aujourd'hui la méthode de référence pour la mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz (Roder, 1981). Initialement, elle a été introduite pour mesurer la conductivité thermique des liquides non conducteurs mais a progressivement été adaptée pour la caractérisation des liquides en général, de gaz et même des solides. Elle a été utilisée ces dernières années par plusieurs auteurs pour caractériser de nombreux matériaux, Anderson (1976), Zhang (1993), Rharbaoui (1994), Coquard (2006).

Pour un échantillon solide, le principe de la mesure consiste à placer un fil chaud entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser (figures II-23 et II-24). Une perturbation thermique vient lui imposer un flux de chaleur constant (échelon de flux). Par des considérations de symétrie, on peut considérer que la direction de propagation de la chaleur est radiale tant que la perturbation n'a pas encore atteint les autres faces de l'échantillon : c'est l'hypothèse du milieu semi-infini.

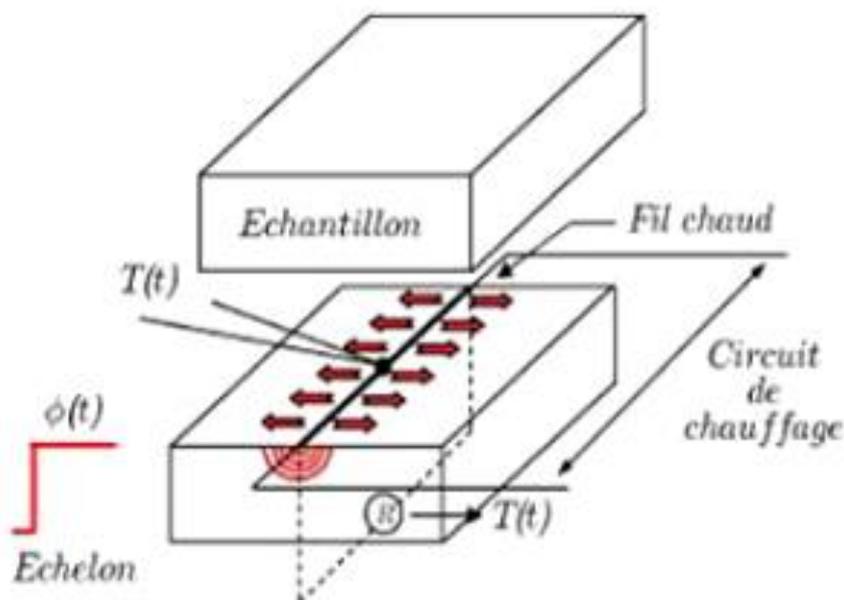


Figure II-23. Dispositif expérimental de la méthode du fil chaud, (Damfeu 2017)

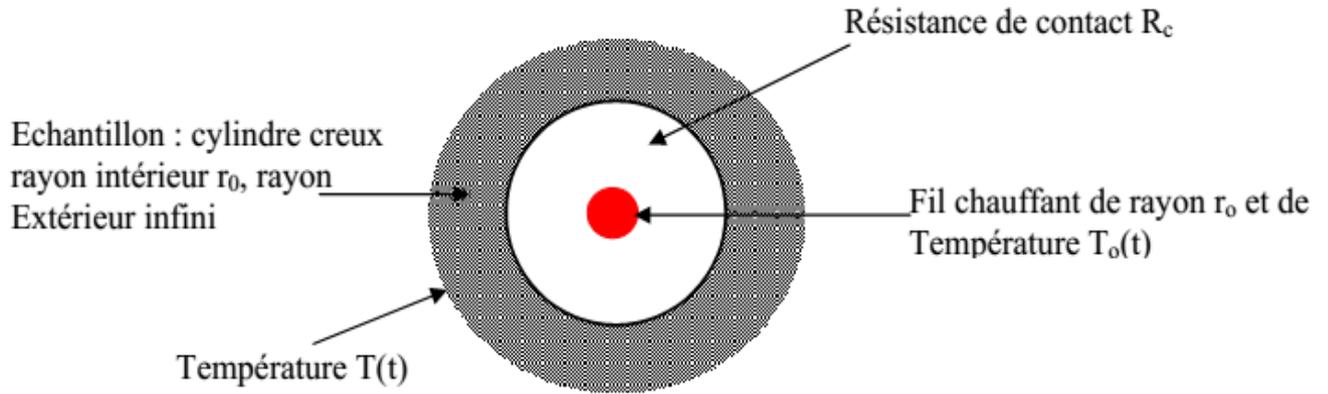


Figure II-24. Dispositif expérimental du fil chaud (vue de face), (Damfeu 2017)

Une modélisation des transferts de chaleur supposés radiaux dans l'échantillon semi infini permet d'obtenir par le formalisme des quadripôles (Maillet et al, 2000).

$$\begin{pmatrix} \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & C \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ 2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr)} \end{pmatrix} = M_1 M_2 M_3 \quad (2.26),$$

$$A=1, B = \frac{1}{2\pi\lambda L q r_0} \frac{I_1(qr_0)}{I_0(qr_0)} - \frac{1}{\rho c_s \pi r_0^2 L P}, C = \rho c_s \pi r_0^2 L P, D = \frac{q r_0}{2} \frac{I_1(qr_0)}{I_0(qr_0)},$$

- ✓ M_1 est l'élément représentant le matériau à caractériser ;
- ✓ M_2 est l'élément représentant la résistance de contact à l'interface matériau-résistance chauffante ;
- ✓ M_3 est l'élément représentant le cylindre creux (fil chaud) considéré comme milieu semiinfini ;
- ✓ θ est la transformée de Laplace de l'élévation de température au centre de la résistance chauffante ;
- ✓ Φ est la transformée de Laplace du flux de chaleur dissipée dans le fil ϕ ;
- ✓ r_0 est le rayon du fil chauffant ;
- ✓ L la longueur du fil chauffant ;
- ✓ I, I_0, K_1, K_0 sont les fonctions de Bessel.

La résolution de cette équation matricielle conduit à:

$$\theta_0 = \frac{\phi_0 (A + E(B + AR_c))}{C + E(D + CR_c)} \quad (2.27).$$

Si l'on se place aux temps longs ($p \rightarrow 0$), en faisant un développement limité au premier ordre des fonctions de Bessel, on obtient:

$$A=1, B=0, C=\varphi_s \pi r_0^2 LP, D=1, E=2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)} = -\frac{2\pi\lambda L}{\ln(qr_0)} \quad (2.28).$$

Soit alors:

$$\theta_0(p) = \phi_0 \left(R_c - \frac{1}{4\pi\lambda L} \ln(p) - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} \right) \quad (2.29).$$

Et en utilisant les tables de transformées de Laplace (*Jannot, 2014*), on obtient l'expression de la température au centre de la résistance chauffante dans le cas d'un milieu semi-infini:

$$\Delta T(t) = \frac{\phi_0 S}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi_0 S \left(R_c + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} \right) \quad (2.30).$$

La figure II-25, montre une représentation de la courbes $T=f(\ln(t))$ des températures expérimentales obtenues avec un fil chaud et la courbe obtenue à partir de la relation théorique (2.30). On observe deux régions sur cette courbe.

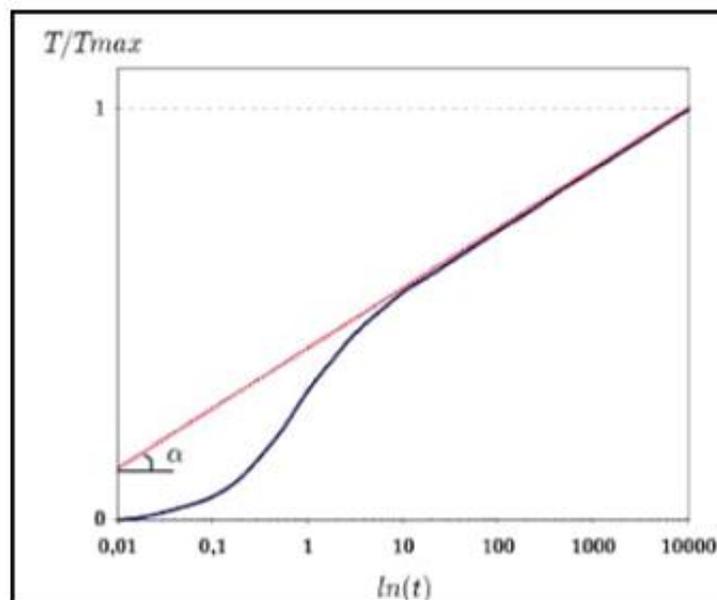


Figure II-25. Thermogramme d'une expérience fil chaud, (*Damfeu 2017*)

Dans la première partie, la température évolue de façon non-linéaire, conséquence de la mise en température du fil (inertie de la sonde). Dans la seconde, partie dite linéaire, c'est elle qui contient l'information exploitable, à savoir la pente de la droite $\Delta T(t) = f(\ln(t))$. Tant que l'hypothèse du milieu semi-infini ($p \rightarrow 0$) sera valide, la pente β de cette courbe se calcule par

régression linéaire par la relation (2.31), et on peut alors déduire la conductivité thermique du matériau à caractériser.

$$\beta(t) = \frac{\phi S}{4\pi\lambda L} \quad (2.31),$$

Avec S : section de la sonde, L : longueur du fil chaud, ϕ : flux de chaleur.

En calculant cette pente par régression linéaire, on obtient la conductivité thermique λ .

L'avantage de cette méthode réside dans le fait que l'inertie de la sonde et de la résistance de contact n'influent pas sur le calcul de la température aux temps longs. Le principal inconvénient est que ce modèle n'est valable que si le matériau est semi-infini, il ne conviendrait donc pas pour la mesure de matériaux de faibles épaisseurs.

d) La méthode du ruban chaud

C'est une méthode développée par Ladevie (1998), Jannot et Meukam (2004). Cette méthode permet de mesurer la conductivité thermique et l'effusivité thermique d'un matériau à partir du même thermogramme. Elle consiste à mesurer l'évolution de la température au centre d'une simple résistance de forme rectangulaire sur lequel on a placé un thermocouple muni de fils fins de faible diamètre. Une illustration est faite à la figure II-26.

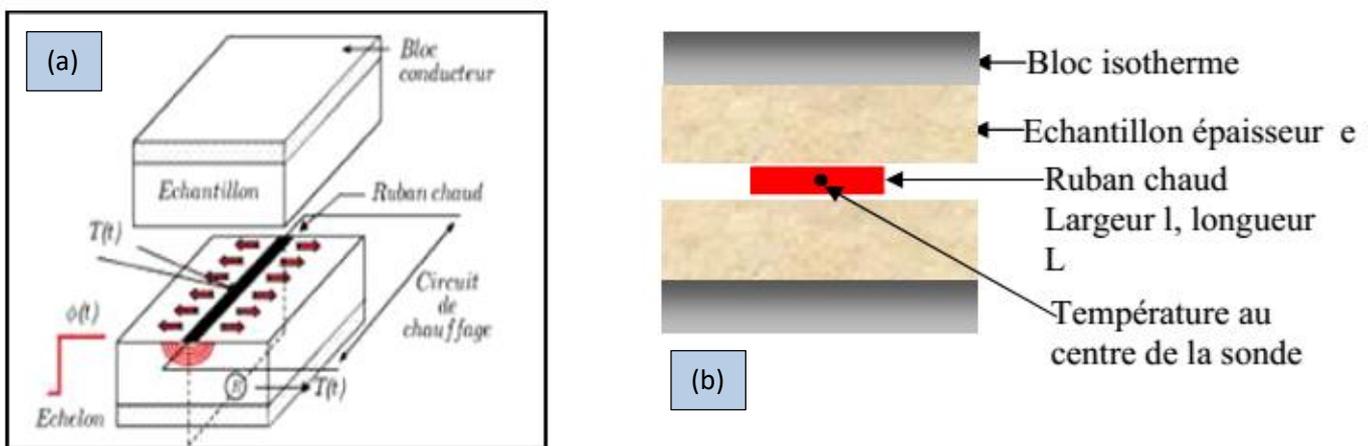


Figure II-26. Dispositif expérimental ruban chaud (a) vue de la surface ; (b) vue en coupe, (Meukam 2004)

Dans le cas du ruban chaud, la sonde est placée entre deux échantillons suffisamment épais pour que le milieu puisse être considéré comme semi-infini. Le rapport longueur sur largeur est choisi de telle manière que le transfert de chaleur au centre de la résistance chauffante puisse être considéré comme bidirectionnel pendant un temps Δt .

On exploite alors le thermogramme ($\Delta T = f(t)$) qui en découle de la manière suivante :

- ✓ pendant tout l'intervalle de temps $(\Delta t)_0$ où le transfert de chaleur au centre du ruban reste unidirectionnel (partie linéaire du thermogramme ($\Delta T = f(t)$), on considère que la température au centre du ruban évolue comme un plan chaud et la relation (2.35) ci-dessous

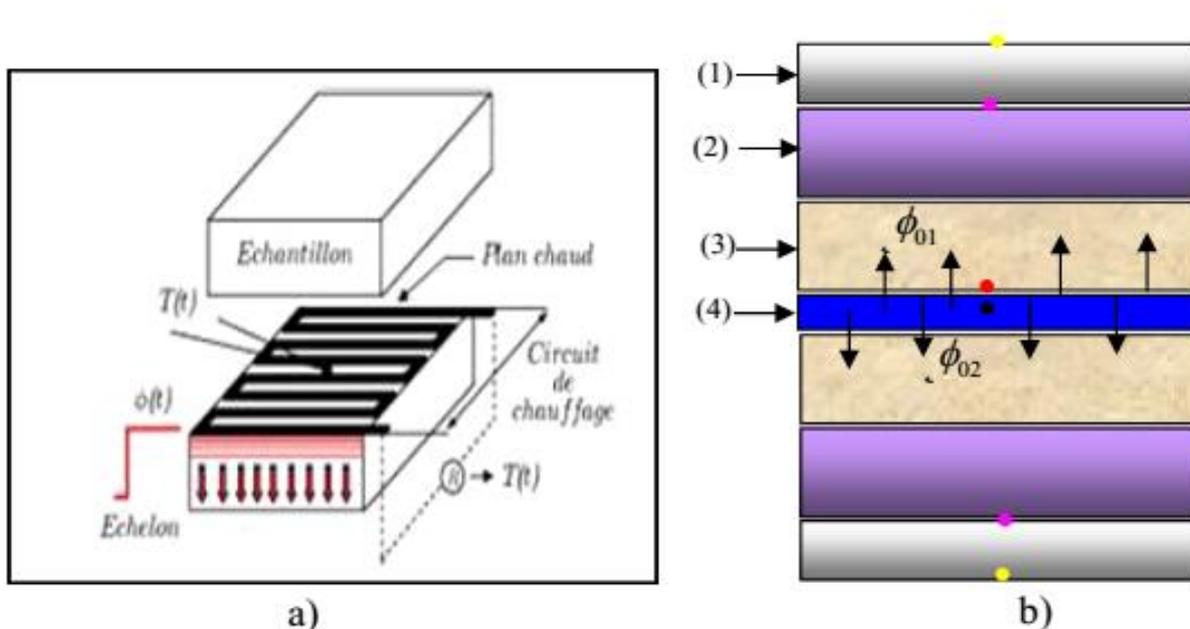
nous permet après évaluation de la pente du graphe ($\Delta T = f(t)$) par régression linéaire d'obtenir l'expression de l'effusivité thermique E du matériau à caractériser;

- ✓ pendant tout l'intervalle de temps $(\Delta t)_2$, où le transfert de chaleur devient bidirectionnel, on suppose que le milieu se comporte comme un fil chaud. On peut donc par évaluation de la pente du graphe ($\Delta T = f(\ln(t))$) sur l'intervalle $(\Delta t)_2$ déduire la valeur de la conductivité thermique du matériau à caractériser.

e) La méthode du plan chaud

La méthode du plan chaud est initialement une technique de mesure de l'effusivité thermique des matériaux en régime transitoire (Jannot *et al*, 2006, 2010). Le dispositif proposé est représenté par la figure II-27.

- Température au centre de la sonde
- Température de la face non chauffée de l'isolant
- Température de la face non chauffée du matériau
- Température de la face chauffée de l'échantillon
- Température initiale du bloc aluminium



Ce dispositif expérimental consiste à utiliser une simple résistance chauffante mince (sonde) insérée entre deux échantillons de surface plane de matériau à caractériser.

La sonde chauffante et l'échantillon ont de préférence la même surface, le but étant de faire l'hypothèse que le transfert de chaleur est unidirectionnel pendant le temps où les pertes latérales convectives sont négligeables. Un premier thermocouple est placé sur la face de la résistance en contact avec l'échantillon. Un deuxième thermocouple peut être placé sur la face

non chauffée de l'échantillon en contact avec l'isolant. L'épaisseur de l'échantillon est choisie de manière à ce que l'hypothèse du milieu semi-infini pour l'échantillon soit vérifiée pendant au moins quelques secondes.

On applique également un échelon de flux thermique et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ au centre de la sonde. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces, on peut considérer que le transfert de chaleur au centre de l'échantillon est unidirectionnel. Une modélisation des transferts de chaleur supposée unidirectionnel dans l'échantillon par la méthode des quadripôles (Maillet *et al*, 2000) permet d'écrire dans l'espace de Laplace :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \phi_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{m_s c_s}{2S} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & R_c S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ E\sqrt{p}\theta \end{pmatrix} \quad (2.32),$$

où :

- θ_0 est la transformée de Laplace de l'élévation de température $T_s(t) - T(0)$;
- ϕ_0 la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur ϕ_0 ;
- E est l'effusivité du matériau à caractériser ;
- $m_s c_s$ est la capacité thermique de la sonde ;
- S est la section de la sonde ;
- R_c est la résistance de contact à l'interface sonde échantillon ;
- p est la variable de Laplace.

On obtient alors dans le cas du milieu semi-infini traduit par l'équation (2.33) suivante :

$$\theta_0(z, p) = \frac{\phi_0}{2EP^{3/2}} + \frac{\phi_0 S}{2P} \left(R_c - \frac{m_s c_s}{2(ES)^2} \right) \quad (2.33).$$

L'utilisation des tables de transformées de Laplace, nous donne l'expression de l'élévation de température $\Delta T(x, t) = T_s(t) - T_s(0) = L^{-1}(\theta_0(x, p))$:

$$T_s(t) - T_s(0) = \frac{\phi_0 S}{2} \left(R_c - \frac{m_s c_s}{2(ES)^2} \right) + \frac{\phi_0}{E\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (2.34).$$

En exploitant de même le thermogramme $\Delta T(t) = f(t)$ dans sa partie linéaire, on trouve la pente:

$$\alpha = \frac{\phi_0}{E\sqrt{\pi}} \quad (2.35),$$

ce qui nous permet de déduire la valeur de l'effusivité thermique E du matériau à caractériser.

Au regard de la description qui est faite de ces trois méthodes de mesure en régime quasi-établi que nous venons de présenter ci-dessus, nous nous sommes rendus compte de ce que la méthode du plan chaud est mieux indiquée pour l'étude des propriétés thermophysiques du poto-poto que nous recherchons.

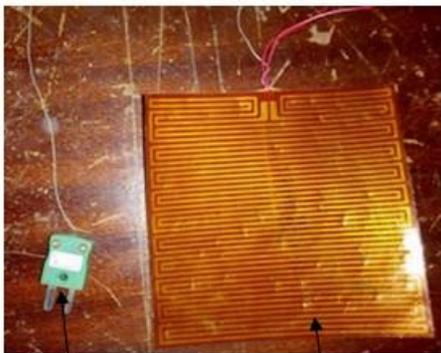
Cette méthode du plan chaud intègre le plan chaud symétrique qui nécessite pour la caractérisation, l'utilisation de deux matériaux ayant rigoureusement les mêmes compositions lors de la conception.

2.3.2. Dispositif du plan chaud asymétrique pour l'estimation des paramètres thermophysiques du poto-poto

Comme nous venons de l'évoquer, la méthode du plan chaud intègre le plan chaud symétrique qui nécessite pour la caractérisation, l'utilisation de deux matériaux ayant rigoureusement les mêmes compositions lors de la conception. Dans la perspective d'avoir des résultats efficaces, on a développé la méthode du plan chaud asymétrique qui ne nécessite que l'utilisation d'un seul matériau, et grâce à une méthode d'interpolation, on retrouve des résultats optimisés donnant directement les caractéristiques du matériau.

Le dispositif de mesure plan chaud asymétrique pour la détermination des paramètres thermophysiques (E , ρC_p et λ) du poto-poto est constitué des éléments suivants :

- Un thermocouple type K qui permet de mesurer l'élévation de chaleur (figure II-28) ;
- Une résistance chauffante qui permet d'apporter le flux de chaleur (figure II-29) ;
- Une sonde Picolog qui est un module d'acquisition qui permet en temps réel de voir l'évolution de la température au centre du matériau (figure II-30) ;
- Un générateur qui produit le flux thermique (figure II-31) ;
- Les blocs isolant qui maintiennent uniforme la température sur les faces du matériau (figure II-3).



Thermocouple type K Résistance chauffante
Figure II-28. Thermocouple type K et Résistance chauffante

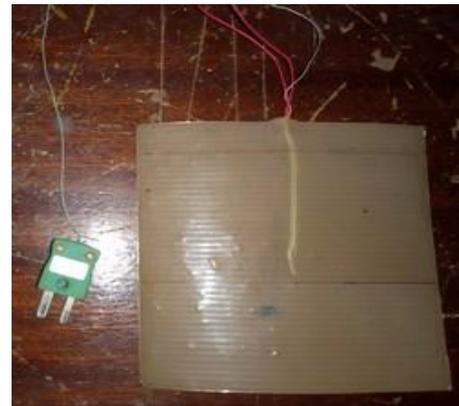


Figure II-29. Vue du thermocouple collé sur la résistance chauffante



Figure II-30. Module d'acquisition des températures (Sonde Picolog)



Figure II-31Alimentation stabilisée



Bloc isolant

Bloc de polystyrène

Figure II-32. Bloc de polystyrène et bloc isolant

La figure II-34 présente le dispositif plan chaud asymétrique pendant nos mesures en laboratoire et sa vue en coupe est illustrée sur la figure II-35.



Figure II-34. Dispositif expérimental plan chaud asymétrique

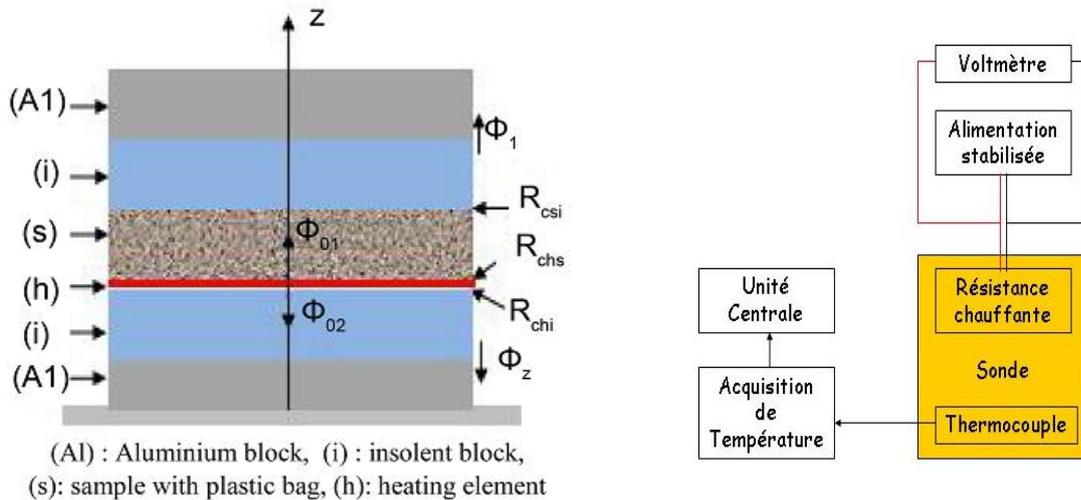


Figure II-35. Dispositif expérimental plan chaud asymétrique (vue en coupe) et association des appareillages (Damfeu 2017)

Ce dispositif consiste à utiliser un élément chauffant plan (10cm×10cm) muni d'une résistance chauffante « MINCO 230Ω P » insérée entre deux échantillons de surface plane du matériau poto-poto à caractériser. La sonde chauffante et l'échantillon ont de préférence la même surface, le but étant de faire l'hypothèse que le transfert de chaleur est unidirectionnel pendant le temps où les pertes latérales convectives sont négligeables. L'acquisition de températures se fait à l'aide d'un thermocouple de type K dont les fils ont un diamètre de 0,002 mm, collé au centre d'élément chauffant MINCO HK 5178.

Nous avons premièrement effectué l'étalonnage de la résistance chauffante. L'élément chauffant à une épaisseur $e_h=0,25$ mm et une capacité thermique volumique $\rho_h c_{ph}=1,2 \times 10^6$ Jm⁻³K⁻¹. La conductivité thermique du polystyrène mesurée par la méthode de la mini plaque chaude (Pepple, O., 2010) est de 0,032 Wm⁻¹K⁻¹ et sa capacité calorifique volumique $\rho_i c_{pi}=48000$ Jm⁻³K⁻¹.

L'épaisseur de l'échantillon est choisie de manière à ce que l'hypothèse du milieu semi-infini pour l'échantillon soit vérifiée pendant au moins quelques secondes. L'ensemble de ce dispositif expérimental est placé sur un bloc isotherme (en aluminium) d'épaisseur 2 cm et de section 20cm×20cm. La température (T_0) de ce bloc isotherme est supposée uniforme. Cette

hypothèse est validée si le nombre de Biot $Bi = \frac{h \cdot L}{\lambda_{Al}}$ est inférieur à 0,1 (Damfeu, 2017).

En effet, en considérant un coefficient de convection $h = 10$ Wm⁻²K⁻¹, la conductivité thermique des blocs $\lambda_{Al}=200$ Wm⁻¹K⁻¹ conduisent à $Bi = 0.01$, soit donc la température des blocs d'aluminium peut être considérée comme uniforme.

On applique alors à l'aide d'un générateur de tension (alimentation stabilisée 0-30V) un échelon de flux thermique (puissance thermique $P=UI$) et on relève grâce à la sonde Picolog l'évolution de la température $T_s(t)$ au centre de la sonde. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces, on peut considérer que le transfert de chaleur au centre de l'échantillon est unidirectionnel.

2.3.2.1. Modélisation quadripolaire 1D

Les dimensions transversales de la résistance étant grandes devant l'épaisseur de l'échantillon, on peut considérer que le transfert de chaleur reste unidirectionnel au centre de la sonde et le modéliser à l'aide de la méthode des quadripôles [Boubekeur et Houben, (1998) ; Maillet et al., (2000)]. Avec cette hypothèse, la température au centre de l'élément chauffant ne dépend que des coordonnées z et du temps t

2.3.1.2.1 Modèle 1D pour un modèle semi-infini

Ici, on va considérer la sonde comme un système mince (la température sera alors uniforme sur tout l'épaisseur de la sonde).

