



Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier

Mariette Tognonnoui Adagbe

► To cite this version:

Mariette Tognonnoui Adagbe. Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier. Construction durable. Université Paul Sabatier - Toulouse III; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2021. Français. NNT : 2021TOU30084 . tel-03551654

HAL Id: tel-03551654

<https://theses.hal.science/tel-03551654>

Submitted on 1 Feb 2022

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Cotutelle internationale : Université d'Abomey-Calavi (UAC)

Présentée et soutenue par

Mariette T. ADAGBE

Le 22 juillet 2021

**Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme
matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier**

Ecole doctorale : **MEGEP - Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés**

Spécialité : **Génie civil**

Unité de recherche :

**LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de
Toulouse**

Thèse dirigée par

Jean-Emmanuel AUBERT et GIBIGAYE Mohamed

Jury

Rapporteur	M. Antonin FABBRI	Directeur de Recherche, ENPTE
Rapporteuse	Mme Céline PERLOT BASCOULES	Maitre de conférence, HDR, UPPA
Examinatrice	Mme Camille MAGNIONT	Professeure des universités, UT3
Examinateur	M. Pascal MAILLARD	Responsable projet R&D, CTMNC
Directeur de thèse M. Jean-Emmanuel AUBERT		Professeur des universités, UT3
Directeur de thèse M. Mohamed GIBIGAYE		Professeur des universités, UAC

DEDICACE

*Comme on fait bien de te louer, Seigneur, et de te célébrer en chantant, Dieu très haut !
D'annoncer dès le matin ta bonté, et pendant la nuit ta fidélité,
Au son du luth et de la harpe,
Aux accords de la lyre !
Ce que tu as fait, Seigneur, m'a réjoui,
Je crie ma joie pour ce que tu as réalisé.
Seigneur, que tes actions sont grandioses et tes pensées profondes !*

Psaume 92 verset 1-6

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à mes Directeurs de thèse le Professeur Jean-Emmanuel Aubert et le Professeur Mohamed Gibigaye. Recevez ici toute ma gratitude pour ces années de thèse où vous m'avez soutenue, encouragée, comprise, portée, conseillée, guidée etc... Vous m'avez soutenue et encouragée à tel point que malgré tous les défis personnels que j'ai connus au cours de la thèse, je devrais avancer pour vous honorer. Mes sincères remerciements pour vos nombreux efforts pour que ce travail puisse aboutir.

Je remercie le Professeur Bernard Husson du LMDC et le Professeur Florent Eyma de l'Institut Clément Ader de Tarbes pour leur collaboration directe sur la partie poutre et bois.

La majorité de ces travaux ont été réalisés au sein du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse. Je remercie le Professeur Alain Sellier et le Professeur Jean-Paul Balayssac respectivement ancien directeur et nouveau directeur du LMDC, de m'avoir accueillie au sein du laboratoire. Je remercie également tout le personnel technique et administratif du LMDC en particulier René Boujou, Carole Soula, Yann Bouaskeur, Maud Shiettekatte, Vanessa Mazars, Guillaume Lambaré, Sylvain Dos Santos, Marc Bégué, Lacoste Fabienne et Ghislaine Dupouey pour leur collaboration à ce travail.

Je veux remercier mon parrain de thèse, le Professeur Nicolas Binder de l'ISAE de Toulouse et les membres du comité de suivi de cette thèse Victor Gbaguidi et Valéry Doko, enseignants chercheurs à l'UAC pour le suivi de ce travail.

J'adresse mes remerciements à la directrice de l'Ecole Doctorale Megep, Catherine Azzaro-Pantel et à sa secrétaire Kamila Koziura, ainsi qu'au directeur de l'Ecole Doctoral Sciences, le Professeur Antoine Vianou et à sa secrétaire Sena Aho.

Mes remerciements vont également à l'endroit de l'équipe de recherche du Professeur Gibigaye, je veux citer les docteurs Crespin Yabi, Gildas Godonou, Clément Labintan, Christian adadja, les doctorants Christian Koukoubou, Reine Katte, Joël Koti, Damien Agagbe, Koto Tamou, Ghildas Sekloka. Je remercie aussi Salomon, Séro, Hermann, Koffi.

J'ai rencontré des doctorants au laboratoire LMDC qui sont devenus des amis frères, je veux citer le parrain de ma fille Kouka Ouédraogo et Mohamed Abdou Ibro, recevez ici mes frères toute ma gratitude pour vos soutiens et conseils pendant ces années de thèse. Je remercie également vos femmes respectives Germaine et Ousséïna qui sont devenues mes sœurs et vos enfants respectifs Emmérique et Ridwane.

Spécial mémorandum à mon Pépé chéri Mgr Lucien Monsi AGBOKA. Reçois ici toute ma gratitude. Merci Pepe pour tes conseils qui continuent de faire de moi ce que tu as toujours souhaité. Dieu t'accorde une terre légère.

Je tiens à remercier mon second Pepe, Gossou Jean Houinou. Vous avez cru en moi et m'avez soutenue quand c'était difficile, recevez ici toute ma gratitude.

Un très grand merci à mes parents, Julienne et René, à mes beaux-parents Théophile et Albertine et à tous mes frères et sœurs en particulier Brigitte, Yvette, Rock, Françoise, Arnaud, Judith, Rosemonde, Crespin