I- La méthode des quadripôles thermiques appliquée à l'échantillon pour le flux ascendant s'écrit :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \Phi_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \rho_s c_s e_s p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & SR_{cse} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_3 \\ E\sqrt{p}\theta_3 \end{pmatrix} \quad (236)$$

II- La méthode des quadripôles appliquée pour le flux descendant s'écrit en considérant également l'isolant comme un matériau semi-infini :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \Phi_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & SR_{csi} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_4 \\ E_i \sqrt{p} \theta_4 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$\theta_0 = L(T_0(x, t))$: est la transformée de Laplace de l'élévation de température au niveau de la sonde $T_s(t) = T_0(t) - T(0)$;

$\Phi_{01} = L(\phi_0(x, p))$: est la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur dissipée dans l'échantillon vers le haut ;

Φ_{02} : est la transformée de Laplace de la densité de flux de chaleur dissipée dans l'échantillon vers le bas ;

R_{cse} est la résistance de contact à l'interface sonde/échantillon ;

R_{cei} est la résistance de contact à l'interface échantillon/isolant ;

R_{csi} est la résistance de contact à l'interface sonde/isolant ;

La densité de flux total est donnée par la relation:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (2.38)$$

En combinant les toutes ces différentes matrices, on arrive à la relation qui représente la réponse théorique du modèle plan chaud asymétrique semi-infini dans l'espace de Laplace:

$$\theta_c(x, p) = \frac{\phi_0 S}{p} \cdot \frac{1}{\frac{\rho_s c_s e_s S p + (1 + R_{chs} \rho_s c_s e_s S p) E S \sqrt{p}}{1 + R_{chs} E S \sqrt{p}} + \frac{E_i S \sqrt{p}}{1 + R_{chi} E_i S \sqrt{p}}} \quad (2.39)$$

Une estimation simplifiée aux temps long (modèle simplifié), de la relation (2.39) permet d'obtenir dans l'espace réel.

$$\Delta T(0, t \rightarrow \infty) = \phi_0 S \left(\frac{E^2 R_{chs} + E_i^2 R_{chi}}{(E + E_i)^2} - \frac{\rho_s c_s e_s}{S(E + E_i)^2} \right) + \frac{2\phi_0}{(E + E_i) \cdot \sqrt{\pi}} \sqrt{t} \quad (2.40)$$

Le calcul numérique de la pente α de courbe $T = f(t^{1/2})$ (2.40) permet d'obtenir une pré-estimation (*preest*) de l'effusivité thermique du matériau donnée par la relation (2.41).

$$E_{preest} = \frac{2\phi_0}{\beta \sqrt{\pi}} - E_i \quad (2.41)$$

On peut également pré-estimer la capacité thermique volumique ρC_p à partir du modèle simplifié. Le transfert de chaleur δq traversant la sonde pendant un intervalle de temps dt infiniment petit correspond à un flux de chaleur $\rho_0 = \frac{\delta q}{dt}$, ce qui provoque une élévation de température dT dans la sonde. En exploitant la partie linéaire du thermogramme $T = f(t)$, on peut calculer numériquement sa pente β et ainsi déduire la valeur pré-estimée de la capacité thermique volumique de l'échantillon par la relation :

$$(\rho C_p)_{preest} = \frac{\frac{\phi_0}{\beta} - \rho C_{pt} e_i - \rho C_{ps} e_s}{e} \quad (2.42)$$

Les pré-estimations de E et ρC_p nous permettront de déterminer la conductivité thermique apparente des matériaux par la relation (2.43).

$$\lambda_{preest} = \frac{(E^2)_{preest}}{(\rho C_p)_{preest}} \quad (2.43)$$

2.3.1.2.2 Modèle quadripolaire 1D asymétrique pour le modèle complet

Température au centre de la sonde

On considère toujours le schéma de la Figure 2-40. En appliquant le formalisme des quadripôles, pour :

III- pour le flux ascendant :

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \Phi_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \rho_s c_s e_s p & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & SR_{cse} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & SR_{cei} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_5 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_5 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} \quad (2.44),$$

avec: A_e , B_e , C_e et D_e les éléments de la matrices représentant le matériau à caractériser :

$$\begin{aligned} A_e &= \cosh(q_e \cdot e) & B_e &= \frac{\sinh(q_e \cdot e)}{\lambda_e \cdot q_e} \\ C_e &= \lambda_e \cdot q_e \cdot \sinh(q_e \cdot e) & D_e &= A_e \end{aligned} \quad (2.45)$$

Et A_i , B_i , C_i et D_i les éléments de la matrice représentant le matériau à caractériser :

$$\begin{aligned} A_i &= \cosh(q_i \cdot e_i) & B_i &= \frac{\sinh(q_i \cdot e_i)}{\lambda_e \cdot q_i} \\ C_i &= \lambda_i \cdot q_i \cdot \sinh(q_i \cdot e_i) & D_i &= A_i \end{aligned} \quad (2.46)$$

IV- pour le flux descendant

$$\begin{pmatrix} \theta_0 \\ \Phi_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & SR_{csi} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

En combinant les relations (2.44), (2.45) et (2.47), on obtient alors l'expression de la température au centre de la sonde dans l'espace de Laplace, donnée par la relation (2.48) :

$$\theta_0(x, p) = \frac{\phi_0}{p} \cdot \frac{1}{\frac{D}{B} + \frac{D_i}{B_i + R_{csi} D_i}} \quad (2.48)$$

L'algorithme de Levenberg-Marquart (1944), associé à l'algorithme de De Hoog (1982) intégré dans un code Matlab permet d'estimer alors la valeur de E qui minimise la somme des erreurs écarts quadratiques de la fonctionnelle ψ ,

$$\psi = \sum_{i=1}^n [\Delta T_{\text{exp}}(t_i) - T_{\text{model}}(t_i)]^2 \quad (2.49),$$

entre courbes expérimentales $\Delta T_{\text{exp}}(t) = T(0,t) - T_a$ et courbes théoriques.

Les résultats valides de E et de ρC_p ne sont obtenus que s'il y a minimisation de la somme des écarts quadratiques données par (2.49), et dès lors, on obtient la valeur de la conductivité thermique λ , principal paramètre qui décrit le caractère isolant ou non d'un matériau :

$$\lambda = \frac{E^2}{\rho C_p} \quad (2.50)$$

2.3.3. Outils et méthode de caractérisation acoustique

La détermination des propriétés acoustiques des matériaux par méthodes numériques repose sur la prédiction de la réponse vibroacoustique (réponse dynamique et acoustique) desdits matériaux. La méthodologie utilisée pour la résolution de notre problème repose premièrement sur la modélisation à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) (Mesgouez et al., (2005) de notre éco-matériaux sous l'hypothèse de comportement poroélastique (milieux poreux et élastique), puis par une modélisation par éléments de frontières (BEM) [Ciskowski et al., (1991)] du fluide environnant, et enfin par un couplage éléments finis et éléments frontières pour la résolution du problème vibroacoustique associé [Bonnet, (1999) ; Abbas (2017)].

2.3.3.1. Modèle poroélastique de Biot

Le modèle de Biot (1956) d'un milieu poroélastique peut être présenté par 2 équations du mouvement et 2 équations de comportements.

La première équation du mouvement pour la structure globale en absence des forces de volumes peut s'écrire :

$$\sigma_{il,l} = (1-\phi)\rho_s \ddot{u}_l + \phi\rho_0 \ddot{U}_l \quad (2.51)$$

où u_l et U_l représentent respectivement les composantes de déplacement des particules solides et des particules fluides, $\sigma_{il,l}$ les composantes du tenseur de contrainte de Cauchy, ϕ la porosité qui traduit le pourcentage de vide connecté destinée à l'écoulement du fluide et ρ_s et ρ_0 respectivement les densités des grains solides et du composant fluide.

La deuxième équation de mouvement peut s'écrire sous la forme suivante :

$$p_{il} = -\frac{\phi}{K}(\dot{U}_{il} - \dot{u}_{il}) + \rho_0(a-1)\ddot{u}_{il} - a\rho_0\ddot{U}_{il} \quad (2.52),$$

où p est la pression interstitielle dans le fluide, K le coefficient de perméabilité défini par $K = \frac{\kappa}{\mu}$ avec κ le coefficient de perméabilité absolu, μ la viscosité dynamique du fluide et a le coefficient de tortuosité qui représente le couplage inertiel qui se traduit par une augmentation apparente de la masse volumique du fluide au niveau macroscopique.

$$a = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\phi} \right) \quad (2.53).$$

De même les équations de comportement donnant la relation contrainte-déformation peuvent s'écrire comme suit :

$$\sigma_{il} = \lambda_0 \varepsilon_{ee} \delta_{il} + 2\mu \varepsilon_{il} - \beta p \delta_{il} \quad (2.53),$$

$$-\phi(U_{i,i} - u_{i,i}) = \beta u_{i,i} + \frac{1}{M} p \quad (2.54),$$

où M est le premier coefficient de Biot et il correspond linéairement à la pression à appliquer pour modifier la teneur en fluide tout en maintenant constant le volume solide du milieu.

$$M = \left(\frac{\beta - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} \right)^{-1} \quad (2.55),$$

β est le second coefficient de Biot. Il désigne le couplage élastique entre la phase solide et fluide.

$$\beta = 1 - \frac{K_0}{K_s} \quad (2.56),$$

δ_{il} le symbole de Kronecker et ε_{il} est la composante du tenseur de déformation des particules sous l'hypothèse des petites déformations.

2.3.3.2. Formulation éléments finis {u-p}

Les éléments finis dérivés directement du modèle de Biot conduisent à la résolution d'un système dont les inconnues sont des déplacements nodaux regroupés en trois translations pour la phase solide et trois translations pour la phase fluide, soit un total de six degrés de liberté (ddl) par nœuds, ce qui entraîne un temps de calcul fastidieux. Nous opterons donc pour une formulation mixte équivalente (u, p) qui permet de passer de 6 à 4 ddl par nœud [M. Biot, (1956)]. Dans ce qui suit, une formulation mixte exacte valable pour le mouvement harmonique est donnée.

Les équations de comportement (2.53) et (2.54) après transformation peuvent se mettre sous la forme :

$$\sigma_{il} = a_0 u_{i,i} \delta_{il} + \mu(u_{i,l} + u_{l,i}) + b_0 U_{i,i} \delta_{il} \quad (2.57)$$

$$-\phi p \delta_{il} = c_0 u_{i,i} \delta_{il} + d_0 U_{i,i} \delta_{il} \quad (2.58)$$

Dans lesquelles les coefficients a_0 , b_0 , c_0 et d_0 sont définies comme suit :

$$a_0 = \lambda - \beta M(\phi - \beta); \quad b_0 = \beta M \phi;$$

$$c_0 = -\phi M(\phi - \beta); \quad d_0 = M \phi^2$$

De même les équations de mouvements (2.51) et (2.52) s'écrivent comme suit :

$$\sigma_{il,l} = \gamma_{11} \ddot{u}_i + \gamma_{12} \ddot{U}_i + \gamma_{13} (\dot{U}_i - \dot{u}_i) \quad (2.59)$$

$$-\phi p = \gamma_{21} \ddot{u}_i + \gamma_{22} \ddot{U}_i + \gamma_{23} (\dot{U}_i - \dot{u}_i) \quad (2.60)$$

où γ_{11} , γ_{13} , γ_{13} , γ_{21} , γ_{22} , γ_{23} sont donnés par les relations :

$$\gamma_{11} = (1 - \phi) \rho_s + \beta(a - 1) \rho_0;$$

$$\gamma_{12} = \rho_0(\phi - \beta a); \quad \gamma_{13} = \frac{\beta \phi}{K};$$

$$\gamma_{21} = -\phi(a - 1)\rho_0; \quad \gamma_{22} = \phi a \rho_0;$$

$$\gamma_{23} = \frac{\phi^2}{K}.$$

En supposant des oscillations harmoniques « $\exp(i\omega t)$ », les relations (2.59) et (2.60) s'écrivent sous la forme :

$$\sigma_{il,l} = -\omega^2 \left(\gamma_{11} - \frac{\gamma_{13}}{j\omega} \right) u_i - \omega^2 \left(\gamma_{12} + \frac{\gamma_{13}}{j\omega} \right) U_i \quad (2.61),$$

$$-\phi p_i = -\omega^2 \left(\gamma_{21} - \frac{\gamma_{23}}{j\omega} \right) u_i - \omega^2 \left(\gamma_{22} + \frac{\gamma_{23}}{j\omega} \right) U_i \quad (2.62).$$

A l'aide de l'équation (2.62), le vecteur de déplacement de la phase fluide U est exprimé en termes de pression p interstitielle et en termes de déplacement de la phase solide u :

$$U_i = \frac{\phi}{\tilde{\gamma}_{22} \omega^2} p_{,i} - \frac{\tilde{\gamma}_{21}}{\tilde{\gamma}_{22}} u_i \quad (2.63),$$

où les coefficients $\tilde{\gamma}_{21}$ et $\tilde{\gamma}_{22}$ sont défini par :

$$\tilde{\gamma}_{21} = \gamma_{21} - \frac{\gamma_{23}}{j\omega}, \quad \tilde{\gamma}_{22} = \gamma_{22} + \frac{\gamma_{23}}{j\omega} \quad (2.64).$$

2.3.3.3. Equation de la phase solide sous la formulation (u, p)

En introduisant l'équation (2.63) dans l'équation (2.51) on obtient :

$$\sigma_{il,l} = -\omega^2 \left(\tilde{\gamma}_{11} - \frac{\tilde{\gamma}_{12} \tilde{\gamma}_{21}}{\tilde{\gamma}_{22}} \right) u_i - \phi \frac{\tilde{\gamma}_{12}}{\tilde{\gamma}_{22}} p_{,i} \delta_{il} \quad (2.65).$$

L'équation (2.65) est fonction du déplacement du fluide à cause de la dépendance du tenseur de contrainte du milieu poreux [M. Biot, (1956)]. Pour pallier à cela nous recourons aux lois de comportement qui, combinées dans le but d'éliminer le champ de déplacement, conduisent à la relation suivante :

$$\sigma_{il} = \left(a_0 - \frac{b_0 c_0}{d_0} \right) u_{i,i} \delta_{il} + \mu (u_{i,l} + u_{l,i}) - \phi \frac{b_0}{d_0} p \delta_{il} \quad (2.66).$$

En définissant le tenseur des contraintes de la phase solide par :

$$\sigma_{il}^s = \left(a_0 - \frac{b_0 c_0}{d_0} \right) u_{i,i} \delta_{il} + \mu (u_{i,l} + u_{l,i}) \quad (2.67),$$

l'équation (2.65) devient :

$$\sigma_{il}^s = \sigma_{il} + \phi \frac{b_0}{d_0} p \delta_{il} \quad (2.68).$$

Ainsi l'équation du mouvement de la phase solide (2.67) en formulation mixte (u, p) s'écrit :

$$\sigma_{il,l}^s + \omega^2 \gamma u_i + \psi p_{,i} = 0 \quad (2.69),$$

où les coefficients γ et ψ sont données par :

$$\gamma = \tilde{\gamma}_{11} - \frac{\tilde{\gamma}_{12}\tilde{\gamma}_{21}}{\tilde{\gamma}_{22}} \text{ et } \psi = \phi \left(\frac{\tilde{\gamma}_{12}}{\tilde{\gamma}_{22}} - \frac{b_0}{d_0} \right) \quad (2.70).$$

2.3.3.4. Equation de la phase fluide sous la formulation (u, p)

L'équation de la phase fluide est donnée par l'équation (2.62) qui est fonction du déplacement de la phase fluide. Pour obtenir un formalisme (u, p), on utilise à la relation (2.63) transformée comme suit :

$$U_{i,i} = \frac{\phi}{\tilde{\gamma}_{22}\omega^2} (p_{,i})_{,i} - \frac{\tilde{\gamma}_{21}}{\tilde{\gamma}_{22}} u_{i,i} \quad (2.71).$$

De l'équation (2.66) on déduit :

$$U_{i,i} = -\frac{\phi}{d_0} p - \frac{c_0}{d_0} u_{i,i} \quad (2.72).$$

En égalisant les relations (2.71) et (2.72) on obtient :

$$(p_{,i})_{,i} + \omega^2 \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} p - \omega^2 \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 u_{i,i} = 0, \quad (2.73)$$

où le coefficient ψ_0 est définie par :

$$\psi_0 = \phi \left(\frac{\tilde{\gamma}_{21}}{\tilde{\gamma}_{22}} - \frac{c_0}{d_0} \right) \quad (2.74).$$

2.3.3.5. La formulation intégrale faible

La formulation variationnelle est l'équation obtenue par application de la méthode des résidus pondérés, en multipliant par une fonction poids égale à la perturbation δu et δp respectivement les équations (2.69) et (2.73), puis en intégrant le produit sur le domaine Ω .

$$\int_{\Omega} \sigma_{il,l}^s \delta u_i d\Omega + \omega^2 \int_{\Omega} \gamma u_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Omega} \psi p_{,i} \delta u_i d\Omega = 0, \quad (2.75)$$

$$\int_{\Omega} (p_{,i})_{,i} \delta p_i d\Omega + \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} p \delta p_i d\Omega - \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 u_{i,i} \delta p_i d\Omega = 0. \quad (2.76)$$

La forme faible est donnée par l'intégration par partie multidimensionnelle aux équations de la relation (2.75) et (2.76). On obtient alors:

$$-\int_{\Omega} \sigma_{il,l}^s \delta u_{i,l} d\Omega + \omega^2 \int_{\Omega} \gamma u_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Omega} \psi p_{,i} \delta u_i d\Omega = -\int_{\Gamma} \sigma_{il}^s \cdot e_i \delta u_i d\Gamma \quad (2.77),$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} p_{,i} \delta p_{i,i} d\Omega - \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} p \delta p_i d\Omega - \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 u_i \delta p_{i,i} d\Omega \\ = \omega^2 \int_{\Gamma} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 u_i \cdot e_i \delta p_i d\Gamma - \int_{\Gamma} p_{,i} \cdot e_i \delta p_i d\Gamma \end{aligned} \quad (2.78).$$

2.3.4. Discrétisation de la forme faible élémentaire

L'approximation par éléments finis s'effectue dans un premier temps à l'aide d'une discrétisation géométrique du domaine d'étude en sous-domaines élémentaires puis d'une discrétisation analytique des inconnus du problème à l'aide d'interpolation nodale. En

conséquence, dans un élément fini, on suppose que le vecteur de déplacement en phase solide et la pression peuvent être représentés sous forme matricielle suivante :

$$u^e = [N_s]\{u_n\}^e \text{ et } p^e = [N_f]\{p_n\}^e,$$

$[N_s]$ et $[N_f]$ étant les matrices de fonctions de forme de l'élément utilisées pour approximer le vecteur de déplacement en phase solide et la pression interstitielle dans l'élément e ; $\{u_n\}^e$ et $\{p_n\}^e$ sont respectivement le déplacement nodal et les variables de pression nodale.

Les premier, deuxième et troisième termes l'équation (2.77) deviennent alors respectivement :

$$\int_{\Omega_e} \sigma_{ii}^s \delta u_{i,i} d\Omega_e = \{\delta u_n\}^e \int_{\Omega_e} [B_s]^T [D] [B_s] d\Omega_e \{u_n\}^e \quad (2.79),$$

$$\int_{\Omega_e} \gamma u_i \delta u_i d\Omega_e = \{\delta u_n\}^e \int_{\Omega_e} [N_s]^T \gamma [N_s] d\Omega_e \{u_n\}^e \quad (2.80),$$

$$\int_{\Omega_e} \psi p_{,i} \delta u_i d\Omega_e = \{\delta u_n\}^e \int_{\Omega_e} [N_s]^T \psi [B_f] d\Omega_e \{p_n\}^e \quad (2.81).$$

$[B_s]$ et $[B_f]$ représentant les matrices de gradient des fonctions de forme.

Le terme de droite de l'équation (2.77) devient :

$$\int_{\Gamma_e} \sigma_{ii}^s \cdot e_i \delta u_i d\Gamma = \{\delta u_n\}^e \int_{\Gamma_e} [N_s]^T \{F\} d\Gamma_e \quad (2.82),$$

avec $F_i = \sigma_{ii}^s e_i$ une composante du vecteur contrainte correspondant aux conditions aux limites imposées à la frontière du domaine. On obtient donc la forme matricielle suivante de l'équation de la phase solide pour un sous-domaine Ω_e :

$$[K_e]\{u_n\}^e - \omega^2 [M_e]\{u_n\}^e - [C_e]\{p_n\}^e = \{F_s\} \quad (2.83),$$

où

$$[K_e] = \int_{\Omega_e} [B_s]^T [D] [B_s] d\Omega_e,$$

$$[M_e] = \int_{\Omega_e} [N_s]^T \gamma [N_s] d\Omega_e,$$

$$[C_e] = \int_{\Omega_e} [N_s]^T \psi [B_f] d\Omega_e,$$

$$\{F_s\} = \int_{\Gamma_e} [N_s]^T \{F\} d\Gamma_e,$$

avec $[K_e]$ et $[M_e]$ représentant respectivement la matrice de rigidité et de masse élémentaire de la phase solide, $[C_e]$ matrice de couplage élémentaire.

De même pour l'équation de la phase fluide, les premier, deuxième et troisième termes de l'équation (2.78) deviennent respectivement :

$$\int_{\Omega_e} p_{,i} \delta p_{i,i} d\Omega_e = \{\delta p_n\}^e \int_{\Omega_e} [B_f]^T [B_f] d\Omega_e \{p_n\}^e \quad (2.84).$$

$$\int_{\Omega_e} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} p \delta p_i d\Omega_e = \{\delta p_n\}^e \int_{\Omega_e} [N_f]^T \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} [N_f] d\Omega_e \{p_n\}^e. \quad (2.85)$$

$$\int_{\Omega_e} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 u_i \delta p_{i,i} d\Omega_e = \{\delta p_n\}^e \int_{\Omega_e} [B_f]^T \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 [N_s] d\Omega_e \{u_n\}^e. \quad (2.86)$$

On obtient ainsi la forme matricielle de l'équation de la phase fluide pour un sous-domaine Ω_e :

$$[E_e]\{p_n\}^e - \omega^2 [F_e]\{p_n\}^e - \omega^2 [L_e]\{u_n\}^e = \{F_p\} \quad (2.87)$$

Où :

$$[E_e] = \int_{\Omega_e} [B_f]^T [D] [B_f] d\Omega_e, \text{ représente la rigidité équivalente élémentaire ;}$$

$$[F_e] = \int_{\Omega_e} [N_f]^T \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{d_0} [N_f] d\Omega_e, \text{ représente la matrice de masse équivalente élémentaire ;}$$

$$[L_e] = \int_{\Omega_e} [B_f]^T \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 [N_s] d\Omega_e, \text{ représente la matrice de couplage équivalente élémentaire ;}$$

$$\{F_p\} = \omega^2 \int_{\Gamma_e} \frac{\tilde{\gamma}_{22}}{\phi^2} \psi_0 [N_f]^T \{F\} d\Gamma_e - \int_{\Gamma_e} [N_f]^T \{F\} d\Gamma_e.$$

Après avoir répété l'écriture des relations (2.81) et (2.85) pour chaque sous-domaine obtenu après subdivision du domaine globale on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} [K] - \omega^2 [M] & -[C] \\ -\omega^2 [L] & [E] - \omega^2 [F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_n\} \\ \{p_n\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_s\} \\ \{F_p\} \end{Bmatrix}. \quad (2.88)$$

2.3.4.1. Modélisation numérique du fluide

La modélisation numérique du fluide ambiant est réalisée à l'aide des éléments de frontières. La méthode des éléments de frontière se décompose en trois étapes : le prétraitement où un système d'équation est construit, la résolution dans laquelle l'on détermine les valeurs limites, et enfin le post-traitement qui permet le calcul du champ de pression dans un volume V .

2.3.4.2. Équation d'onde du fluide

L'équation d'onde du fluide s'obtient à l'aide des équations de comportement et de conservation de la quantité de mouvement du fluide.

L'équation de conservation de la masse du fluide s'écrit :

$$\dot{\rho} + \rho_0 \text{div}(\dot{u}_f) = 0 \quad (2.89).$$

En supposant que le fluide obéit aux lois de l'acoustique linéaire, alors on a :

$$\sigma_{fi,l} = -p \delta_{il} \quad (2.90).$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement en l'absence des forces volumiques s'écrit :

$$\sigma_{fi,l} - \rho_0 \dot{u}_{fi} = 0 \quad (2.91),$$

où

$\sigma_{fi,l}$ est le tenseur de contrainte dans le fluide ;

ρ_0 , la masse volumique du fluide à l'état naturel ;

u_f , le champ de déplacement d'une particule du fluide.

En combinant les équations (2.89) et (2.91) on obtient l'équation d'onde du fluide sous l'hypothèse du mouvement harmonique (Equation de Helmholtz, éqt. 2.92) (*Holmström, 2014*).

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2.92),$$

où p est la pression acoustique et k le nombre d'ondes (ω/c).

2.3.4.3. Fonction de Green

La fonction de Green [*Biot, (1956)*] en champ libre, est une solution de l'équation de Helmholtz inhomogène, qui a été formulée sous forme homogène par l'équation (2.92). Elle satisfait à la condition de rayonnement de Sommerfeld [*Mesgouez et al., (2005)*] qui permet de garantir que l'équation intégrale de Helmholtz représente les ondes se déplaçant vers l'extérieur du domaine fluide :

$$g(r - r_0) = \frac{\exp(-jk|r - r_0|)}{4\pi|r - r_0|} \quad (2.93),$$

où r_0 désigne un point situé sur la frontière S [*Ciskowski and Brebbia, (1991)* ; *Mingsian, (1992)*].

La frontière est soumise à une pression acoustique et à une vitesse normale. L'une de ces deux propriétés physiques doit être connue en chaque point de la frontière, afin de pouvoir résoudre un problème BEM. La propriété connue est appelée condition limite.

L'impédance normale spécifique, qui établit la relation entre la pression et la vitesse normale, peut également servir de condition limite [*Desmet, (2000)*].

2.3.4.4. Forme intégrale de l'équation de Helmholtz

La forme intégrale de l'équation de Helmholtz (2.92) correspondant aux problèmes d'acoustique harmonique dans le domaine fluide (*Holmström, 2001*). Elle se base sur la modélisation est donnée par la relation suivante :

$$\tau p(r) = \int_S \left(p(r_0) \frac{\partial g}{\partial n_0} - f(|r - r_0|) \frac{\partial p}{\partial n_0} \right) dS \quad (2.94),$$

où n_0 est le vecteur unitaire normal à la surface S et

$$\tau = \begin{cases} 1, & r \text{ est dans le domaine fluide} \\ 1/2, & r \text{ est sur la frontière lisse du domaine fluide} \\ \frac{\Omega}{4}, & r \text{ est sur une frontière non lisse du domaine fluide} \\ 0, & r \text{ est hors du domaine fluide.} \end{cases}$$

2.3.5. Formulation élément de frontière (BEM) [*Ciskowski et al., (1991)*, *Odd, (1983)*]

La formulation élément de frontière permet de ramener l'étude du domaine aux nœuds de ses frontières. Ne connaissant pas les valeurs physiques, c'est-à-dire la pression et la vitesse

normale, aux limites d'un domaine du problème, il n'est pas possible d'obtenir des informations sur le comportement du fluide. Par conséquent, les valeurs doivent être déterminées avant de pouvoir calculer un champ de pression. C'est pourquoi la formulation BEM se compose de trois parties : une partie de prétraitement où un système d'équations est construit, une deuxième partie où le système est résolu pour obtenir les valeurs limites, et une troisième partie, le post-traitement, où le champ de pression dans un volume V est calculé (Holmström, 2001).

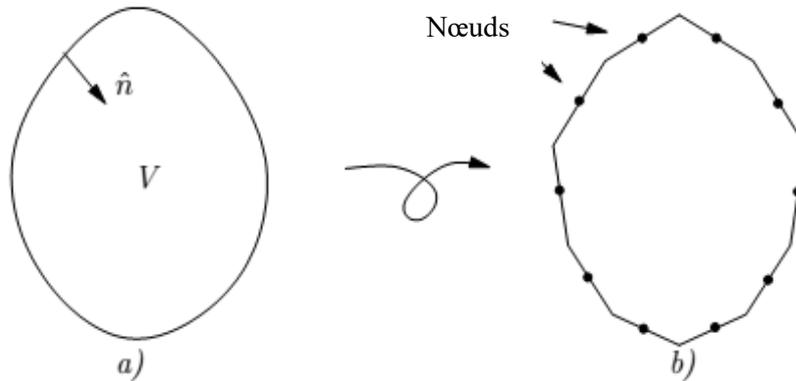


Figure II-36. a) système continu, b) système discret

Comme évoqué plus haut, la formulation élément de frontière se compose de trois parties : le prétraitement pour construire le système d'équations, la résolution desdites équations pour obtenir les valeurs limites, et le post-traitement pour calculer le champ de pression dans un volume V (Holmström, 2001).

– Le prétraitement

La première étape du développement d'une formulation éléments de frontière consiste à transformer un système continu en un système discret (Holmström, 2001). Cela se fait en discrétisant l'équation intégrale de Helmholtz continue (2.94) afin de trouver un système d'équations à partir duquel les valeurs inconnues des nœuds limites peuvent être trouvées. La frontière est divisée en N éléments et l'équation (2.94) est discrétisée pour un nœud donné i de sorte que la forme intégrale discrète de l'équation de Helmholtz s'écrive [Ciskowski and Brebbia., (1991)] :

$$\tau p_i - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} p \frac{\partial g}{\partial n_0} dS = - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} g \frac{\partial p}{\partial n_0} dS \quad (2.95),$$

S_i est la surface de l'élément i sur la frontière (Pour la figure II-36, $\tau = 1/2$ car les nœuds sont placés sur une surface lisse).

En appliquant la condition aux limites de pression on a :

$$\tau p_i - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} p \bar{g} dS = j \rho_0 \omega \sum_{i=1}^n \int_{S_i} g v dS \quad (2.96),$$

avec $v = i/j \rho_0 \omega \frac{\partial p}{\partial n_0}$ sur Sv , $\bar{g} = \frac{\partial g}{\partial n_0}$, où p et v sont, dans cette relation, des fonctions qui proviennent des valeurs aux nœuds et des fonctions de forme liées à la surface S_i .

Puisque la condition de rayonnement de Sommerfeld [Desmet, 2000], est satisfaite dans l'équation intégrale de Helmholtz (2.94), la BEM peut traiter des problèmes avec des domaines acoustiques non bornés, c'est-à-dire des problèmes infinis et semi-infinis, ce qui n'est pas possible avec la FEM. Cette capacité est l'un des avantages de l'utilisation de la BEM.

La formulation élément de frontière nécessite, comme pour certaines méthodes numériques, une discrétisation du domaine étudié à l'aide d'éléments de frontière (élément constant ou élément linéaire à 4 nœuds).

V- Éléments linéaires à quatre nœuds

Pour un élément linéaire à quatre nœuds, la pression p et la vitesse normale v en un point de l'élément sont définies dans le système isoparamétrique (ξ, η) [Holmström, (2014)], par :

$$p(\xi, \eta) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{Bmatrix} \quad (2.97);$$

$$v(\xi, \eta) = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (2.98),$$

où les N_i représente les fonctions de forme linéaire et p_i, v_i les valeurs nodales des pressions et vitesse.

Ainsi l'équation de Helmholtz sous sa forme intégrale pour cet élément s'écrit:

$$\begin{aligned} \tau p_i - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \bar{g} dS \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{Bmatrix} \\ = j\rho_0\omega \sum_{i=1}^n \int_{S_i} [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] g dS \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2.99).$$

On pose :

$$h_{il}^e = \tau \delta_{il} \int_{S_i} N_e \bar{g} dS \quad \text{et} \quad g_{il}^e = \int_{S_i} N_e g dS \quad ; \quad l = 1 \dots 4 \quad (2.100),$$

l'équation (2.91) devient :

$$\sum_{i=1}^n [h_{il}^1 \quad h_{il}^2 \quad h_{il}^3 \quad h_{il}^4] \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{Bmatrix} = j\rho_0\omega \sum_{i=1}^n [g_{il}^1 \quad g_{il}^2 \quad g_{il}^3 \quad g_{il}^4] \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (2.101).$$

En répétant cette équation (2.101) pour chaque point nodal i on obtient un système d'équations donnée par :

$$[H]\{p\} = j\rho_0\omega [G]\{v\} \quad (2.102),$$

où H et G sont les matrices des coefficients d'influence de dimension $n \times n$; p et v sont des vecteurs de longueur n .

– Post-traitement

Lorsque toutes les valeurs limites sont connues, la pression p pour tout point à l'intérieur du domaine fluide peut être déterminée dans la partie post-traitement. L'équation (2.96) est à nouveau utilisée, à la différence que le point i est un point arbitraire situé dans le domaine des fluides et ne coïncidant pas avec un nœud frontalier. La constante τ est ici égale à un.

$$p_i - \sum_{i=1}^n \int_{S_i} p \bar{g} dS = j\rho_0\omega \sum_{i=1}^n \int_{S_i} g v dS \quad (2.103).$$

2.3.6. Couplage éléments finis-éléments de frontière

Dans cette partie, nous présentons le procédé de couplage entre la méthode des éléments de frontière et la méthode des éléments finis pour les applications acoustiques de structure.

Comme établi précédemment, un modèle d'éléments de frontière (BEM) se présente sous la forme :

$$[H]\{p\} = j\rho_0\omega[G]\{v\} \quad (2.104),$$

et un modèle éléments finis (FEM) de la forme :

$$\begin{bmatrix} [K] - \omega^2[M] & -[C] \\ -\omega^2[L] & [E] - \omega^2[F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_n \\ p_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_p \end{Bmatrix} \quad (2.105).$$

En répartissant les degrés de liberté du modèle éléments finis en degrés de liberté de couplage d'une part, ceux appartenant à l'interface fluide-structure désignée par l'indice a et d'autre part les degrés de liberté du solide n'appartenant pas à cette interface désignée par l'indice b , la relation (2.105) devient :

$$[X]\{u\} = \{F\} \quad (2.106),$$

avec :

$$[X] = \begin{bmatrix} K_{11} - \omega^2 M_{11} & K_{12} - \omega^2 M_{12} & -C_{11} & -C_{12} \\ K_{21} - \omega^2 M_{21} & K_{22} - \omega^2 M_{22} & -C_{21} & -C_{22} \\ -\omega^2 L_{11} & -\omega^2 L_{12} & E_{11} - \omega^2 F_{11} & E_{12} - \omega^2 F_{12} \\ -\omega^2 L_{21} & -\omega^2 L_{22} & E_{21} - \omega^2 F_{21} & E_{22} - \omega^2 F_{22} \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \\ p_a \\ p_b \end{Bmatrix} \text{ et } \{F\} = \begin{Bmatrix} F_{ua} \\ F_{ub} \\ F_{pa} \\ F_{pb} \end{Bmatrix}.$$

De même, en répartissant les éléments limites en éléments appartenant à la frontière commune Γ_a entre le fluide et le solide dont les inconnues sont désignées par (p_c, v_c) et en éléments appartenant à la frontière Γ_b dont les inconnues sont désignées par (p_d, v_d) ,

Le modèle éléments de frontière s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_c \\ p_d \end{Bmatrix} = j\rho_0\omega \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_c \\ v_d \end{Bmatrix} \quad (2.107).$$

En considérant les conditions de continuité de pression :

$$p_d = p_c,$$

Et les conditions de continuité de vitesse :

$$v_c = j\omega u_d,$$

La relation (2.106) devient :

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_c \\ p_d \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\rho_0\omega^2 u_d \\ j\rho_0\omega v_d \end{Bmatrix} \quad (2.108).$$

En combinant le modèle éléments finis avec le modèle éléments de frontière acoustique on obtient le modèle couplé éléments finis-éléments de frontière :

$$= \begin{bmatrix} K_{11} - \omega^2 M_{11} & K_{12} - \omega^2 M_{12} & -C_{11} & -C_{12} & 0 & 0 \\ K_{21} - \omega^2 M_{21} & K_{22} - \omega^2 M_{22} & -C_{21} & -C_{22} & 0 & 0 \\ -\omega^2 L_{11} & -\omega^2 L_{12} & E_{11} - \omega^2 F_{11} & E_{12} - \omega^2 F_{12} & 0 & 0 \\ -\omega^2 L_{21} & -\omega^2 L_{22} & E_{21} - \omega^2 F_{21} & E_{12} - \omega^2 F_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_0\omega^2 G_{11} & 0 & H_{11} & H_{12} & j\rho_0\omega G_{12} \\ 0 & \rho_0\omega^2 G_{21} & 0 & H_{21} & H_{22} & j\rho_0\omega G_{22} \end{bmatrix} \quad [M] \quad (2.109)$$

La matrice (2.109) ci-dessus est obtenue après la construction de chaque matrice constituant le modèle FEM du pote-poto et le modèle BEM de l'environnement. Il s'agit donc de la matrice de l'équation de couplage FEM/BEM :

$$\begin{bmatrix}
K_{11} - \omega^2 M_{11} & K_{12} - \omega^2 M_{12} & -C_{11} & -C_{12} & 0 & 0 \\
K_{21} - \omega^2 M_{21} & K_{22} - \omega^2 M_{22} & -C_{21} & -C_{22} & 0 & 0 \\
-\omega^2 L_{11} & -\omega^2 L_{12} & E_{11} - \omega^2 F_{11} & E_{12} - \omega^2 F_{12} & 0 & 0 \\
-\omega^2 L_{21} & -\omega^2 L_{22} & E_{21} - \omega^2 F_{21} & E_{12} - \omega^2 F_{12} & 0 & 0 \\
0 & \rho_0 \omega^2 G_{11} & 0 & H_{11} & H_{12} & j\rho_0 \omega G_{12} \\
0 & \rho_0 \omega^2 G_{21} & 0 & H_{21} & H_{22} & j\rho_0 \omega G_{22}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
u_a \\
u_b \\
p_a \\
p_b \\
p_d \\
v_d
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
F_{ua} \\
F_{ub} \\
F_{pa} \\
F_{pb} \\
F \\
0
\end{bmatrix}
\quad (2.110).$$

On définit par M_s la matrice du système des éléments finis:

$$M_s = \begin{bmatrix}
K_{11} - \omega^2 M_{11} & K_{12} - \omega^2 M_{12} & -C_{11} & -C_{12} \\
K_{21} - \omega^2 M_{21} & K_{22} - \omega^2 M_{22} & -C_{21} & -C_{22} \\
-\omega^2 L_{11} & -\omega^2 L_{12} & E_{11} - \omega^2 F_{11} & E_{12} - \omega^2 F_{12} \\
-\omega^2 L_{21} & -\omega^2 L_{22} & E_{21} - \omega^2 F_{21} & E_{12} - \omega^2 F_{12}
\end{bmatrix} \quad (2.111).$$

Si on définit par L la matrice de transformation de la pression du fluide en force nodale qui s'applique sur les nœuds couplés de la structure appelée matrice de couplage des pressions, et T , la matrice de transformation des vitesses normales du fluide en déplacements nodaux qui s'applique sur les nœuds couplés de la structure appelée matrice de couplage des vitesses, la structure n'étant soumise à aucune force extérieure, le vecteur force propre au modèle d'éléments finis est nul :

$$F_{ua} = F_{ub} = 0 ; F_{pa} = F_{pb} = 0.$$

Ainsi, le système (2.110) devient :

$$\begin{bmatrix}
M_s & L & 0 \\
\rho_0 \omega^2 G_{11} T & H_{11} & H_{12} \\
\rho_0 \omega^2 G_{21} T & H_{21} & H_{22}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
w \\
p_c \\
p_d
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
F_c \\
F_d
\end{bmatrix} \quad (2.112),$$

avec

$$F_c = j\rho_0 \omega G_{12} v_d \text{ et } F_d = j\rho_0 \omega G_{22} v_d \quad (2.113).$$

La résolution de la matrice (2.110) se fait par la résolution du système équivalent (2.112). Elle passe par les étapes suivantes :

- ✓ la définition des conditions aux limites sur la structure du poto-poto et l'environnement (air) ;
- ✓ les conditions aux limites de pression ;
- ✓ conditions limites de vitesse ;
- ✓ conditions limites d'impédance.

La prise en compte de ces conditions aux limites dans l'équation (2.112) se fait à travers sa réécriture en ne s'intéressant qu'aux degrés de liberté (ddl) des éléments limites n'étant pas couplés aux ddl des éléments finis :

$$\begin{bmatrix} * & * & * \\ * & * & H_{12} \\ * & * & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} * \\ * \\ p_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * \\ j\rho_0\omega G_{12}v_d \\ j\rho_0\omega G_{22}v_d \end{bmatrix} \quad (2.114),$$

$$\begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{22} \end{bmatrix} [p_d] = j\rho_0\omega \begin{bmatrix} G_{12} \\ G_{22} \end{bmatrix} [v_d] \quad (2.115).$$

On désigne par n le nombre de ddl concernés par les conditions aux limites et k le nombre de ddl inconnus, alors on a :

$$\begin{bmatrix} H_{12}^k & H_{12}^n \\ H_{22}^k & H_{22}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_d^k \\ p_d^n \end{bmatrix} = j\rho_0\omega \begin{bmatrix} G_{12}^n & G_{12}^k \\ G_{22}^n & G_{22}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d^n \\ v_d^k \end{bmatrix} \quad (2.116),$$

$$\begin{bmatrix} H_{12}^k & -G_{12}^k \\ H_{22}^k & -G_{22}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_d^k \\ v_d^k \end{bmatrix} = j\rho_0\omega \begin{bmatrix} G_{12}^n & -H_{12}^k \\ G_{22}^n & -H_{22}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d^n \\ p_d^n \end{bmatrix} \quad (2.117).$$

En définissant $[\bar{H}_{12}] = [H_{12}^k \quad -G_{12}^k]$, $[\bar{H}_{22}] = [H_{22}^k \quad -G_{22}^k]$ and $[\bar{p}_d] = \begin{bmatrix} p_d^k \\ v_d^k \end{bmatrix}$,

Et $[\bar{G}_{12}] = [G_{12}^n \quad -H_{12}^k]$, $[\bar{G}_{22}] = [H_{22}^k \quad -G_{22}^n]$ et $[\bar{v}_d] = \begin{bmatrix} v_d^n \\ p_d^n \end{bmatrix}$,

le système (2.112) est réécrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} M_s & L & 0 \\ \rho_0\omega^2 G_{11}T & H_{11} & \bar{H}_{12} \\ \rho_0\omega^2 G_{21}T & H_{21} & \bar{H}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ p_c \\ \bar{p}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{F}_c \\ \bar{F}_d \end{bmatrix} \quad (2.118),$$

avec,

$$\bar{F}_c = j\rho_0\omega G_{12}\bar{v}_d \text{ et } \bar{F}_d = j\rho_0\omega G_{22}\bar{v}_d \quad (2.119).$$

Pour chaque fréquence, nous inversons la matrice du système (2.110) et résolvons le système (2.101). Nous obtenons alors les déplacements et les pressions nodales de la structure Poto-Poto.

D'autre part, étant donné que le nombre d'éléments de frontière par longueur d'onde requis pour les calculs numériques dépend de l'erreur et de la précision souhaitées, et en supposant une précision maximale de 10% avec la prise en compte des hautes fréquences, nous avons utilisé une grille de 5 éléments constants par longueur d'onde.

2.3.7. Impédance acoustique normale

Avant le lancement des simulations des coefficients d'absorption, nous aurons dans un premier temps à déterminer l'impédance normale d'une couche de Poto-Poto. Une onde plane

d'incidence normale est utilisée comme source. Le calcul est effectué pour une incidence normale à l'aide de la relation suivante :

$$Z_n = \frac{1}{j\omega(\phi U_n - (1-\phi)u_n)} \quad (2.120),$$

où les u_n et U_n sont respectivement les composantes nodales normales des déplacements pour les phases solide et fluide.

Le coefficient de réflexion acoustique à l'interface fluide-structure est ensuite déterminé par la relation:

$$r(\theta) = \frac{z_n - 1}{z_n + 1}, \quad (2.121),$$

où z_n représente l'impédance acoustique normale spécifique réduite au point d'interface p donnée par la relation :

$$z_n = \frac{Z_n}{Z_0}, \quad (2.122),$$

avec Z_n l'impédance acoustique normale au point d'interface p et, Z_0 l'impédance caractéristique du fluide $Z_0 = \rho_0 c_0$.

Le coefficient d'absorption acoustique est alors défini par la relation de l'équation (2.123) [Nouredine Atalla et al., (1998)] :

$$\alpha = 1 - |r(\theta)|^2 \quad (2.123).$$

2.3.8. Dispositif expérimental de mesure du coefficient d'absorption acoustique

Les éprouvettes formulées dans le cadre des mesures de coefficient d'absorption acoustique été confectionnées suivant le protocole indiqué au paragraphe 2.1.2.

Une fois les éprouvettes confectionnées, elles ont été envoyées au Laboratoire d'acoustique de la Faculté de Pharmacie de Nancy, Université de Lorraine, pour des tests de mesures du coefficient d'absorption acoustique effectuées à l'aide du tube de Kundt représenté sur le schéma de la figure 2-35.

Ce tube de Kundt a une gamme de fréquences d'application allant de 100 Hz (limite basse due à la longueur du tube) à 5500 Hz (limite haute où commence la sphéricité des ondes). L'absorption a été étudiée de 125 Hz à 5000 Hz.

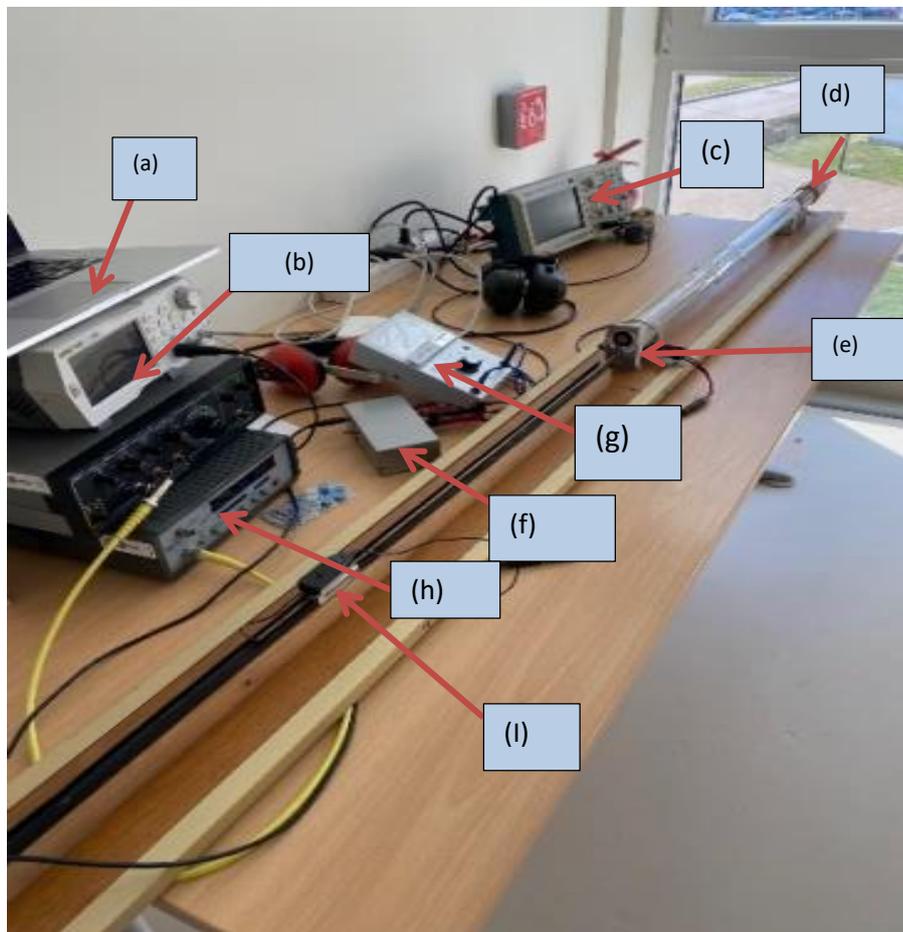


Figure II-37. Dispositif expérimental (photo de l'assemblage) du tube de Kundt pour la mesure du coefficient d'absorption du poto-poto : (a) Ordinateur pour stocker les résultats des taux d'ondes stationnaires, (b) Générateur de fréquences, (c) oscilloscope pour visualiser les signaux temporels : celui émis par le Haut-parleur et celui capté par le microphone dans tube, (d) Porte échantillon, (e) Haut-parleur, (f) Amplificateur pour augmenter la dynamique des signaux captés, (g) Voltmètre pour mesurer la tension en sortie du microphone : cette tension donne accès à la valeur minimale (nœud) et maximale (ventre) des ondes stationnaires. C'est à partir de ces deux tensions qu'on évalue le taux d'ondes stationnaires qui permet de déterminer le coefficient d'absorption acoustique, (h) Fréquencesmètre pour connaître exactement la fréquence du signal émis (i) Préamplificateur du Microphone – La tige sert à déplacer le microphone dans le tube pour chercher les ventres et les nœuds-.

Les échantillons ont été placés dans le porte-échantillon de 3cm de diamètre. Les mesures ont été effectuées à des fréquences (son pur) correspondant aux fréquences centrales du 1/3 d'octave⁶ sauf pour des éprouvettes de 3cm en basses fréquences pour lesquelles des ventres d'absorption inexplicables ont été observés. En conséquence, ces fréquences ont été légèrement décalées : 180 Hz au lieu de 200 Hz, 260 Hz au lieu de 250 Hz et 360 au lieu de 400 Hz.

Le principe consiste à générer à une extrémité du tube par le haut-parleur qui engendre une onde harmonique. L'autre extrémité est occupée par un échantillon du matériau à tester. Une onde stationnaire est créée dans le tube par réflexion sur les deux extrémités. En mesurant le rapport entre le maximum et le minimum de pression dans le tube, on peut calculer le coefficient d'absorption. Par ailleurs, en mesurant la distance entre la surface de l'échantillon et les minima et maxima de pression, on peut calculer l'impédance de surface de l'échantillon. Le tube étant

⁶ La bande de fréquence est calculée en fonction de la fréquence centrale : pour les bandes d'octave, la fréquence centrale f_c est divisée par racine carrée de 2 pour avoir la fréquence inférieure f_i , et multipliée par cette même valeur pour avoir la fréquence supérieure f_s ; ainsi, le rapport f_s/f_i vaut bien 2. Pour les bandes de tiers d'octave, la fréquence centrale est divisée par la racine sixième de 2 pour avoir la fréquence inférieure, et multipliée par cette même valeur pour avoir la fréquence supérieure ; ainsi, le rapport f_s/f_i vaut bien $2^{1/3}$.

rigide, la proportion de l'énergie qu'il absorbe est négligeable par rapport à l'énergie absorbée par l'échantillon.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous nous sommes appuyés sur la méthodologie de caractérisation du potopoto. Nous avons présenté les matériaux utilisés, le protocole de confection de nos éprouvettes ainsi que les dispositifs expérimentaux de mesure et autres outils qui ont servi pour cette caractérisation.

En ce qui concerne la caractérisation thermophysique, nous avons présenté la modélisation quadripolaire 1D et la méthode du plan chaud qui nécessite, pour la caractérisation, l'utilisation de deux matériaux ayant rigoureusement les mêmes compositions lors de la conception. Toutefois, dans la perspective d'avoir des résultats efficaces, nous avons eu recours à la méthode du plan chaud asymétrique qui ne nécessite que l'utilisation d'un seul matériau, et grâce à une méthode d'interpolation, on retrouve des valeurs optimisées de l'effusivité thermique E et de la capacité thermique volumique ρC_p du matériau à partir desquelles on déduit la conductivité thermique λ .

Du point de vue de la caractérisation mécanique, nous avons eu recours aux essais de flexion et de compression via le dispositif expérimental de la presse hydraulique pour la détermination de la résistance en flexion et en compression ainsi que du module d'Young du potopoto, paramètres mécaniques importants pour confirmer ou non l'usage du potopoto comme matériau de remplissage des enveloppes de bâtiment.

Pour ce qui est de la caractérisation acoustique, nous avons recouru au modèle poroélastique de Biot pour déterminer la formulation des éléments finis puis des éléments de frontière ayant permis d'obtenir la matrice de couplage dont la résolution numérique a permis d'estimer les valeurs d'absorption acoustique du potopoto. Au plan expérimental, le tube de Kundt a permis de mesurer au laboratoire les valeurs de coefficients d'absorption acoustique à partir des différentes éprouvettes confectionnées.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'ensemble des résultats obtenus tant du point de vue acoustique que thermophysique et mécanique.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous présenterons tout d'abord, les résultats des différents essais d'identification de notre matériau.

Ensuite, nous présenterons les caractéristiques thermophysiques et mécaniques du poto-poto, obtenues à partir du dispositif expérimental plan chaud asymétrique basé sur la modélisation quadripolaire 1D, développé et simulé pour l'estimation de l'effusivité thermique E , de la capacité thermique volumique ρC_p et de la conductivité thermique λ .

Egalement, nous présenterons les résultats de la simulation numérique via le logiciel Matlab du coefficient d'absorption acoustique du poto-poto, obtenus par modélisation numérique 2D d'un mur poto-poto par couplage des éléments finis (FEM) et des éléments de frontière (BEM). Les résultats des mesures expérimentales du coefficient d'absorption acoustique du poto-poto, réalisées sur les éprouvettes au tube de Kundt, que nous présenterons également dans ce chapitre, ont permis de comparer les résultats expérimentaux au modèle.

3.1. Résultats expérimentaux

3.1.1. Résultats des essais d'identification

a) Résultats d'analyse granulométrique

Les résultats de la synthèse granulométrique de la terre sont présentés dans le tableau 3-1.

Tableau III-1. Analyse granulométrique et consistance du matériau terre

Synthèse granulométrique					
Couleur	Aspect	% de graviers $\Phi \geq 2mm$	% de sable $2 \geq \Phi \geq 0,2mm$	% de limons $0,02 \geq \Phi \geq 0,002mm$	% d'argile $\Phi \leq 0,02mm$
Rouge	Argileux	10,75	30,53	18,27	40,45
Limite de consistance (%) (limite d'Atterberg)					
Limite de liquidité		58,87			
Limite de plasticité		31,84			
Indice de plasticité		27,03			
Poids spécifique		2,542			
Teneur en eau naturelle (%)		30,20			
Essai proctor					
Teneur en eau optimal		17,5			
Densité optimal		1,633			

b) Résultats des essais de porosité

Les essais de porosité réalisés sur des éprouvettes de dimensions 5x5x5cm³ sont répertoriés dans le tableau 3.2.

Tableau III-2: Absorption, densités et porosité pour des éprouvettes de pote-poto de 5cm

Eprouvette	Masse sèche pesée m_s (g)	Masse humide pesée m_h (g)	Volume ép. (cm ³)	Absorption d'eau (abs en %)	Densité (g/cm ³)	Porosité en %
0%	200	231	125	15,5	1,6	24,8
2%	188	256	125	36,1	1,5	57,15
4%	179	254	125	41,8	1,44	60,33
6%	167	250	125	49,7	1,33	66,39

m_s : masse sèche, m_h : masse humide ; abs : absorption d'eau.

c) Résultats des Essai de mesure du coefficient de poisson

L'essai consiste à effectuer une contraction d'un échantillon perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué : la contraction du matériau perpendiculairement est ε_T et l'allongement tangentiel est ε_L . Les essais sont réalisés suivant la norme ASTM D638.

De manière pratique, l'éprouvette est soumise à une charge suivant les plans tangentiel et longitudinal. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette entraînant des déformations tangentielle et longitudinales qui sont indiquées à l'aide d'un comparateur digital qui permet le relevé des valeurs de déformations. La valeur recherchée du coefficient de poisson est obtenu suivant la formule :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (3.1),$$

avec ε_T est la déformation tangentielle et ε_L la déformation longitudinale.

Le tableau 3.2 présente les résultats des essais de mesure du coefficient de poisson du pote-poto pour un échantillon de 5x5x5cm³.

Tableau III-3: Coefficients de poisson du pote-poto de 5cm d'épaisseur

Echantillon	N° de l'essai	ε_L	ε_T	$\varepsilon \left(\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \right)$	ε_{moyen}
2%	1	0.151	0.062	0.41	0.39
	2	0.142	0.055	0.38	
	3	0.131	0.052	0.39	
4%	1	0.133	0.052	0.39	0.37
	2	0.124	0.045	0.36	
	3	0.141	0.051	0.36	
6%	1	0.120	0.041	0.34	0.32
	2	0.121	0.039	0.32	
	3	0.132	0.042	0.31	

ε_T : déformation tangentielle, ε_L : déformation longitudinale, ε_{moyen} : coefficient de poisson moyen.

3.1.2. Résultats de la caractérisation thermophysique

3.1.2.1. Thermogrammes expérimentaux des températures

Les figures III-1 et III-2 présentent les thermogrammes expérimentaux de température $T_{\text{exp}} = f(t)$ pour le poto-poto à 0% et à 4% de fibre de bambou.

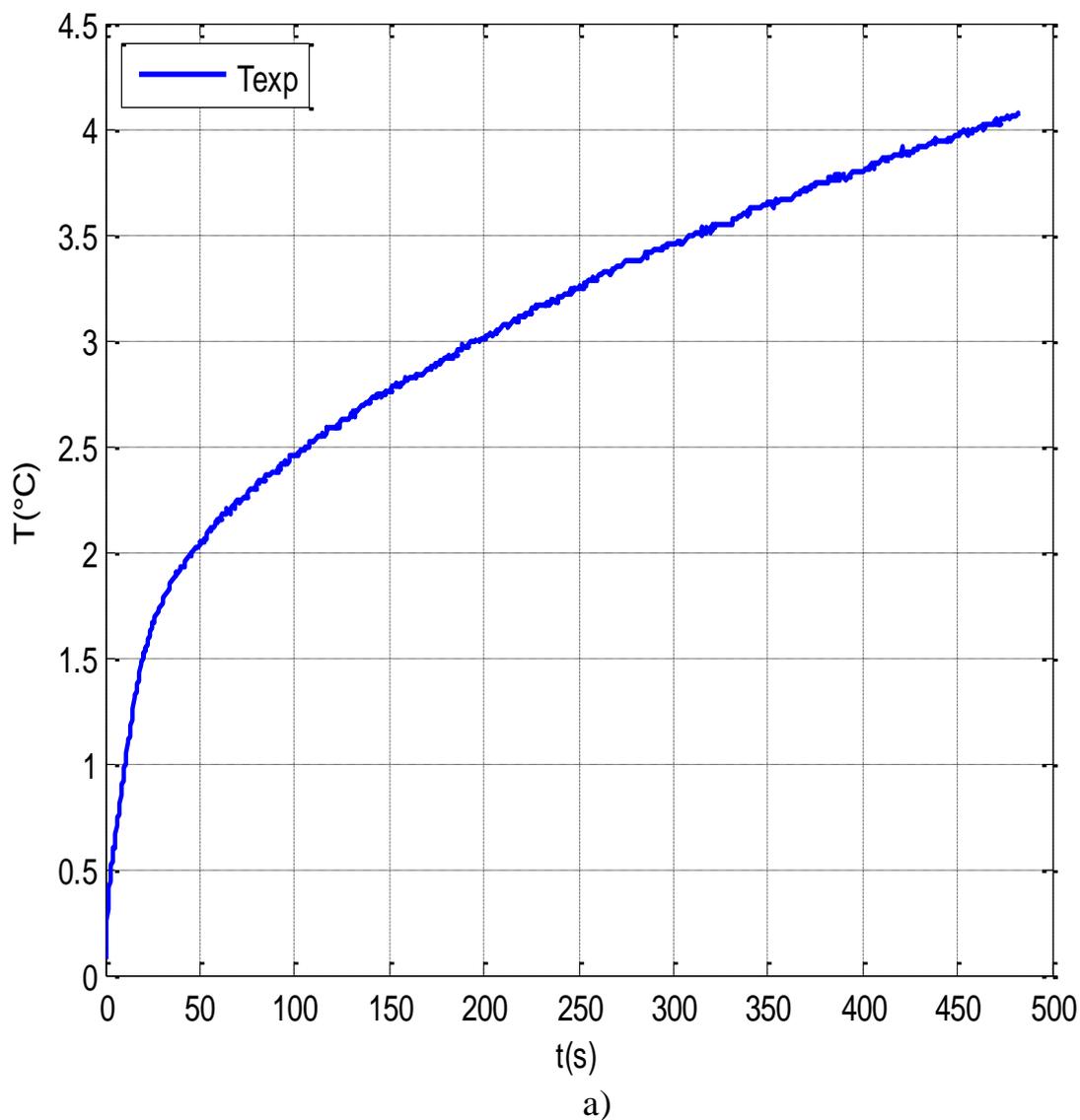


Figure III-1. Thermogramme expérimentale de température pour le poto-poto à 0 % de fibre de bambou

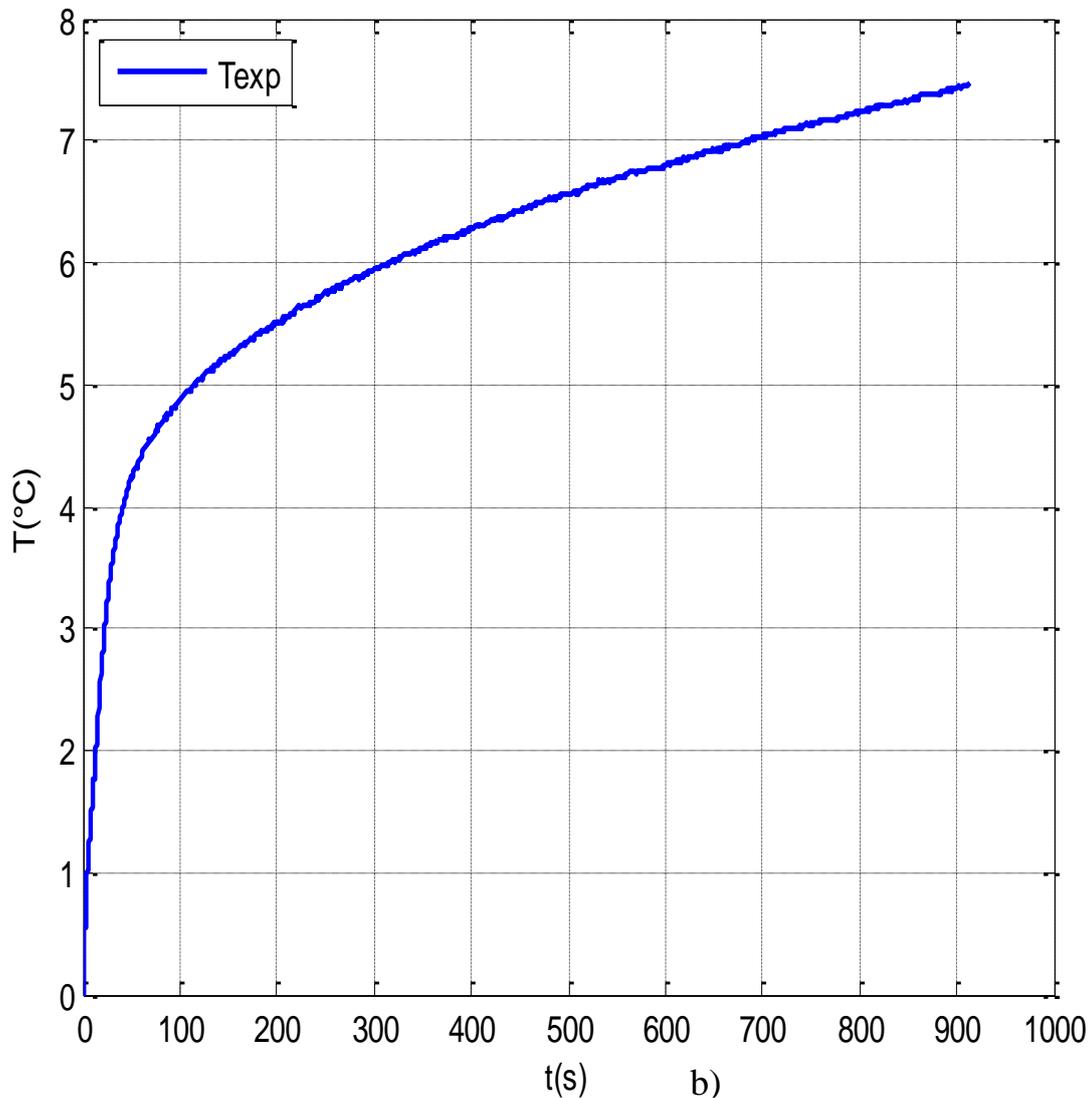


Figure III-2. Thermogramme expérimentale de température pour le poto-poto à 4 % de fibres de bambou

L'analyse de ces thermogrammes permet de remarquer que le thermogramme du matériau à 0% de fibre, présente une élévation de la température de 2°C entre 0 et 50s. Dans le même intervalle de temps, l'élévation de la température est de 4°C pour le matériau à 4% de fibres de bambou. Une explication plausible que l'on peut donner à ce phénomène est que le matériau à 0% de fibre est compact et induit une forte inertie thermique au passage du flux thermique. L'ajout des fibres de bambou augmente la porosité du matériau et par conséquent, le pourcentage de vide avec comme effet, le ralentissement de la propagation du flux de chaleur.

Notons également que dans le cas de la figure 3-2 pour le matériau à 4% de fibres (contrairement au matériau à 0% où l'échantillonnage de la sonde picolog était atteint), nous avons fait des enregistrements jusqu'à 1000s. Le but étant de vérifier si conformément au profil obtenu (qui est en accord avec celui du plan chaud, [Maillet et al., (2000), Jannot et al., (2006)]), on reste en 1D. Ainsi, sous réserve de l'apparition des effets 2D, on peut déjà, par exploitation des parties linéaires de ces thermogrammes expérimentales, déterminer E_{exp} et ρc_{pexp} . Une régression linéaire avec le logiciel Excel du thermogramme $T_{exp} = f(t)$ nous conduit à ρc_{pexp} et $T_{exp} = f(t^{1/2})$ nous conduit à E_{exp} , et ainsi aboutir à des valeurs de λ_{exp} .

3.1.3. Thermogrammes du modèle

3.1.3.1. Pré-estimation de E et ρC_p : Thermogramme de températures obtenues avec le modèle simplifié

Nous avons représenté les thermogrammes de températures expérimentales (en bleu) ; de températures du modèle (en rouge) et de température de l'hypothèse du milieu semi infini (en vert) (figure III-3).

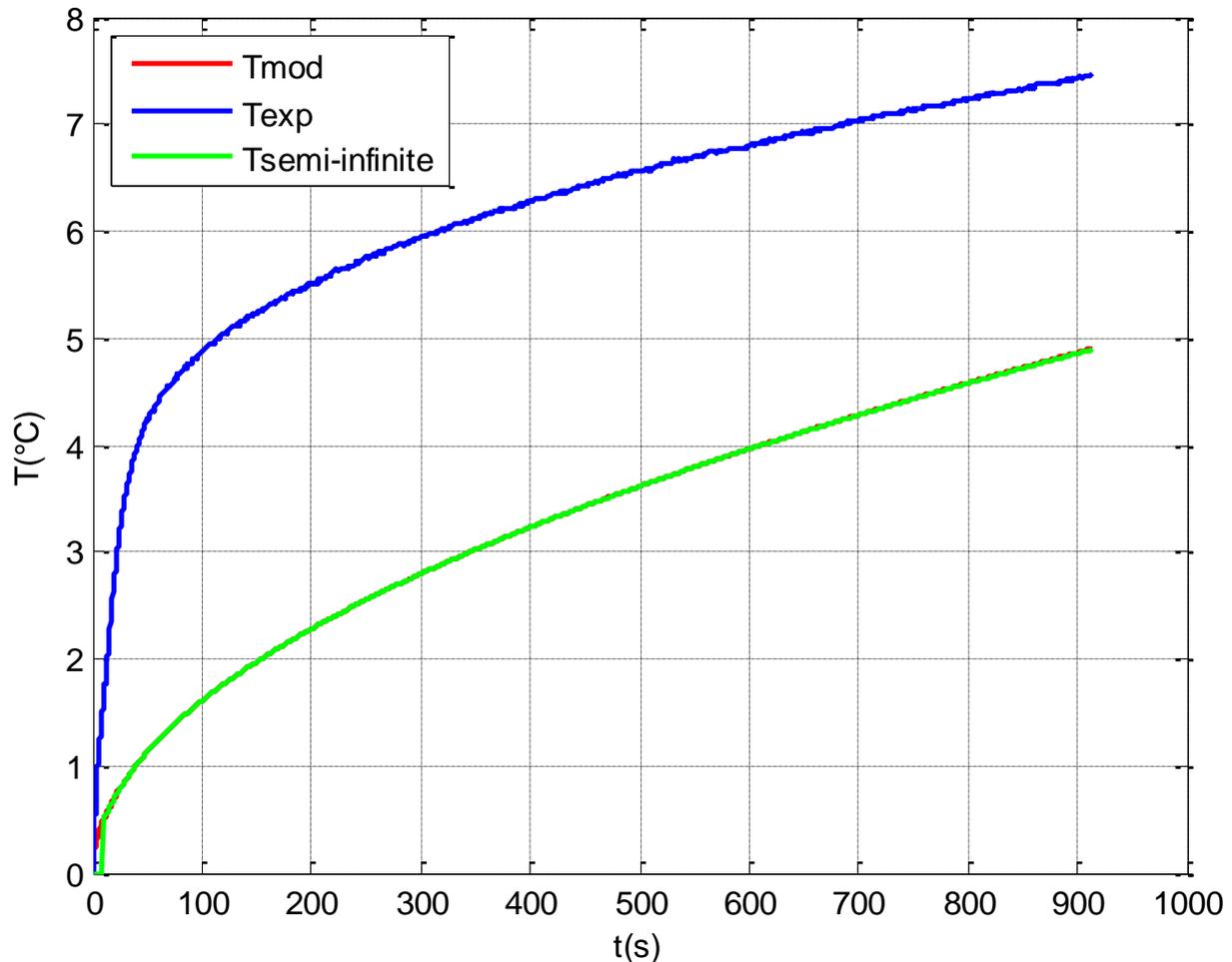


Figure III-3. Thermogrammes de température obtenus à partir des données expérimentales et des équations du modèle simplifié.

En analysant ces thermogrammes, on observe que les thermogrammes pour l'hypothèse du milieu semi infini $T_{\text{semiinfini}}$ et celle du modèle T_{exp} sont superposées jusqu'à 400s. Ceci indique bien qu'une évaluation de la pente α du thermogramme $T=f(t)$ (figure 3-3), peut permettre une bonne pré-estimation de l'effusivité thermique entre 100 et 150s.

Bien plus, lorsqu'on effectue une régression linéaire de la pente pour le thermogramme expérimentale (figure III-3 : courbe en rouge), on observe que la courbe est tangente à la pente dans cet intervalle de temps. De même l'exploitation de la partie linéaire du thermogramme $T=f(t)$ peut permettre une bonne pré-estimation de la capacité thermique volumique entre 300 et 400 s. On observe également que ce modèle ne minimise pas la somme des écarts

quadratiques entre T_{exp} et $T_{semiinfin}$. Ce qui justifie bien la nécessité de l'étude par le modèle complet.

La valeur fiable de la conductivité thermique ne peut être validée que s'il y a accord entre les résultats expérimentaux (thermogramme $T_{exp} = f(t^{1/2})$ et $T_{exp} = f(t)$) et le modèle développé, l'écart relatif acceptable étant de 8%. La modélisation du dispositif impose alors au préalable des valeurs d'entrée (E_{preest} et $(\rho c_p)_{preest}$). Par un critère de convergence, on déterminera alors la valeur vraie de λ qui sera comparée à la valeur estimée.

Dans la perspective de la validation des résultats obtenus, nous avons vérifié si les paramètres thermophysiques à déterminer sont décorrélés entre eux. Une étude des sensibilités réduite a donc été effectuée (figure III-3).

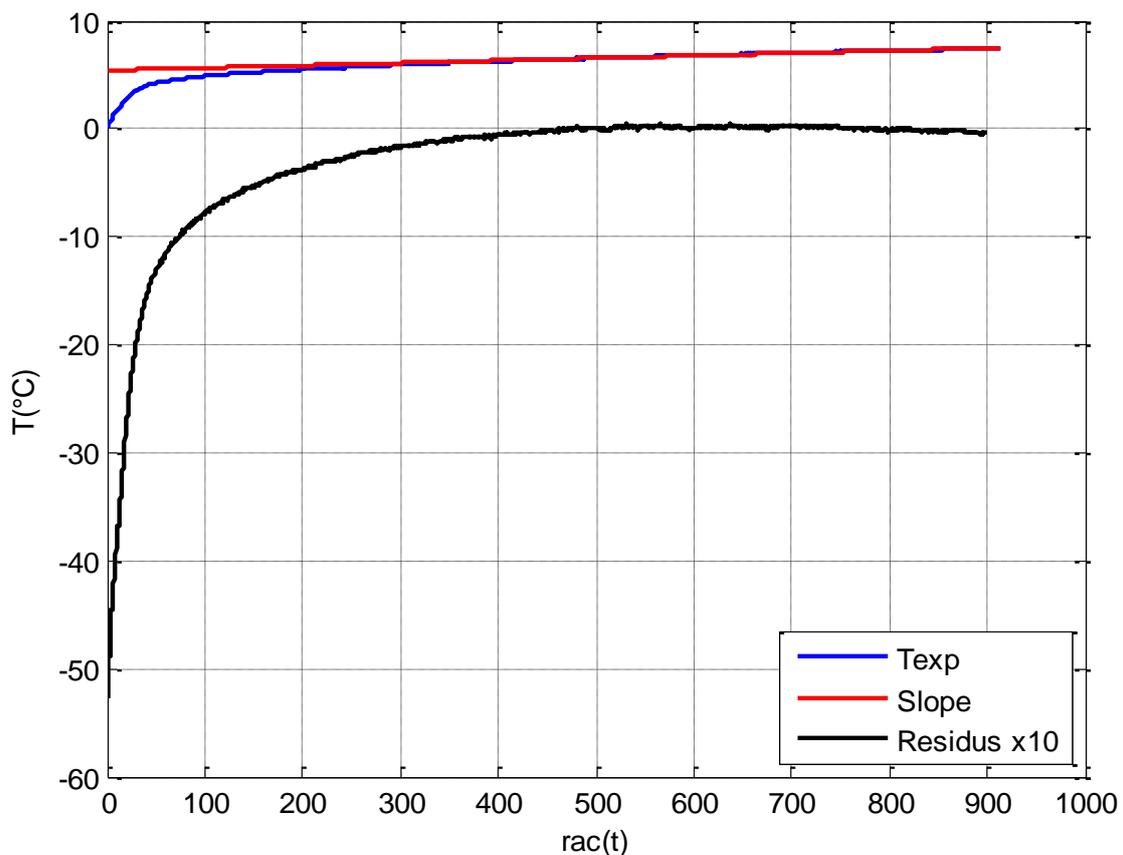


Figure III-4. Régression linéaire de la pente du thermogramme expérimentale

Les sensibilités réduites de ces deux paramètres n'étant pas corrélées, on observe une corrélation de la résistance thermique de contact, ce qui se justifie dans la mesure où le dispositif efficace de serrage fait tendre la résistance de contact vers zéro. En observant la courbe $T_{semiinfini} = f(t)$ de la figure III-4, on constate bien qu'à cause de son inertie thermique au début de l'enregistrement, il y a une corrélation entre la courbe des résidus de ρc_p (courbe en rouge) et celle de la résistance thermique (courbe en bleu), c'est la raison pour laquelle son estimation ne peut se faire qu'aux temps longs (entre 300 et 400 s) où la décorrélation est bien manifeste.

3.1.3.2. Estimation à partir du modèle complet

Une simulation numérique avec le modèle complet en prenant comme valeurs initiales de E et ρC_p , celles pré-estimées à partir du modèle simplifié, montre bien qu'il y a convergence (figure III-5) entre les températures expérimentales et la température du modèle.

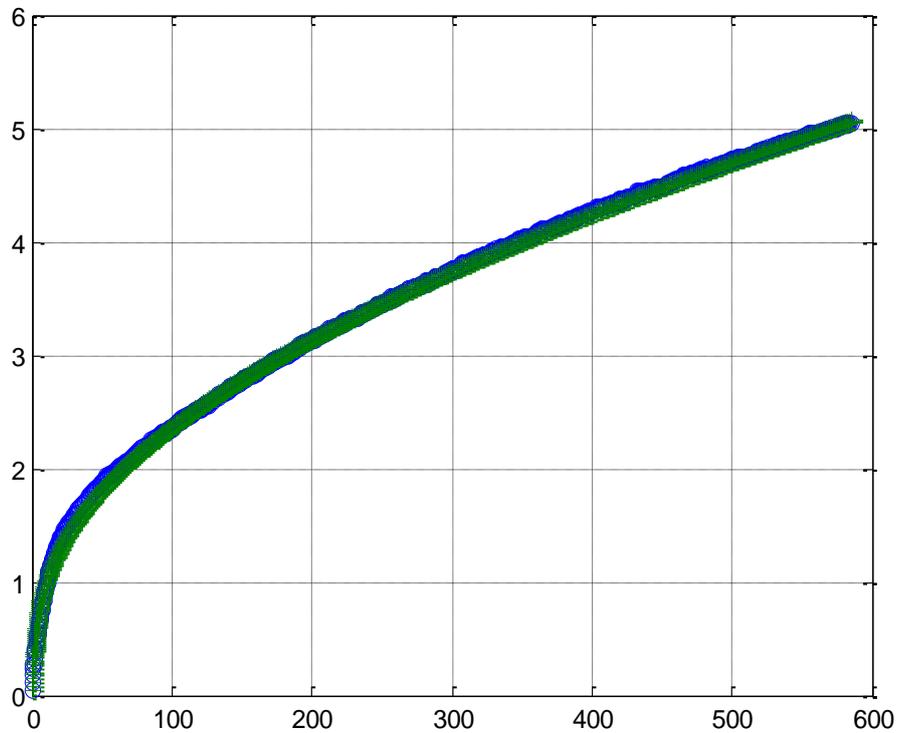


Figure III-5. Critère de convergence

Les thermogrammes $T=f(t)$ obtenus à partir du modèle complet pour les échantillons à 0%, 4% et 6% sont présentés sur les figures III-6 à III-10 ci-dessous de même que leurs sensibilités réduites aux paramètres E , ρC_p et SR_c .

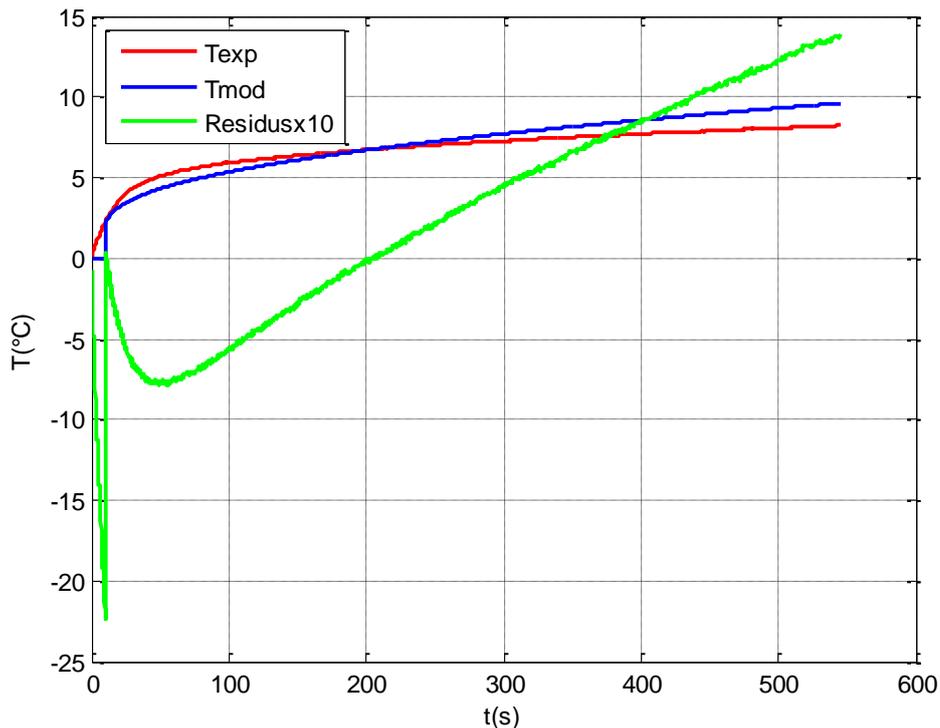


Figure III-6. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenu à partir du modèle complet à 0 % de fibre de bambou

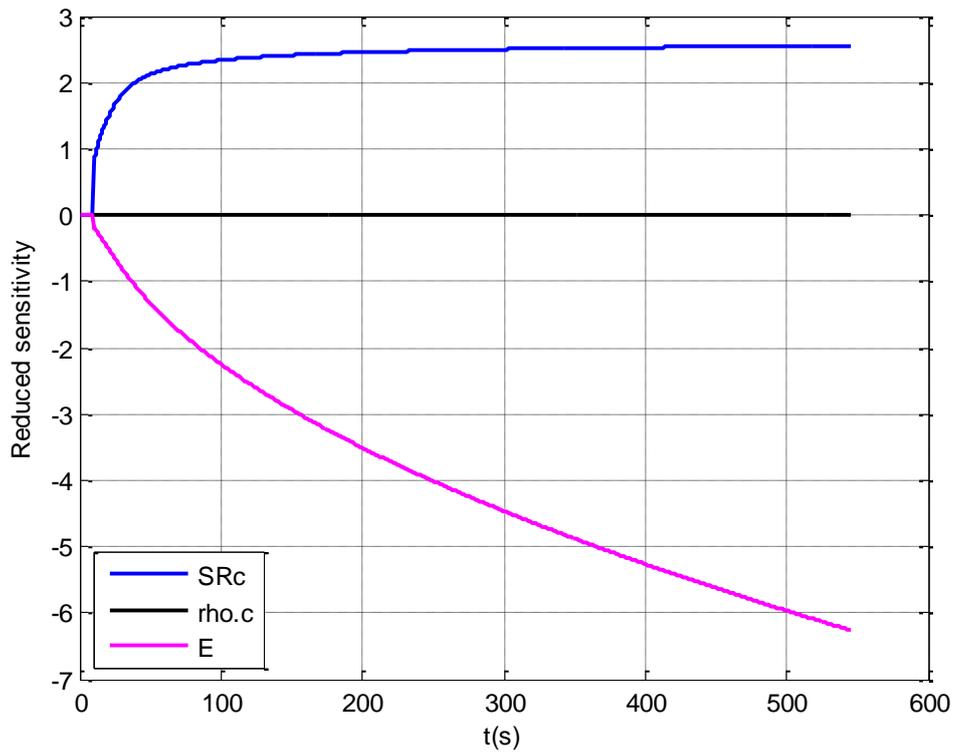


Figure III-7. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 0 % de fibre de bambou

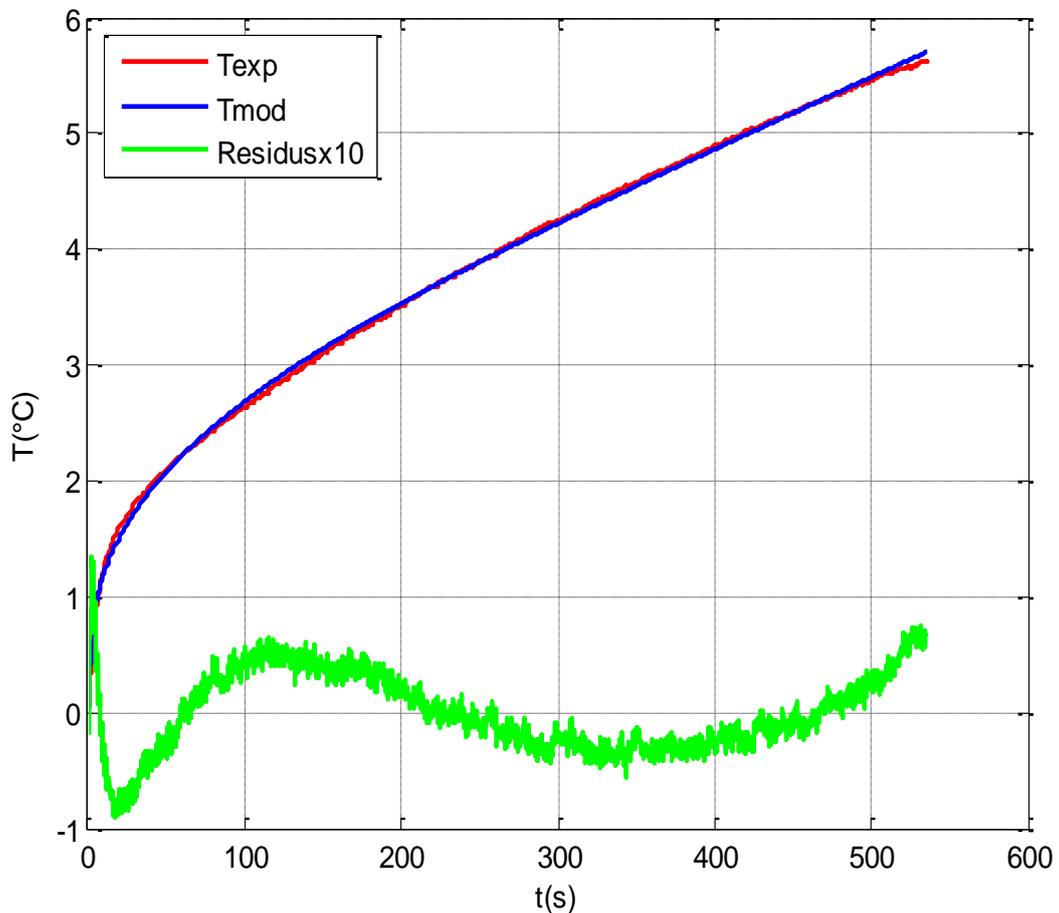


Figure III-8. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenus à partir du modèle complet à 4% de fibre de bambou

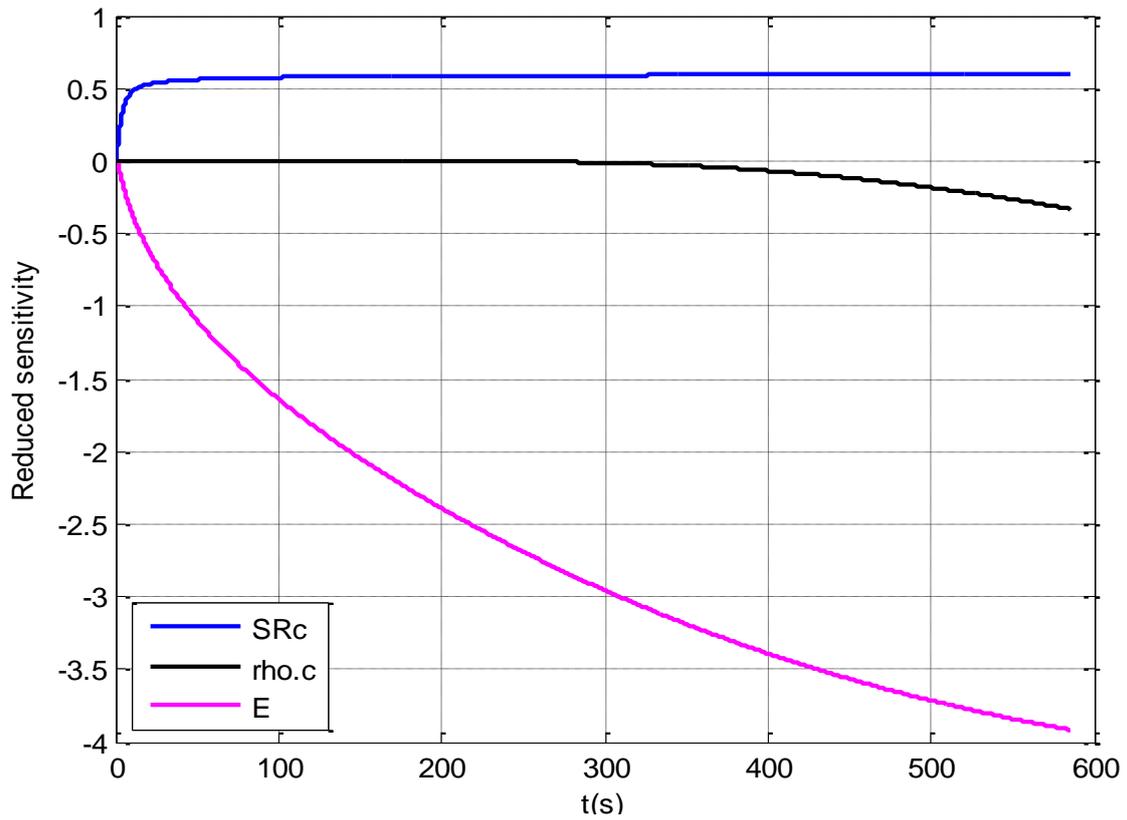


Figure III-9. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 4% de fibre de bambou

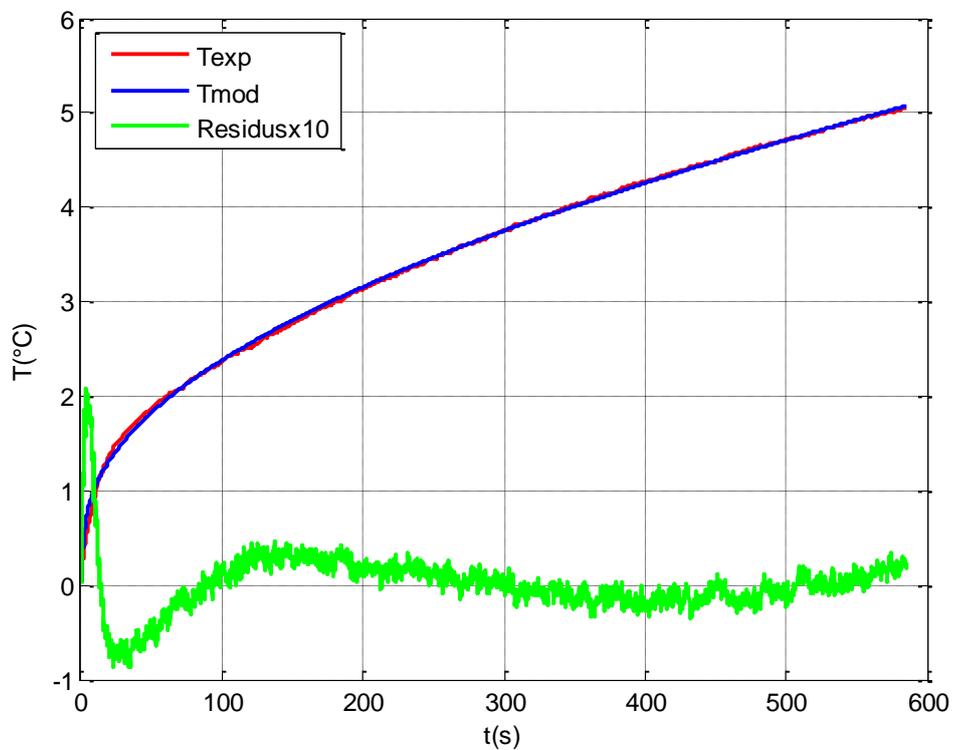


Figure III-10. Thermogrammes de températures $T=f(t)$ et résidus obtenu à partir du modèle complet à 6% de fibre de bambou

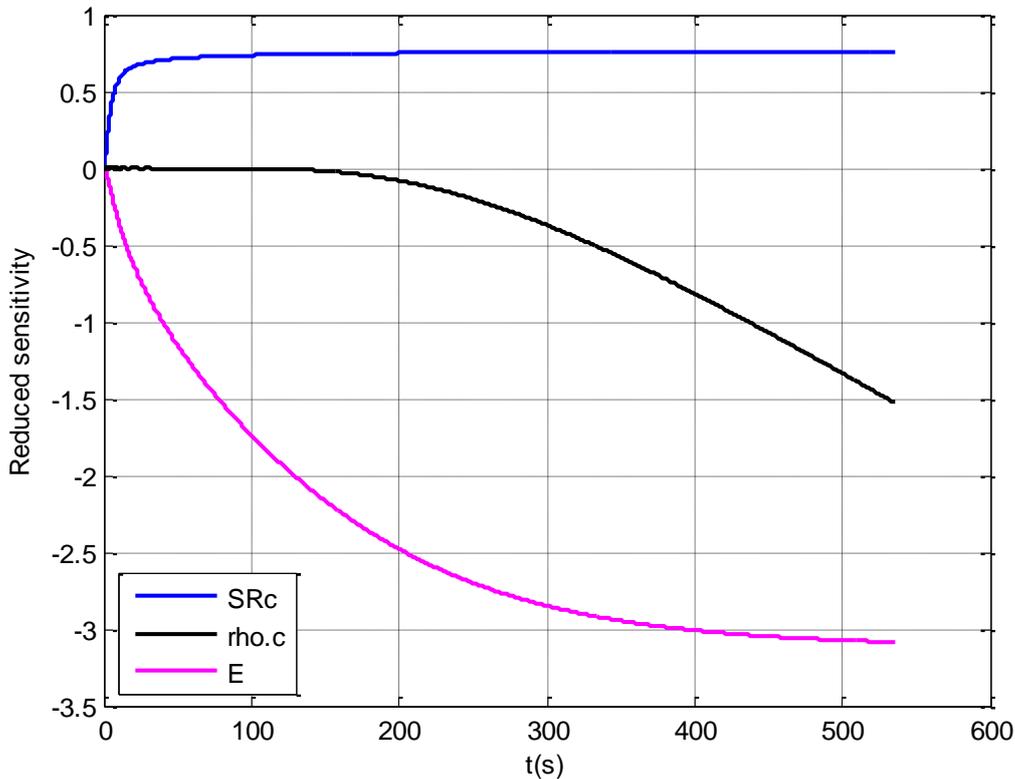


Figure III-11. Courbe de sensibilités réduites aux paramètres à 6% de fibre de bambou

La première analyse qu'on peut faire à l'observation de ces thermogrammes révèle que le modèle complet minimise bien les écarts quadratiques entre la courbe expérimentale et la courbe du modèle. Pour le matériau référence (0% en fibre), on observe que les écarts quadratiques entre T_{exp} et T_{mod} sont encore bien élevés. La courbe des résidus (figure III-6 : courbe en vert) le justifie davantage, dans la mesure où on a des biais très élevés autour de zéro. Aussi, on observe des fortes corrélations des paramètres aux sensibilités réduites (figure III-7). Ceci peut se justifier, dans la mesure où la terre utilisée n'est pas latéritique et donc moins poreuse. Une autre raison qui pourrait justifier cette non convergence des résidus d'estimation entre T_{exp} et T_{est} , est la qualité du matériau. Comme on a pu l'observer notre matériau présente des fissures non négligeables dues au retrait pendant la période de curage. L'apparition de ces fissures ne favorisent donc pas la diffusion du flux thermique au centre de la sonde, créant très rapidement des transferts 2D et 3D autour du centre de l'échantillon.

Toutefois, on note une nette amélioration de la courbe des résidus (figure III-8 et III-10), au fur et à mesure qu'on ajoute au matériau les fibres de bambou. De même, une décorrélation des paramètres E et ρC_p est observé sur la courbe des sensibilités réduites. A la figure III-7, on observe une nette amélioration des résidus, mais l'inertie de la sonde est encore très élevée (autour de 100 s). Ce qui nécessite un temps de chauffage très long. L'analyse des courbes de résidus justifie donc le fait que malgré que les thermogrammes $T=f(t)$ et $T_{exp}=f(t)$ soient superposés jusqu'à 400 s, une bonne estimation des paramètres ne peut se faire qu'entre 300 et 400 s pour figure III-6 et entre 500 et 550 s pour figure III-8.

Il convient de noter que la bonne estimation de la conductivité thermique par le modèle complet est fiable lorsque la différence relative ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$) entre λ_{preest} et λ_{est} est inférieure à 8% [Boubekeur and Houben, (1998)].

Les paramètres thermiques et mécaniques expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau ci-contre.

3.1.4. Paramètre thermophysiques du potopoto

Tableau III-4: Résultats expérimentaux de la caractérisation thermophysique et mécanique.

	simplifié	complet	simplifié	complet	simplifié	complet	Différence	R_c	R_f	E_l
	$E (J m^{-2} K^{-1} s^{-1/2})$	$E (J m^{-2} K^{-1} s^{-1/2})$	$\rho C_p (J m^{-3} kg^{-1})$	$\rho C_p (J m^{-3} kg^{-1})$	$\lambda (W m^{-1} K^{-1})$	$\lambda (W m^{-1} K^{-1})$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} (\%)$	MPa	MPa	MPa
0 %	1484,82	1506,96	2070088	2070000	1,065	1,097	3,009	5,25	0,82	126,93
2 %	1408,58	1422,36	2056237	2059776	0,965	0,982	1,791	6,78	2,90	20,62
4 %	1330,21	1443,27	2160000	2160036	0,819	0,964	17,719	7,42	5,95	50,60
6 %	2001,15	1921,46	5680048,13	5680013,13	0,705	0,650	7,805	5,94	8,26	79,42

E : effusivité thermique, λ : conductivité thermique, ρC_p : capacité thermique volumique, E_l : module d'élasticité, R_c : résistance à la compression, R_f : résistance à la flexion

Les résultats expérimentaux de la conductivité thermique obtenus montrent bien que l'ajout des fibres a une forte influence sur les propriétés isolantes de ce matériau. La conductivité thermique diminue avec l'ajout des fibres de bambou comme on peut le voir sur la figure III-11.

Bien que les différentes valeurs obtenues de la conductivité thermique soient plus grande que celles du parpaing fait à base de pouzzolane ($0,54 Wm^{-1}K^{-1}$) (Damfeu et al., 2017), il est à relever que nos échantillons à 6% de fibres présentent une conductivité thermique de $0,65 Wm^{-1}K^{-1}$, bien en deçà de celle des agglomérés de parpaings de sable ordinaires ($1,12 Wm^{-1}K^{-1}$) (Meukam et al., 2003) généralement utilisés au Cameroun et particulièrement dans en zone urbaine et périurbaine. De ce fait, à cette teneur (6% en fibre), le potopoto peut être considéré comme un bon isolant thermique par rapport aux agglomérés de parpaings, et dès lors, son utilisation comme matériau de remplissage de l'enveloppe du bâtiment serait bénéfique en termes d'économie d'énergie lors des processus de climatisation.

Notons également qu'avec sa forte inertie thermique ($5680048,13 Jm^{-3}kg^{-1}$), il peut grandement contribuer au phénomène de la ventilation nocturne.

Les données sur la conductivité thermique de certains matériaux de construction courants au Cameroun répertoriées dans le tableau III-5, indiquent que le potopoto est plutôt bien classé thermiquement parlant.

Tableau III-5: Conductivité thermique de certains matériaux de construction au Cameroun.

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda (W/m.K)$
Brique de terre stabilisée	0.6
Brique de terre cuite	0.9
BTC stabilisée à la chaux	1
Parpaing de sable	1.12
BTC stabilisée au ciment	1.2

En effet, avec une conductivité thermique de 0.65 W/m.K, l'usage du poto-poto à 6% de fibres de bambou est, du point de vue de l'isolation thermique, plus avantageux que celui de la brique de terre cuite, de la brique de terre comprimée stabilisée ou encore du parpaing de sable.

Du point de vue mécanique, les normes recommandent à travers la MIPROMALO (Mission de Promotion des Matériaux Locaux), pour des matériaux de remplissage, une résistance de compression à 7 jours supérieure à 2 MPa [Zannou (2003)], bien que pour des matériaux utilisés en remplissage et non à structure porteuse, on accepte des résistances de compression telle que $0.6 \leq R_c \leq 1$ MPa.

Les résultats expérimentaux de résistance en compression de nos échantillons montrent que l'ajout des fibres contribue à optimiser la dureté du poto-poto.: $R_c > 2$ MPa. Leurs résistances à la compression sont conformes aux normes requises pour le remplissage des enveloppes de bâtiments [Bilong et al., (2009)]. L'ajout des fibres de bambou augmente la résistance en compression du poto-poto (voir figure III-12).

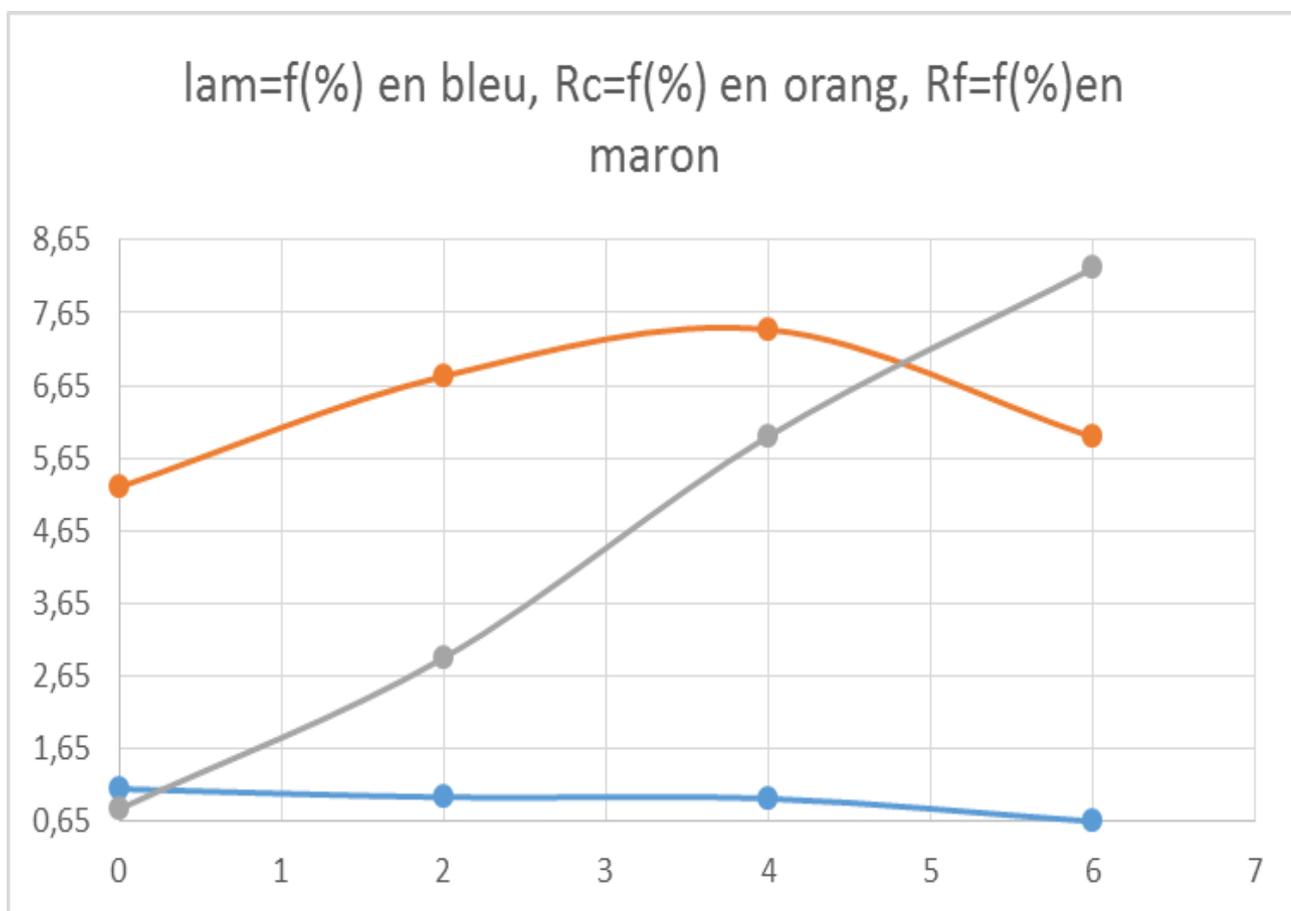


Figure III-12. Evolution de la conductivité thermique (en bleu) ; de la résistance en compression (orange) et de la résistance en flexion (marron) en fonction de la teneur en fibre de bambou

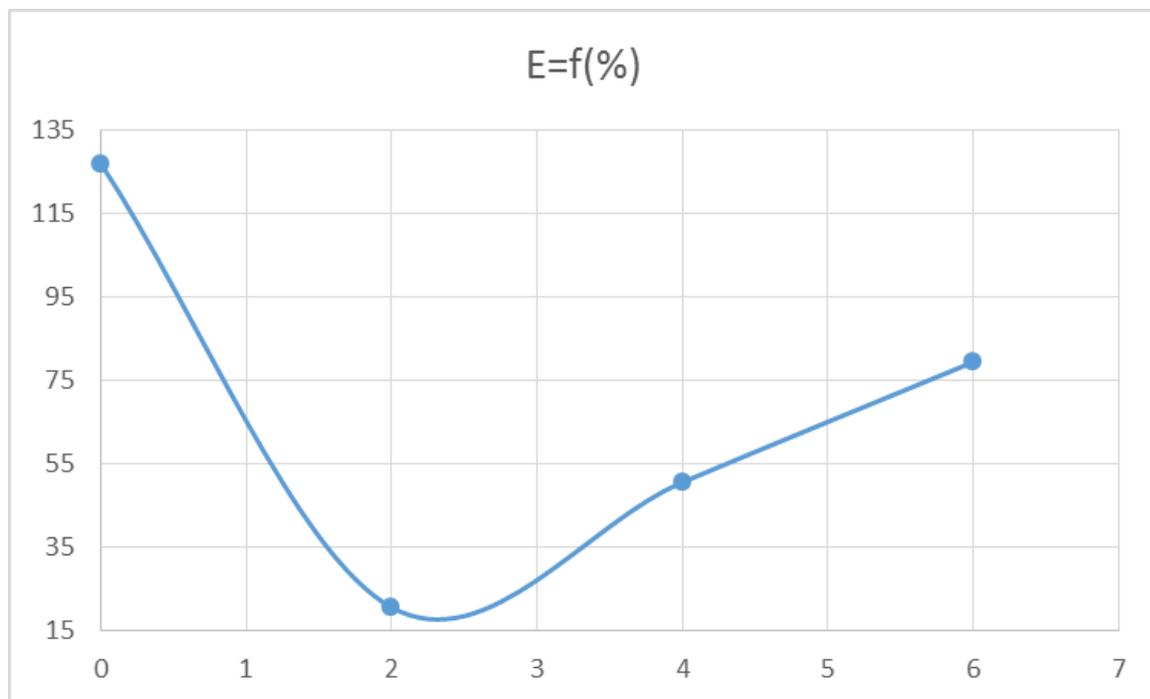


Figure III-13. Evolution du module d'élasticité en fonction de la teneur en fibre de bambou

On remarque au-delà de 6% d'ajout de fibre, la résistance de compression du matériau, baisse. Cette observation se justifie dans la mesure où nous avons remarqué qu'à plus de 6% en fibre, le matériau pendant sa période de curage tend à se bomber et se fissure donc rapidement du fait de la faible quantité de terre. Notons également que les fibres ont été placées longitudinalement dans le matériau, ce qui a donc tendance à le rendre plus flexible. En observant l'évolution de la résistance en flexion, on se rend compte qu'elle croît en fonction de l'ajout des fibres. L'ajout des fibres contribue donc à assurer au matériau composite une non rupture rapide lorsqu'il est soumis à certaines contraintes. Ceci est visible sur la courbe d'évolution du module d'élasticité (figure III-13) où on constate bien que pour le matériau à 0 %, le module d'élasticité est très élevé. Elle diminue alors légèrement suite à l'ajout des fibres (2%, 4%) et commence encore à augmenter rapidement au-delà d'une teneur de 6%, traduisant le fait que le bon compromis terre-fibre se situe à un taux maximum de 6%.

Les résultats obtenus ont montré également que l'ajout de fibres au matériau jusqu'à une teneur maximale de 6% peut non seulement améliorer les performances d'isolation thermique de ces matériaux et donc contribuer aux économies d'énergie dans le bâtiment lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux de remplissage, mais aussi qu'ils sont conformes aux exigences du MIPROMALO, puisqu'ils ont une résistance à la compression supérieure à 2MPa.

L'étude du module d'Young a justifié le fait que l'ajout de fibres au-delà de 6 % entraînerait une défaillance précoce du matériau s'il était utilisé comme charge.

3.2. Résultats de mesures du coefficient d'absorption acoustique

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques acoustiques d'un mur de poto-poto dont les paramètres physiques sont donnés dans le tableau III-6.

Ces valeurs ont été évaluées à partir d'essais géotechniques réalisés en laboratoire, en particulier le module d'élasticité, la porosité, le coefficient de poisson et la densité. La tortuosité a été déterminée à partir de la relation 2.53 qui relie la tortuosité et la porosité. Les coefficients de Biot à partir des relations 2.55 et 2.56.

Pour le module d'élasticité, avec le laboratoire MIPROMALO (Mission de Promotion des Matériaux Locaux), nous avons réalisé des essais de flexion en écrasant l'échantillon et en mesurant simultanément les contraintes de déformation pendant l'essai. La norme ARS681 : 1996 BTC définissant les contraintes de capture tandis que les normes EN2562 (10% et 50%) et EN2746 (10% et 25%) définissent la déformation.

Tableau III-6. Certains caractéristiques physiques du matériau poto-poto

Densité de la phase fluide	Coefficient de poisson	Tortuosité	Modules d'incompressibilité des grains solide
1184 kg/m ³	0.32	1,22	40 000 MPa
Porosité	Premier coefficient de Biot	Module de Young	Second coefficient de Biot
0.663	5270 MPa	79.4 MPa	0,72
Module d'incompressibilité de la phase fluide	Densité de la phase solide	Perméabilité hydraulique du milieu	
2200 MPa	1950 kg/m ³	1e-7 m ³ .s/kg	

La figure III-14 présente la géométrie bidimensionnelle du problème. Le maillage est réalisé avec des éléments quadrangulaires pour le solide et avec des éléments linéaires à 2 nœuds pour le fluide. Les conditions de Dirichlet correspondant à des déplacements nuls (conditions de surface infiniment rigide) pour la phase solide sont imposées à droite de la paroi du poto-poto. La source sonore correspondant aux conditions de Neuman est une onde plane normale à la surface commune entre le fluide et le solide.

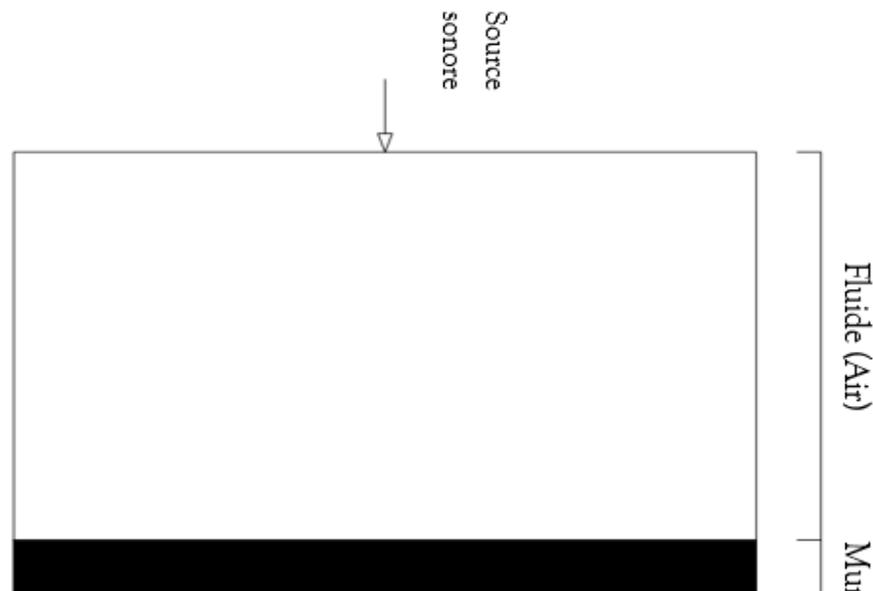


Figure III-14. Géométrie du model acoustique du Mur (Poto-Poto)

3.2.1. Les résultats de simulations numériques

Les Figure III-15, III-16 et III-18 ci-dessous montrent les courbes de simulation numérique de l'absorption de notre matériau à divers épaisseur (3cm, 4cm and 5cm) dosé à 2%, 4% et 6% de fibres de bambou respectivement.

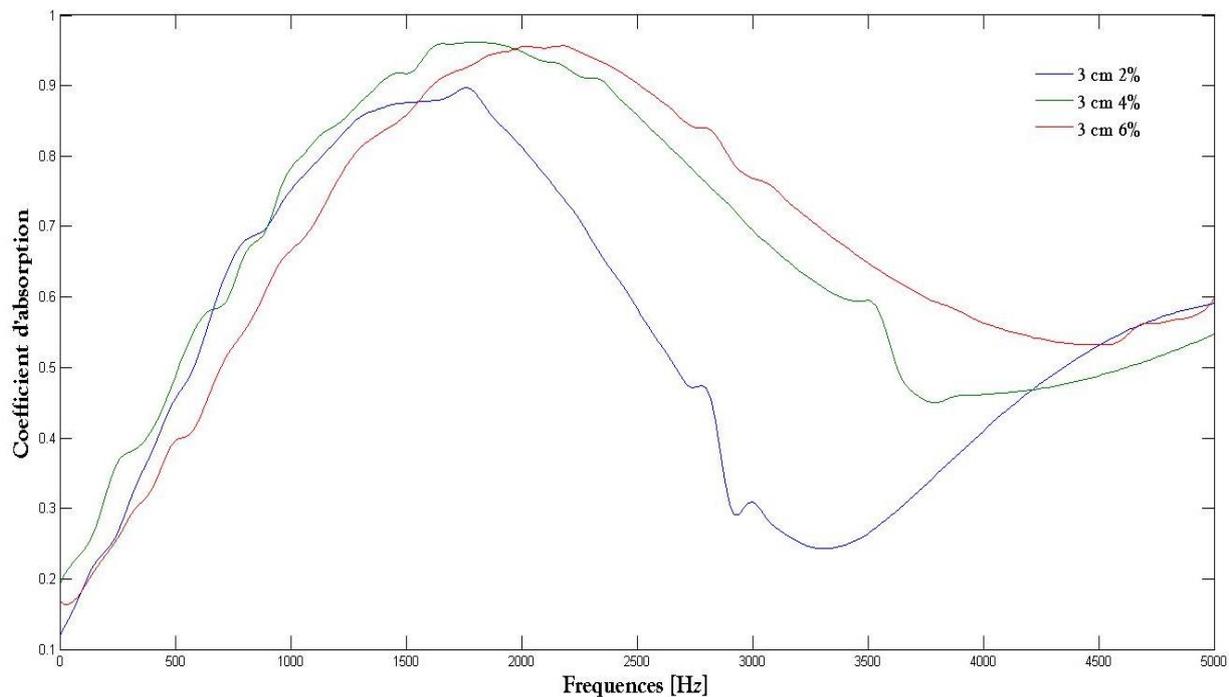


Figure III-15. Simulation de coefficients d'absorption acoustique

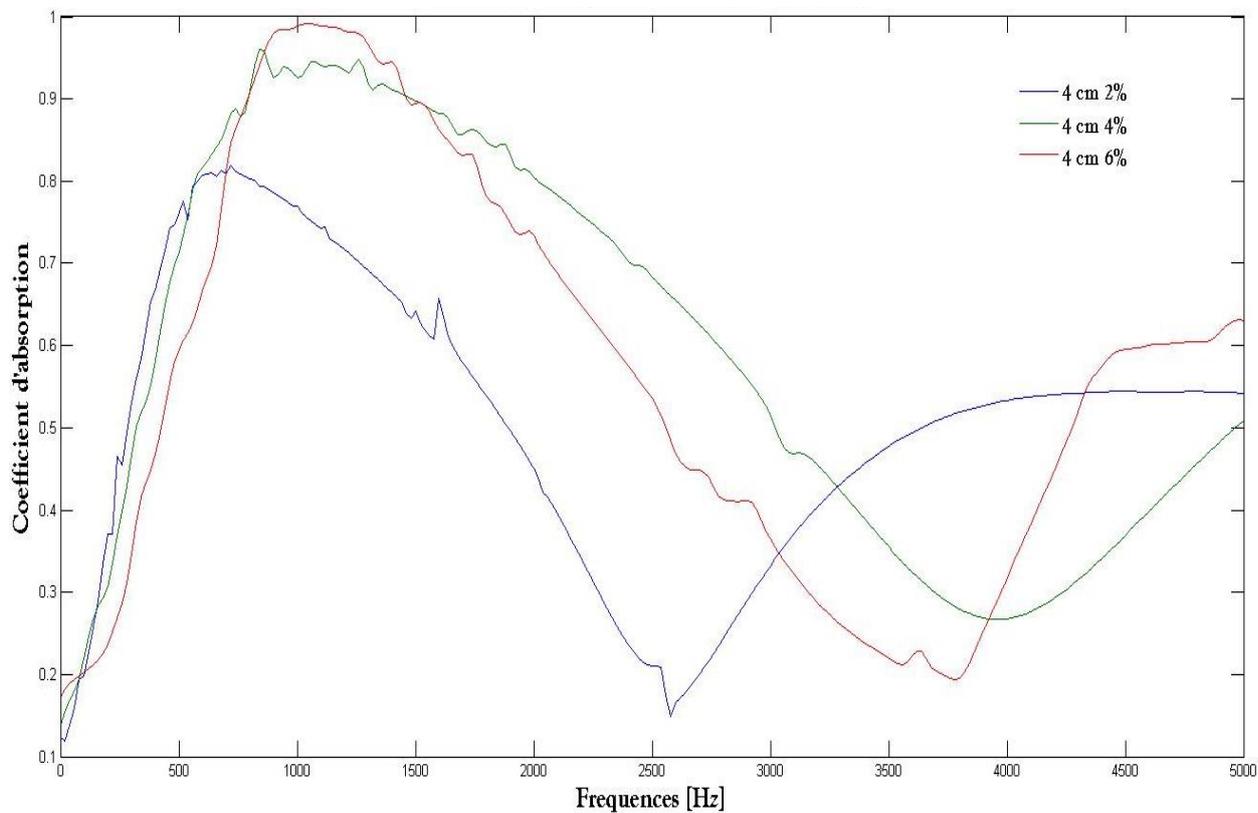


Figure III-16. Simulation de coefficients d'absorption acoustique

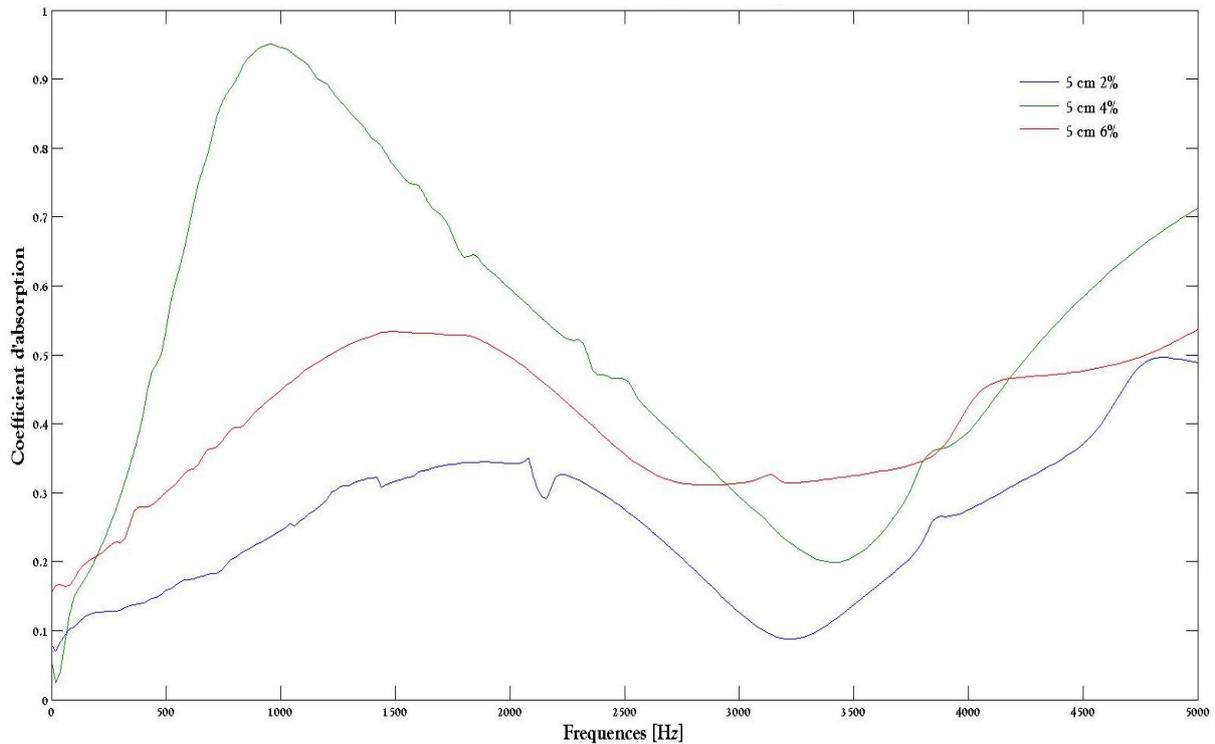


Figure III-18. Simulation de coefficients d'absorption acoustique pour un maillage

En observant ces trois courbes, il est facile de remarquer que l'absorption augmente avec l'augmentation des fibres de bambou, ceci s'explique par l'élargissement (étirement) des courbes 4% et 6% par rapport à la courbe 2%.

Les mêmes observations peuvent être faites sur les courbes pour les modèles de 4cm et 5cm, à savoir que l'absorption augmente avec l'augmentation des fibres de bambou comme on peut le voir sur les courbes de 4% et 6% par rapport à la courbe de 2% dans la gamme de fréquence 500-1500 Hz. Nous pouvons voir que l'échantillon de 5cm d'épaisseur avec 4% de fibres de bambou a une absorption sonore correcte par rapport à 2% et 6%. Nous pourrions conclure que 4% est le pourcentage optimal pour une épaisseur de 5cm.

De ces différentes courbes, nous pouvons tirer quelques observations :

- ☞ En général, les simulations numériques montrent qu'un maximum d'absorption est observé dans la zone de fréquence [500-1500 Hz] environ, sauf pour le cas de 5cm avec 2% et 6% de fibres de bambou dont l'aspect ne nous semble pas crédible.
- ☞ Lorsque l'épaisseur augmente, cette zone d'absorption se déplace vers les basses fréquences.
- ☞ En dehors de cette zone, l'absorption est moyenne aux basses fréquences et diminue fortement aux hautes fréquences après 1500 Hz.
- ☞ Lorsque la teneur en fibres de bambou augmente, l'absorption augmente dans cette zone [500-1500 Hz].

3.2.2. Résultats des mesures expérimentales du coefficient d'absorption acoustique des échantillons à l'aide du tube de Kundt (tube à ondes stationnaires).

Afin de consolider les résultats numériques obtenus, nous avons confectionné des éprouvettes de poto-poto et nous y avons effectué des mesures en laboratoire du coefficient d'absorption acoustique à l'aide du tube de Kundt (tube à ondes stationnaires).

Les mesures ont été réalisées en deux hypothèses : l'influence de l'épaisseur et l'influence de l'ajout des fibres de bambou sur l'absorption acoustique.

I- l'influence de l'épaisseur du matériau sur le coefficient d'absorption acoustique

Les échantillons ont été placés dans le porte échantillon de 3cm de diamètre. Les mesures ont été réalisées à des fréquences (son pur) correspondantes aux fréquences centrales des 1/3 d'octave sauf pour les échantillons de 3 cm en basses fréquences pour lesquelles on a observé des ventres d'absorption inexplicables. Ce qui nous a obligé de légèrement décaler ces fréquences : 180 Hz au lieu de 200 Hz, 260 Hz au lieu de 250 Hz et 360 au lieu de 400 Hz.

Les valeurs des nœuds et des ventres de pression acoustique ont été mesurées plusieurs fois pour un même échantillon, ce qui a permis d'avoir des écarts-types.

Les figures III-19, III-20 et III-21 présentent respectivement l'évolution de l'absorption acoustique du poto-poto à des épaisseurs de 3 cm, 4 cm et 5cm.

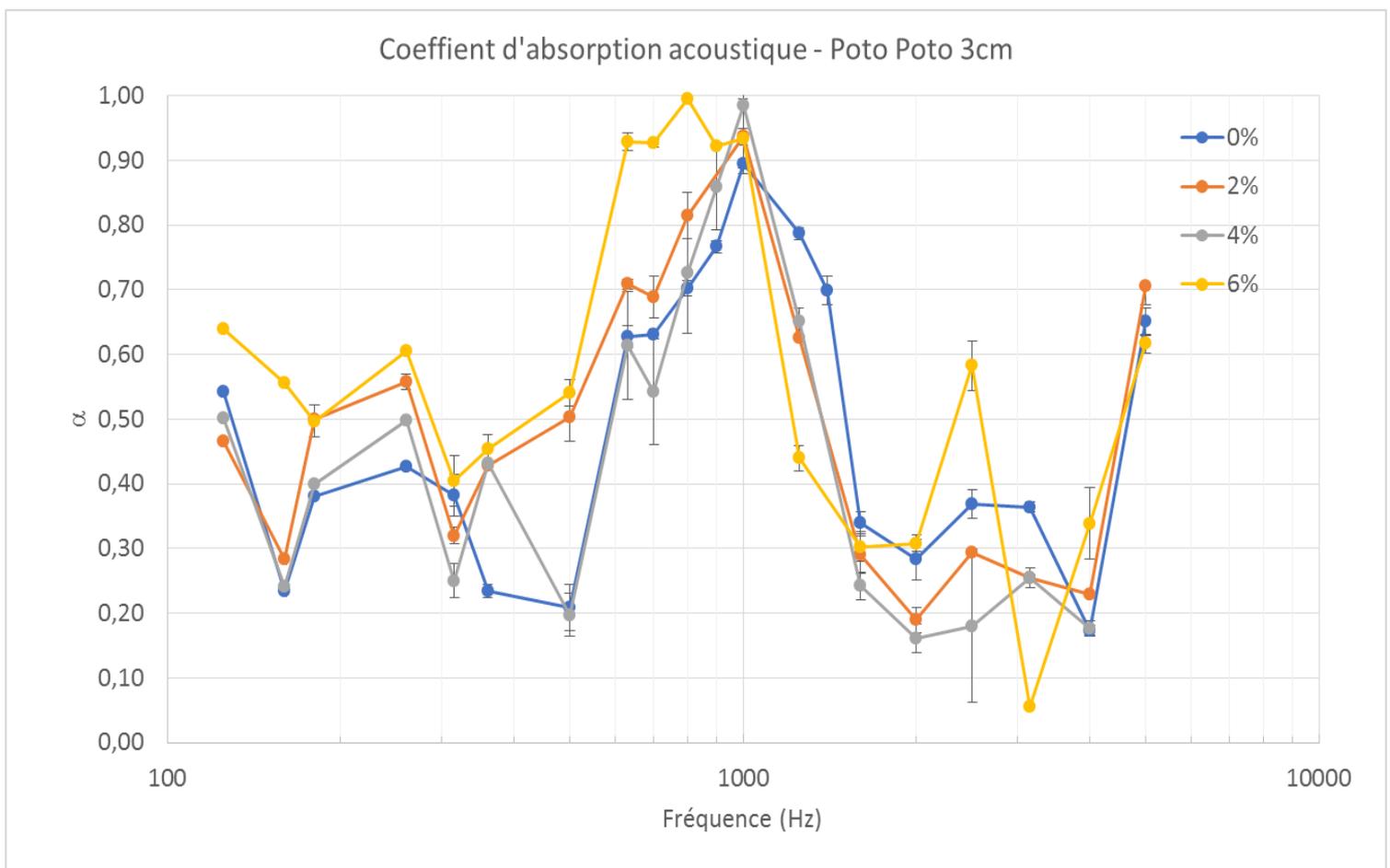


Figure III-19. Coefficient d'absorption du poto-poto à 3cm d'épaisseur

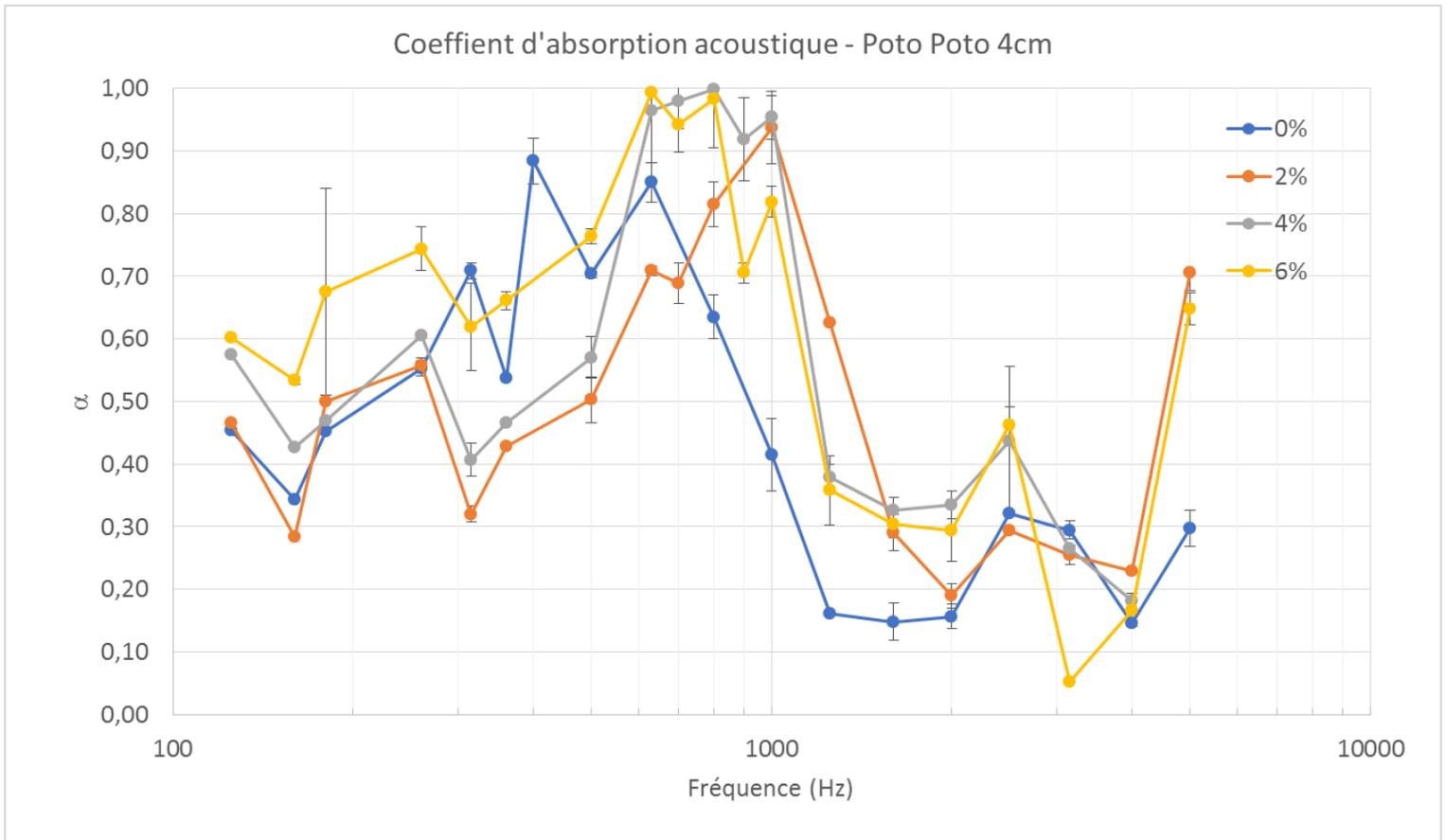


Figure III-20. Coefficient d'absorption du poto-poto à 4 cm d'épaisseur

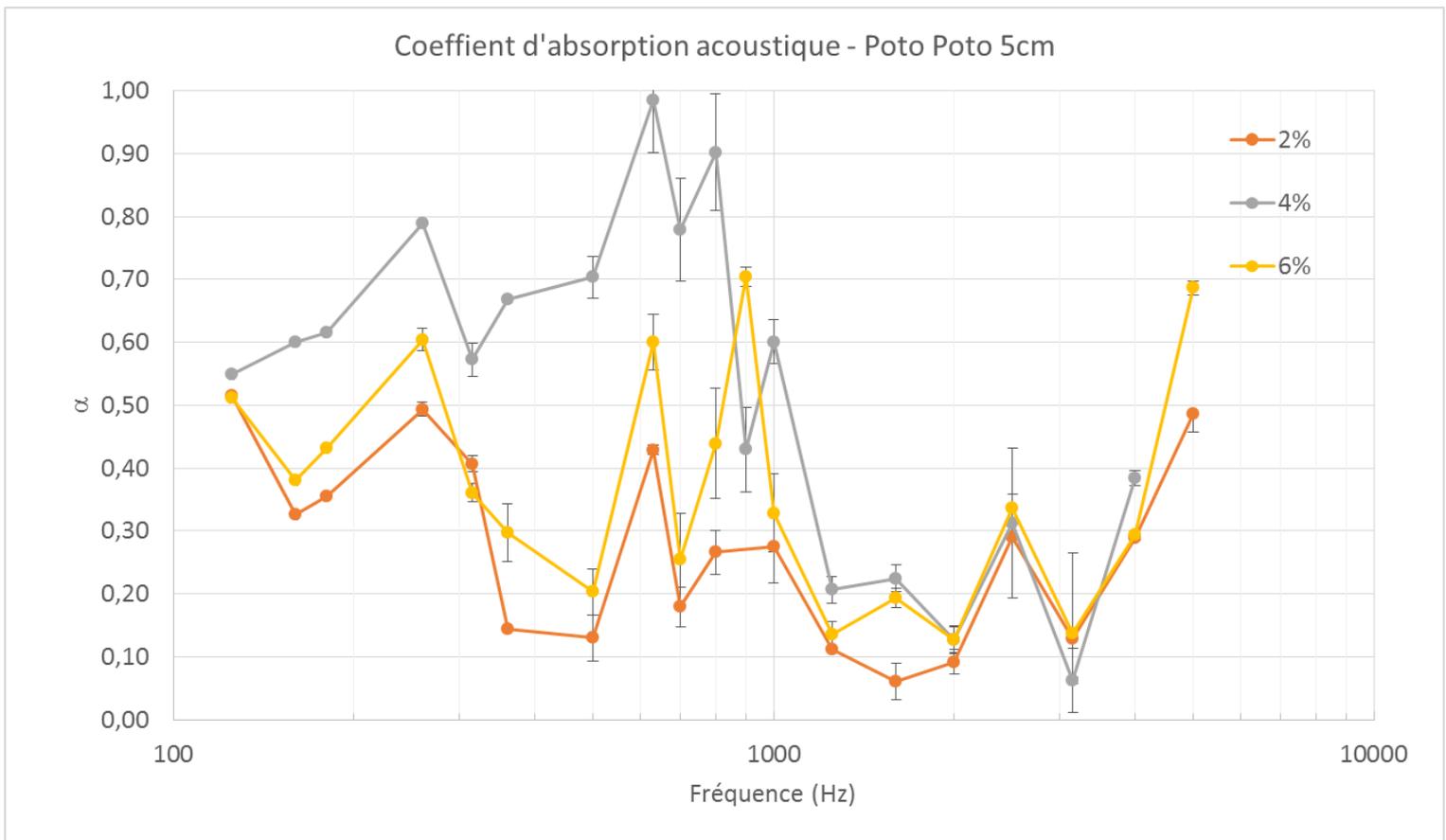


Figure III-21. Coefficient d'absorption du poto-poto à 5 cm d'épaisseur

Les observations que l'on peut faire sont de deux ordres :

- ✓ Pour l'ensemble des échantillons étudiés, un maximum d'absorption a été observé autour de la zone fréquentielle [500-1250 Hz] environ.
- ✓ Plus l'épaisseur augmente, plus cette zone d'absorption se décale vers les basses fréquences.

II- Influence de l'ajout des fibres de bambou sur l'absorption acoustique

L'influence de l'ajout des fibres de bambou sur l'absorption acoustique du poto-poto a été mesurée et les résultats sont présentés sur les figures III-22, III-23 et III-24.

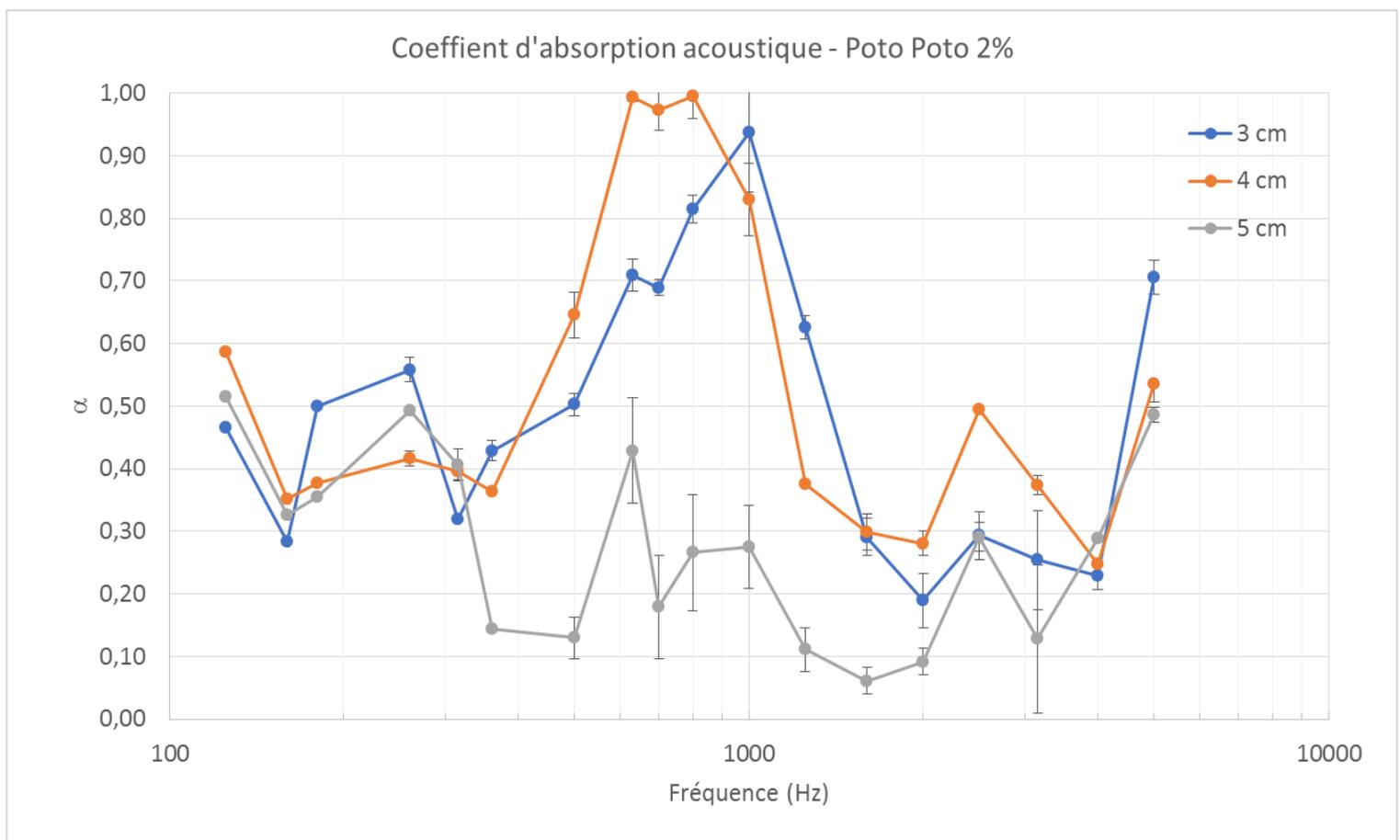


Figure III-22. Coefficient d'absorption du poto-poto à 2% de fibres de bambou

Coefficient d'absorption acoustique - Poto Poto 4%

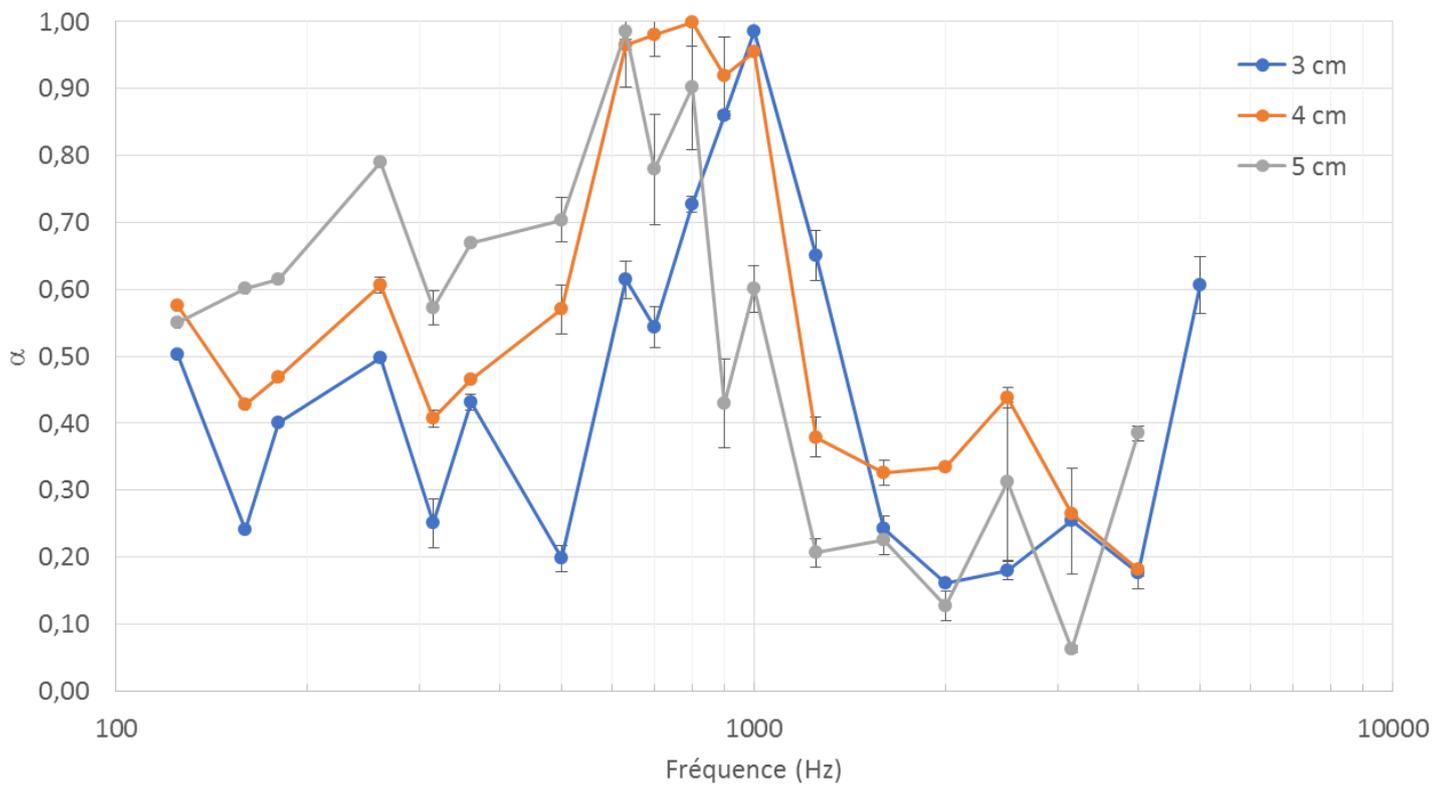


Figure III-23. Coefficient d'absorption du poto-poto à 4% de fibres de bambou

Coefficient d'absorption acoustique - Poto Poto 6%

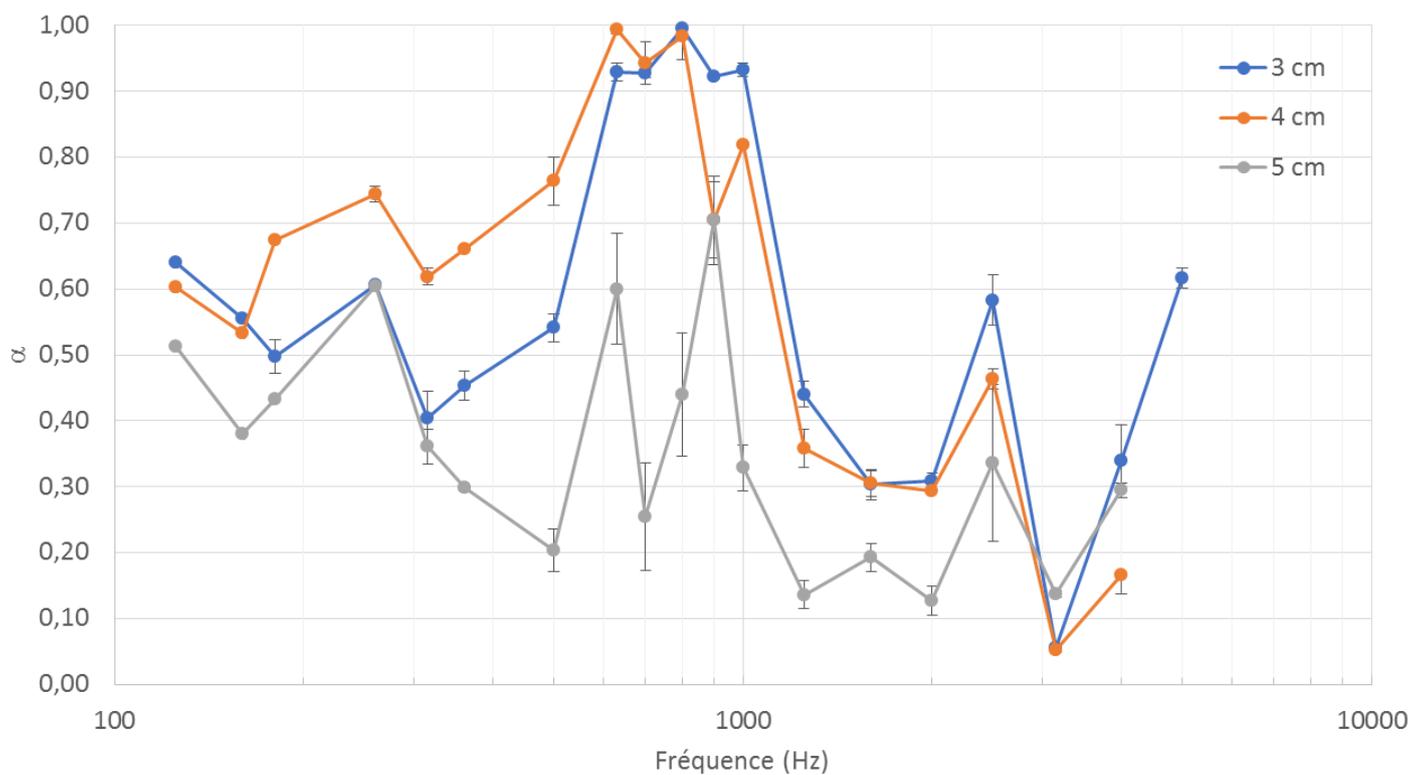


Figure III-24. Coefficient d'absorption du poto-poto à 6% de fibres de bambou

A l'observation de ces figures, on peut, en plus des constats faits sur l'évolution de l'absorption acoustique avec l'épaisseur, remarquer que :

- ✓ Plus la teneur en fibres de bambou augmente, plus l'absorption augmente dans la zone [500-1250 Hz] ;
- ✓ En dehors de la zone de fréquence [500-1250 Hz], l'absorption est moyenne aux basses fréquences et **diminue fortement** aux hautes fréquences après 1250 Hz.

On peut donc, au regard de ces données expérimentales, conclure que le poto-poto assure une absorption sonore en basses et moyennes fréquences. La porosité peut induire une meilleure propagation des ondes dans le matériau et finalement être dissipées, absorbées et transmises.

3.2.3. Etude comparative

Les figures III-25, III-26, III-27 et III-28, montrent les courbes de comparaison du coefficient d'absorption acoustique simulées numériquement et les mesures expérimentales en laboratoire.

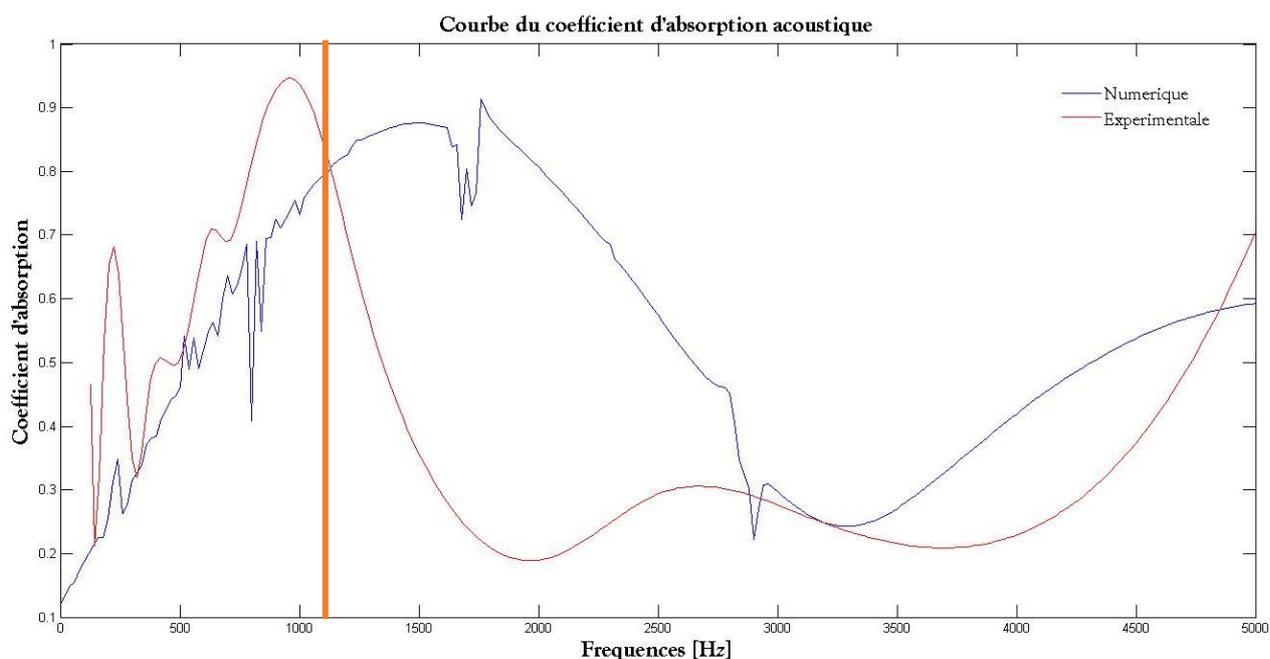


Figure III-25. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 3cm d'épaisseur dosé à 2% de fibres de bambou.

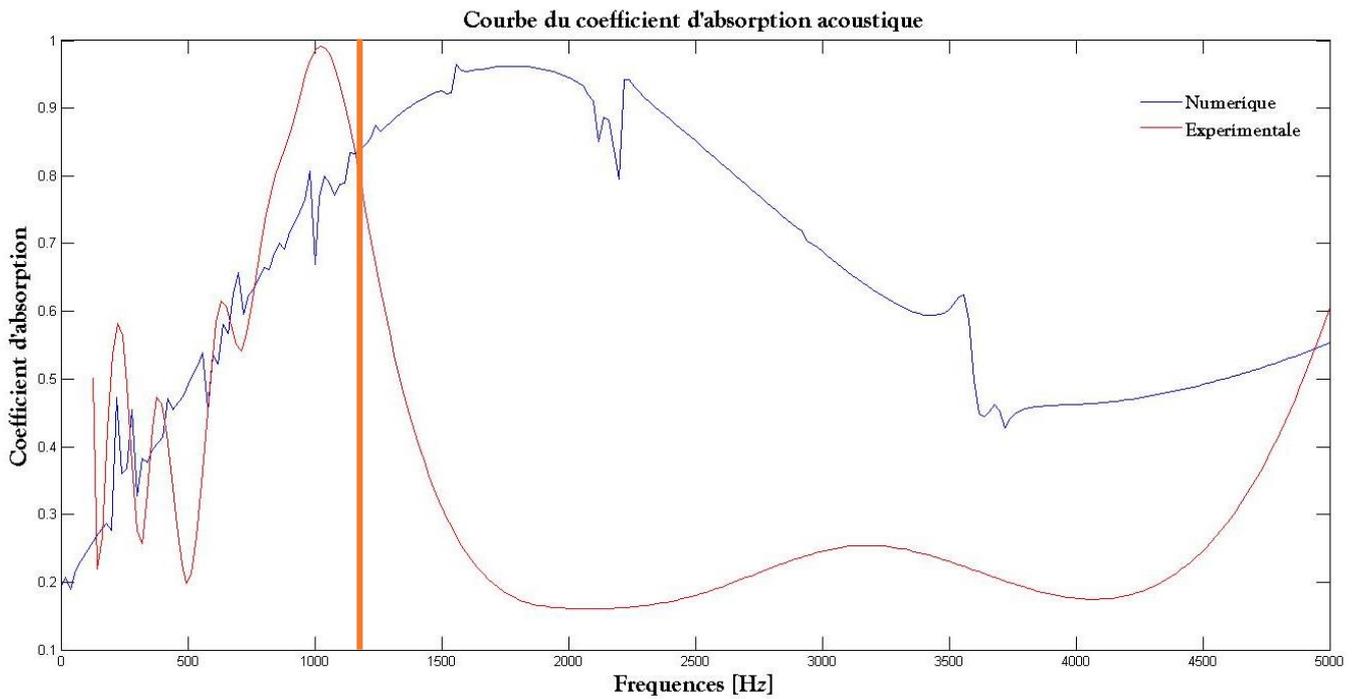


Figure III-26. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 3cm d'épaisseur dosé à 4% de fibres de bambou.

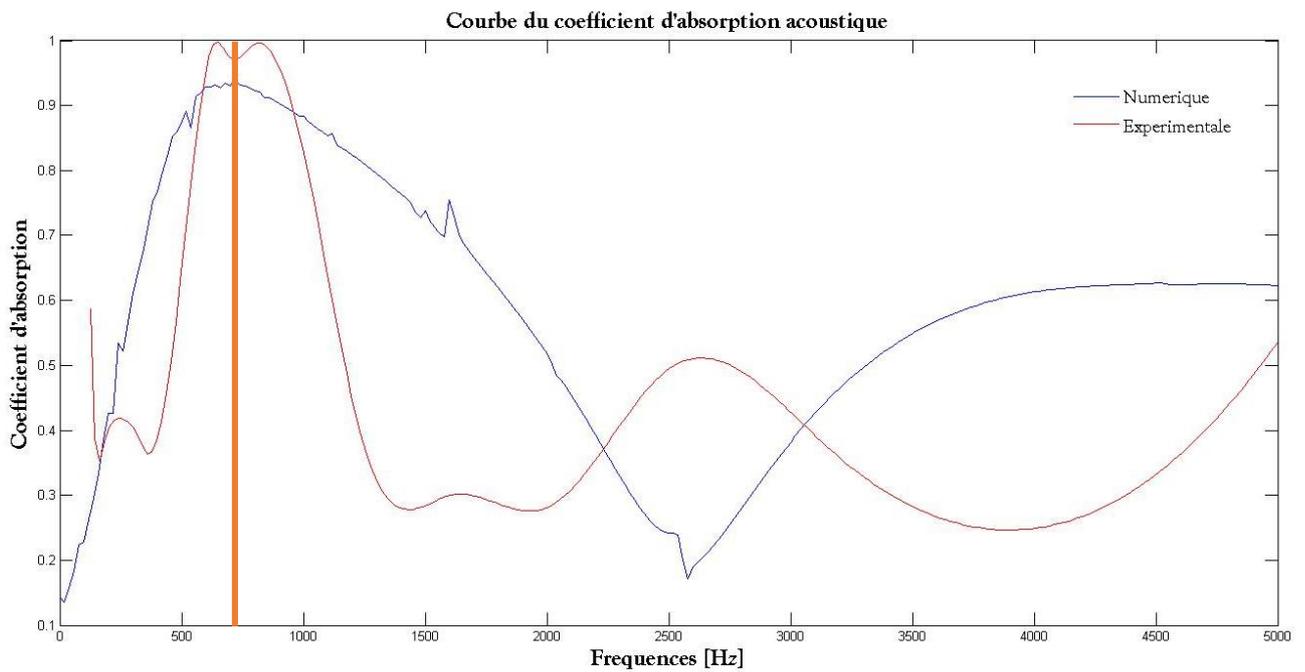


Figure III-27 . Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 4cm d'épaisseur dosé à 2% de fibres de bambou.

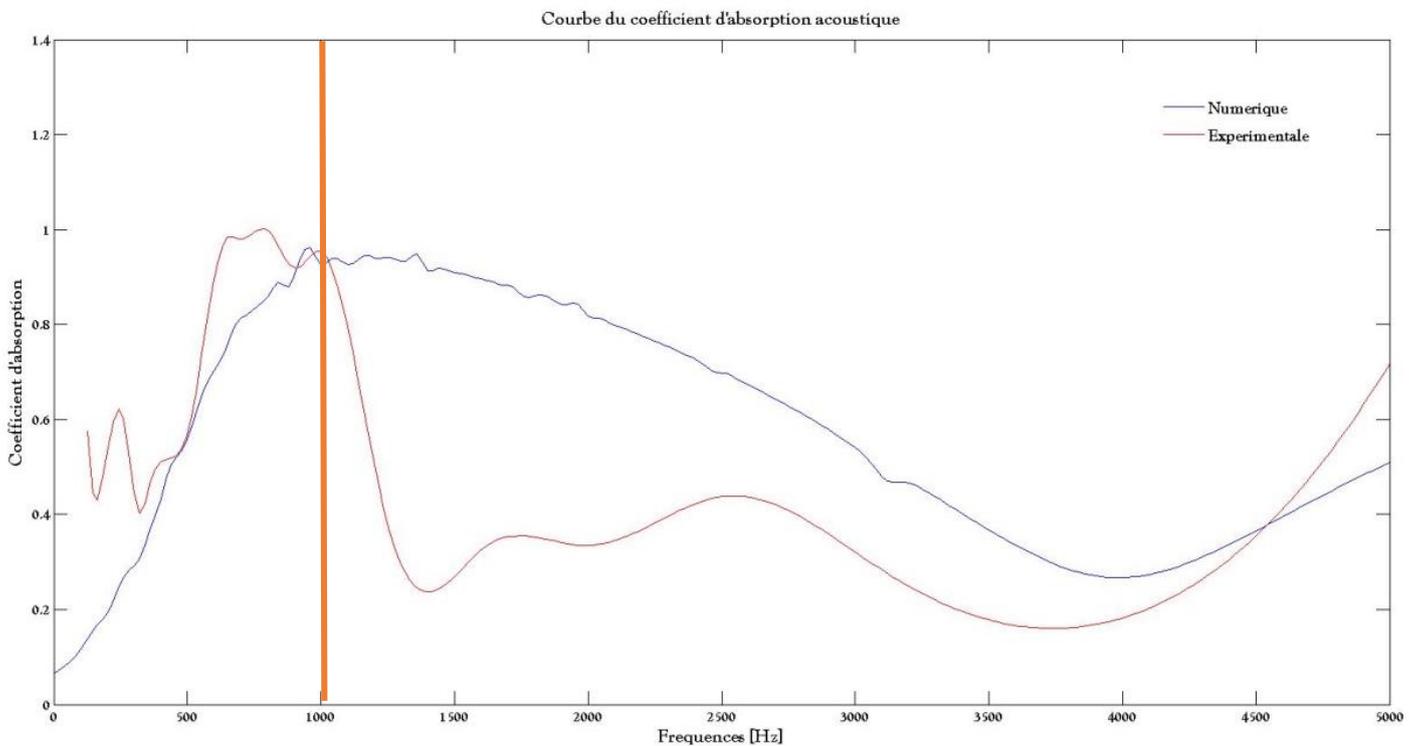


Figure III-28. Courbe du coefficient d'absorption du son du matériau de 4cm d'épaisseur dosé à 4% de fibres de bambou.

A partir de cette étude comparative, nous remarquons qu'en général, en dessous de 1250 Hz, précisément dans la gamme de fréquences 500-1250 Hz, les écarts types sont relativement faibles ; les courbes du modèle et de l'expérience montrent des modèles presque similaires. Au-delà de 1500 Hz, un autre modèle numérique avec des hypothèses plus appropriées en haute fréquence devrait être envisagé. Cela pourrait faire l'objet d'études complémentaires.

Du point de vue acoustique, le modèle de Biot utilisé pour modéliser une paroi de poto-poto en couplant éléments finis (FEM) et éléments de frontière (BEM) a permis de déterminer la matrice de couplage dont la résolution numérique a permis d'obtenir les courbes d'absorption acoustique du poto-poto. La comparaison de ces courbes avec celles obtenues expérimentalement à travers le tube de Kundt (tube à ondes stationnaires) a montré non seulement des écarts types acceptables, mais a également permis de constater que la moyenne des valeurs des coefficients d'absorption obtenus par type d'échantillon indique que :

- ✓ plus la teneur en fibres de bambou augmente, plus l'absorption augmente dans la gamme de fréquences [500-1250 Hz] ;
- ✓ il y a un maximum d'absorption autour de la même gamme de fréquence ;
- ✓ en général, nous avons noté qu'en dessous de 1500 Hz, précisément dans la gamme de fréquences 500-1250 Hz, les écarts types sont acceptables. Dans la même gamme de fréquences, le modèle numérique et les courbes expérimentales sont presque similaires, bien que le comportement acoustique de notre matériau dans les hautes fréquences ne soit pas cohérent.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la caractérisation thermophysique, mécanique et acoustique du poto-poto.

Les résultats obtenus indiquent pertinemment que ce matériau local dont les propriétés physiques qui n'étaient jusque-là que très mal connues, permettent dès lors d'affirmer du point de vue de la science que le poto-poto est un matériau écologique avec lequel on peut compter pour mieux envisager le développement durable.

En effet, sa mise en œuvre acoustique est tout à fait envisageable en moyenne et basse fréquence. Les résultats obtenus à l'issue de la caractérisation thermophysique ont montré que sa conductivité thermique diminue avec l'augmentation des fibres de bambou et que son inertie thermique est un atout pour la régulation thermique des enceintes. Du point de vue mécanique, il présente une résistance à la compression qui indique qu'il peut tout à fait être utilisé comme matériau de remplissage des enveloppes de bâtiments conformément aux normes en vigueur au Cameroun.

Ces données permettent donc une connaissance claire sur certaines caractéristiques physiques de ce matériau dont l'utilisation n'était jusque-là orientée que vers un habitat dit « sommaire ».

Ceci constitue l'originalité de cette thèse qui offre la possibilité à l'utilisation du poto-poto non seulement à des fins d'écoconstructions, mais aussi, pour la mise en œuvre facile et peu coûteuse de certains aspects du confort dans les bâtiments et infrastructures (confort thermique, confort acoustique, confort visuel) sans oublier les avantages liés aux économies d'énergie.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'intérêt des matériaux locaux notamment d'origine renouvelable à des fins de construction s'accroît chaque jour de plus en plus en raison de leurs atouts environnementaux, notamment leurs propriétés physiques qui sont en phase avec la démarche globale de développement durable. Notre travail de thèse est sans doute une contribution importante à l'étude de la caractérisation de nos matériaux locaux d'application de construction. Le choix du poto-poto comme matériau d'étude se justifie dans la mesure où ses principaux constituants que sont la terre et le bambou de chine sont disponibles dans toutes les régions du Cameroun et intègrent aisément les habitudes et modèles culturels d'habitats.

Nous avons commencé par faire un état des lieux sur l'exploration des potentialités des matériaux locaux au Cameroun. Une synthèse bibliographique sur les matériaux locaux utilisés dans le bâtiment, nous a permis de présenter un éventail sur la typologie des matériaux locaux comme alternatives aux matériaux conventionnels de construction généralement énergivores.

Nous avons ensuite, après avoir présenté le protocole de fabrication du poto-poto et défini les modèles mathématiques pour la résolution des équations, identifié la méthodologie et les techniques de caractérisation.

Ainsi, du point de vue thermophysique, le dispositif expérimental plan chaud asymétrique a permis l'estimation des paramètres thermophysiques que sont l'effusivité (E), la capacité thermique volumique (ρC_p) et la déduction de la conductivité thermique (λ) du poto-poto. Ces résultats obtenus à 6 % de fibres de bambou notamment : $\lambda = 0,65 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho C_p = 5680013,13 \text{ J.m}^{-3}\text{kg}^{-1}$ montrent que le poto-poto peut être d'un part considéré comme thermiquement plus isolant par rapport aux agglomérés de parpaing souvent utilisés pour les constructions au Cameroun. D'autre part, grâce à sa forte inertie thermique, son usage comme matériau de remplissage des enveloppes de bâtiments sera bénéfique en termes de régulation thermique et donc d'économie d'énergie.

Du point de vue des propriétés acoustiques, les résultats ont permis d'observer non seulement que l'absorption acoustique du poto-poto augmente avec la teneur en fibres de bambou, mais surtout que, le poto-poto assure une absorption acoustique en basse et moyenne fréquence dans la zone fréquentielle 500-1250Hz.

Du point de vue mécanique, avec une résistance à la compression de $5,94 \text{ MPa} > 2 \text{ MPa}$ recommandé par la Norme, le poto-poto à 6 % de fibres de bambou peut être bien utilisé comme matériaux de remplissage des enveloppes de bâtiments.

Ces résultats obtenus peuvent être des éléments d'incitation qui orientent les décideurs dans le choix de ce matériau en lieu et place des blocs agglomérés de parpaing de sable. Il est facile à mettre en œuvre et ses constituants sont disponibles en grande quantité au Cameroun.

Ce travail de caractérisation du poto-poto montre tout l'intérêt de la valorisation de ce matériau dont la vulgarisation peut contribuer efficacement à réduire les dépenses énergétiques liées à la construction et de ce fait, limiter les émissions de gaz à effet de serre responsables du dérèglement climatique.

Notre démarche est d'actualité, d'autant plus que le développement durable vise entre autres, à travers l'ODD 11 : « *Villes et communautés durables* », de créer des villes, des logements, des transports ouverts à tous, sûrs, résistants et durables, mais aussi la stabilité et l'économie d'énergie

dans les établissements humains (bâtiment) conçus pour être le support essentiel de l'activité humaine.

Le bâtiment dans toutes ses composantes (logement individuel ou collectif pour des usages professionnels, familiales ou ludique, bâtiment mythiques, ...) doit traduire au mieux le développement durable. A partir de cette considération, on peut se convaincre de ce que l'approche du bâtiment ne peut plus seulement se faire par une offre généralement fondée simplement sur l'évaluation du mètre carré, mais plus par une réponse aux exigences des occupants et de l'environnement car, l'objectif 11 des ODD prescrit une logique de demande et non d'une offre, perçue comme indifférenciée et quelconque.

Il convient néanmoins de relever que malgré les bonnes caractéristiques physiques qui constituent le lot d'avantages du poto-poto, il présente quelques faiblesses liées notamment à son altération s'il est exposé aux intempéries (pluies).

En effet, un bloc de terre non ou très peu stabilisé ne supporte pas d'immersion dans l'eau, il se disloque complètement lorsqu'il est plongé dans de l'eau. La stabilisation a donc pour but de remédier à cet inconvénient (Meukam, 2004). La stabilisation dépend de plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- ✓ La nature du stabilisant et sa qualité ;
- ✓ La qualité de la terre ;
- ✓ La qualité du compactage.

Ayissi (1993) a montré que la terre non stabilisée a une résistance à sec acceptable car supérieure au minimum exigée dans la construction. Il a également testé les effets stabilisateurs du ciment et de la chaux, deux produits minéraux d'utilisation courante sur un échantillon de sol.

C'est pourquoi en perspectives à ce travail, nous comptons non seulement améliorer notre modèle pour la caractérisation acoustique afin de réduire davantage l'écart entre le modèle et l'expérimentation, approfondir le modèle pour élargir la gamme de fréquence d'absorption du poto-poto notamment en hautes et très hautes fréquences, mais aussi, nous comptons aborder d'autres aspects importants liés à l'esthétiques, à la protection contre les intempéries et à la stabilisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allard et Atalla, (2009). Propagation of Sound in Porous Media, Numero Second Edition, p. 358.
- Alpuche et al., (2014). "Comparative analysis of the thermal behavior between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials". Energy Procedia, 57, pp. 1783-1791. Argilus, 2012.
- Amada and Untao, (2001): fractures properties of bamboo composites. Composites: part B 32 pp. 451-459.
- AnaClaudia et al., (2022). Modification of short sugarcane bagasse fibres for application in cementitious composites: a statistical approach to mechanical and physical properties, Construct. Build. Mater. 353 129072.
- Anger, (2011). Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Anger et Fontaine. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie.
- Anwar et al., (2005): Physical and mechanical properties of Gigantochloa scortechinni bamboo splits and strips. Journal of Tropical Forest Science 17(1), pp 1-12.
- Asangwing, (2010). Optimisation of Formulations of Stabilised Earth Blocks Using Local Natural Fibers for Home Construction. ENSET, Douala.
- Ayissi, (1993). Brique de terre stabilisée : contribution à l'étude des stabilisants d'origine organique et minérale. Mémoire de fin d'études d'élève ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé.
- Batsale et al., (1994). Extension de la méthode des quadripôles thermique à l'aide des transformations intégrales, calcul du transfert thermique au travers d'un défaut plan bidimensionnel, Int J. Heat Mass Transfer 37 111-127.
- Bazant, (1979). Plastic fracturing theory for concrete. Journal of the engineering mechanics Division. Proceeding of the American society of civil engineers. Vol. 105, no EM3 pp. 407-428.
- BEGUIN et al., (1952). L'Habitat au Cameroun, Présentation des principaux types d'habitat. Essai d'adaptation aux problèmes actuels, Office de la recherche d'Outre-Mer. 20, rue Monsieur - PARIS-Vile, éditions de l'union française 3, rue Blaise-Desgoffe - Paris-VIe
- Berardi & Iannace, (2015). Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications.
- Bessenouci, (2010). Impact et contribution thermo énergétique de matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat. Mémoire de magister, University of Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.

- Bilong et al., (2009). Properties of Compressed Lateritic Soil Stabilized with a Burnt Clay-Lime Binder: Effect of Mixture Components. *Construction and Building Materials*, 23, 2457-2460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017>.
- Biot, (1956). Theory of Deformation of a Porous Viscoelastic Anisotropic Solid, *Journal of Applied Physics*. 27, 459-467.
- Biot, (1956). The theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, *The Journals of Acoustical Society of America*, 28 168–191.
- Bonnet, (1999). *Boundary Integral Equation Methods for Solids and Fluids*, Wiley, Chichester, UK.
- Boubekeur and Houben (1998). (CRATerre-EAG), Blocs de terre comprimée. Normes. CDI et CRATerre-EAG.
- Boubekeur et Houben, (1998). Blocs de terre comprimée. Normes. Bruxelles, CDI et CRATerre-EAG. Guillaud, Joffroy, Odul & CRATerre-EAG, 1995
- Briques de Terre Comprimée, Normes, 1998. CDI et CRATerre-EAG
- Busschaert, (1996) : de nouvelles valeurs de conductivité thermique pour les matériaux d'isolation, Printemps.
- Cañas et al., (2012). "Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests". *Construction and Building Materials*, 37, pp. 738 -745.
- Castany, 1982. *Hydrogéologie, principes et méthodes*, Dunod (Paris).
- Chaowana, (2013). Bamboo : An Alternative Raw Way Material for wood and wood-based composites. *Journal of material science research*; vol. 2, N° 2; 2013 ISSN 1927-0585 E-ISSN 1927-0593, pp. 90-102.
- Ciskowski and Brebbia, (1991). *Boundary Element Methods in Acoustics*. WIT Press, Southampton.
- Courard, (2012). *Matériaux de construction*. Liège, Centrale des Cours de l'AEES asbl.
- Das et al., (2012). Composite Nonwovens. *Textile Progress* 44 (1) 1–84.
- Damfeu, (2017). Modélisation et caractérisation thermophysique des matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments, thèse de doctorat Ph.D, Spécialité: Energétique, Université de Yaoundé I.
- Damfeu et al., (2017). Modelling and Experimental Determination of Thermal Properties of Local Wet Building Materials. *Energy and Buildings*, 135, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.022>.
- Damfeu et al., (2016). Modeling and estimation of the thermal properties of clusters aggregates for construction materials: the case of clusters aggregates of lateritic soil, sand and pouzzolan, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 102 407-4016.

- Damfeu et al., (2016). Modeling and measuring of the thermal properties of insulating vegetables fibers by the asymmetrical hot plate method and the radial flux method: kapok; coconut groundnut shell fiber and rattan, *Thermochimica Acta* 630 66-77.
- Damfeu et al., (2017). Modelling and experimental determination of thermal properties of local wet building materials, *Energy and Buildings* 135 109- 118.
- De Borst et al., (2013). Mechanical characterization of wood: n integrative approach ranging from nanoscale to structure. *Computer and structures*, Elsevier, 127, pp. 53-67.
- De Hoog, (1982). An Improved Method for Numerical Inversion of Laplace Transforms. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 3, 357-366. <https://doi.org/10.1137/0903022>.
- Delany et Basley, 3 (1970). Acoustical properties of fibrous materials, *Appl. Acoust.*
- Doat et al. (1979). *Construire en terre*. Paris, Editions Parenthèses.
- Dorgan, (2006). A nonlocal model for coupled damage –plasticity incorporating gradients of internal sattu variables at multi-scales. A dissertation submitted to the graduate faculty of the Louisiana State University and agricultural and mechanical college in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy in the department of civil and environmental engineering.
- Eduardo, (2021). Greenhouse gas emissions from Mediterranean agriculture: evidence of unbalanced research efforts and knowledge gaps, *Global Environ. Change* 69 102319.
- Elimbi et al., (2005). *Protocoles d’analyses des matières premières et des produits finis au laboratoire*. MIPROMALO.
- Elnaklah et al., (2021). Moving to a green building: indoor environment quality, thermal comfort and health, *Build. Environ.* 191 107592.
- Evelin, (2002). Mechanical properties of bamboo. RWTH Aachen University. Faculty of architecture. Aachen, north Rhine-Westphalia, Germany. Section 3, page 11 and section 4, page 11.
- Florie et al., (2021). *Matériaux locaux, matériaux d’avenir : Ressources locales pour des villes et territoires durables en Afrique*. Villefontaine : CRAterre, : 96 p. ISBN 979-10-96446-32-2.
- Fokwa et al., (2012). Physical Characterization of two bamboo species: *Arundinaria alpina* and *Oxytenanthera abyssinica*. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)* vol.4, no. 2, pp. 82-92.
- Fozao et al., (2014). Modelling the stress-stain behaviour of bamboo under cyclic uniaxial loading. *Revue scientifique et technique Forêt et environnement du bassin du Congo*.
- Fozao, (2019). Constitutive modelling of plastically deformed and damaged bamboo under monotonic increasing uniaxial compressive load and cyclic uniaxial compressive load using the principles of continuum damage mechanics and the theory of endochronic plasticity, Doctorate PhD dissertation, Civil Engineering University of Yaounde I.

Francesco et al., (2015). A review of unconventional sustainable building insulation material.

Ghavami et al., (2003). Bamboo: functionally graded composite material. Asian Journal of civil engineering (Building and Housing) vol.4, no 1 pp.1-10.

Guillaud et Houben, (1995). Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.

Goudet, (2012). Une démarche nationale pour un matériau peu conventionnel: le béton de chanvre, conférence C2IM, Vannes, France.

Hariharan et al., (2021). Bio-composites of rice husk and saw dust reinforced bio-benzoxazine/epoxy hybridized matrices: thermal, mechanical, electrical resistance and acoustic absorption properties, Construct. Build. Mater. 312 125381.

Hargot, (2009). Etude, réalisation et analyse de poutres lamellé-collé en bambou, Revue Scientifique des ISILF n° 23, 2009.

Houben, (2009). Blocs de Terre Comprimés : Normes. CDI.

Holmström, (2014). Structure-acoustic analysis, using Bem/Fem: implementation in Matlab, Master's Dissertation, Lund University.

Institut National de la Statistique, (2012). Annuaire statistique 2012.

Jannot et Acem, (2007). A quadrupolar complet model of the hot disk, Measurement Science and

Jannot et Degiovanni, (2005). Mesure de la conductivité thermique d'un produit humide en amas par la méthode du tube chaud, CNRS, LEMTA.

Jannot, Zoubir and Kanmogne, (2006). Transient hot plate method with two temperature measurements for thermal characterization of metals, Measurement Science and Technology, 17 pp 69-74.

Janssen, (2000). Designing and building with bamboo. Technical university of Eindhoven, the Netherlands. Technical Report n0. 20. International Network of bamboo and rattan.

Jarny and Maillet, (2005). Les problèmes inverses et la métrologie thermique, Ecole printemps GUT-CNRS, groupe METTI, vol. 1 pp: 1-46.

Ramkumar et Kannan, (2022). Impact of hybrid steel fibres on fresh and mechanical properties of Self-compacting concrete, Case Stud. Constr. Mater.

Koizumi et al., (2002). The development of sound absorbing materials.

Kolari K., (2007). Damage mechanics model for brittle failure of transversely isotropic solids, finite element implementation. A dissertation for degree of Doctor of sciences in technology to be presented with due permission of the Department of Mechanical Engineering at Helsinki University of Technology.

- Kowa et al., (2022). Numerical modelling of the poto-poto by coupling of finite elements and boundary elements for acoustic characterization, *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100718>.
- Kowa et al., (2021). Thermophysical and mechanical characterization of poto-poto compressed blocks for use as fill Material. *Materials Sciences and Applications* 2, 437–459, <https://doi.org/10.4236/msa.2021.1210029>.
- Kumar et al., (2022). Study and Compare the Mechanical Properties of Bio Fiber Reinforced Composite, *Materials Today: Proceedings*.
- Kurznetsov, (2013). On the convergence of Gaver-stehfest algorithm, *Math. Sub. Class*, 65R10, 65B10.
- Rahman et al., (2012). Acoustic properties of innovative material from date palm fibre, *Am. J. Appl. Sci.* 9 (9) 1390–1395.
- Ladevie, (1998). Mise au point de dispositif de caractérisation thermophysique de matériaux isolants solides ou pâteux : extension aux fluides cisailés, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.
- Levenberg, (1944). A Method for a Solution of Certain Non-Linear Problems in Least-Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168. <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
- Li and Shen, (2011). The mechanical properties of bamboo and vascular bundles. *Journal of material research*, volume 26, issue 21 pp. 2749-2756. Published online by Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.314>.
- Mesgouez et al., (2005). Transient mechanical wave propagation in semi-infinite porous media using a finite element approach, *Soil Dynam. Earthq. Eng.*
- Ma et Yao, (2012). The preparation and properties of natural bamboo fiber/polypropylene fiber non-woven materials, *Adv. Mater. Res.* 511 24–27.
- Maillet D., Andre S., Batsale J.C., Degiovanni A., Moyne C., (2000). *Thermal quadrupoles*, John Wiley and Sons.
- Maillet D., Andre S., Batsale J.C., Degiovanni A., Moyne C., (2000). *Thermal quadrupoles*, John Wiley and Sons.
- Maillet, D., Andre, S., Batsale, J.C., Degiovanni, A. and Moyne, C., (2000). *Thermal Quadrupoles*. John Wiley & Sons, New York.
- Mary R., (1996). The bamboo solution: tough as steel, sturdier than concrete, full-size in a year. *Discover magazine*
- Mbessa et al., (2011). Influence of the Powder of Pouzzolana on Some Properties of the Concrete: Case of Pouzzolane of Djoungolo (Cameroon). *International Journal of Modern Engineering Research*, 2, 4162-4165

- Mekhermeche, A. (2012). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours Sahériens. Mémoire de magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla.
- Meukam et al., (2003). Thermophysical and Mechanical Characterization of Stabilized Clay Blocks for Building Thermal Isolation. *Materials and Structures*, 36, 453-460. <https://doi.org/10.1007/BF02481525>
- Meukam P. (2004). Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse de Doctorat PhD, ENSP, Université de Yaoundé I, Cameroun.
- Meukam, P., Noumowe, A., Jannot, Y. and Duval, R., (2003). Thermophysical and Mechanical Characterization of Stabilized Clay Blocks for Building Thermal Isolation. *Materials and Structures*, 36, pp. 453-460. <https://doi.org/10.1007/BF02481525>.
- Meukan P., (2004). Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Thèse Doctorat Ph.D, Spécialité : Energétique, Université de Cergy Pointoise-Franc.
- Mickael Abbas, (2017). Elements vibro-acoustiques, Manuel de référence ; Fascicule r4.02, Acoustique.
- Mingsian, (1992). Study of Acoustic Resonance in Enclosures Using Eigenanalysis Based on Boundary Elements Methods. *The Journal of the Acoustical Society of America*, page 2529, Vol. 91, No. 5.
- Narasimhamurthy et al., (2013). A study of physico-mechanical properties of thyrsochachys siamensis (Kurz) Gambe and Dendrocalamus membranaceus (Muuro) in Tumkur District, Karanataka, India. *International Journal of Current Mico-Biology and Applied Sciences* ISSN 2319-7692, vol.2 No 2, pp 62-66.
- Nguyen, (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Thèse de doctorat No 170, Université de Bretagne Sud, Lorient
- Ngohe-Ekam et al., (2006), Thermophysical characterization of tropical wood used as building materials: with respect to the basal density, *Construction and Building Materials* 20 929-938.
- Noureddine et.al., (1998). A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials, *Journal of Acoust. Soc. Am.*, Vol. 104, No. 3, pp.1444-1452.
- Odd, (1983). A Study of the Boundary Element Method, Department of Structural Mechanics, Chalmers University of Technology.
- Ogunbiyi et al., (2015). Comparative analysis of the tensile strength of bamboo and reinforcement steel bars as structural member in building construction. *International journal of scientific and technology research*. Vol.4, issue 11 pp.47-52. ISSN 2277-8616.
- Ouméziane, (2013). Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre. Thèse INSA Rennes, no d'ordre 13/SAR 07/D 13 - 07, Ecole Doctorale: SDLM, Spécialité: Génie Civil.

Paulus, (2014). Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales –Application à un cas pratique : Ouagadougou., Mémoire de Master en Ingénieur Civil Architecte, Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées

Pettang et Foudjet, (2000). Le béton de modules latéritiques armé de fibres végétales : une alternative pour l’habitat économique dans le tiers monde, Bulletin Africain Bio ressources Energie. Developpement. Environnement, 12–19.

Pepple et al., (2010). Thermal Conductivity of Reinforced Cement Stabilized Lateritic Brick. Journal of Engineering and Applied Sciences, 5, 178-180. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2010.178.180>.

Raja et Rahman, (2013). Experimental study on natural fibres for GreenAcoustic absorption materials, Am. J. Appl. Sci. 10 (10) 1307–1314.

Rahman & Riza, (2015). The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. Sore, 2013;

Roder (1981). A transient hot wire thermal conductivity apparatus for fluids, Journal of research of the National Bureau of Standards 86 (5): 458-480.

Romina et al., (2017). Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications.

Samri, (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : Approche expérimentale et modélisation numérique. Thèse de doctorat No 2008-ISAL-0067.

Simon, (2017). Conception d'un matériau acoustique à base de fibres naturelles d'asclépiade, mémoire de master, Université de Sherbrooke (Québec) Canada.

Sore, (2013). *Etudes techniques des BTC stabilisés à la chaux éteinte* (Travail de fin d’études). Institut 2iE.

Taallah, (2014). Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres (Thèse de doctorat). Université Mohamed Khider-Biskra Technology, 17 pp.1129-1234.

Tai (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, n0 d’ordre :170. Mention : Science pour l’Ingénieur. Spécialité : Génie Civil. Ecole doctorale : SICMA.

Verina et al., (2010). Bamboo production to consumption system, Cameroon. CIFOR, Bogor, Indonesia.

Verma and Chariar, (2012). Studies of some mechanical properties of bamboo laminates. International Journal of Metallurgical and Materials sciences and engineering, vol.2, pp 20-37.

Desmet. (2000). Boundary Elements Methods in Acoustics. ISAAC 11, Seminar on Advanced Techniques in Applied & Numerical Acoustics, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

Wagelmans, (2009). Isolation thermique des bâtiments, Université de Liège.

Wakchaure et Kute, (2012). Effect of moisture content on physical and mechanical properties of bamboo. Asian Journal of civil engineering and housing, vol. 13, no 6 pp. 753-763.

Zannou,, (2003). Etudes comparées des propriétés mécaniques et thermophysiques des briques en terre stabilisée au ciment et en argile cuite. Mémoire du Diplôme d'Ingénieur Agronome. Université D'Abomey-Calavi, Benin.

**PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ISSUES DE LA
THESE**

- 1- Kowa et al. (2022). *Numerical modelling of the poto-poto by coupling of finite elements and boundary elements for acoustic characterization*, Results in Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100718>.

- 2- Kowa, et al., *Thermophysical and mechanical characterization of poto-poto compressed blocks for use as fill Material*. Materials Sciences and Applications 2 (2021) 437–459, <https://doi.org/10.4236/msa.2021.1210029>.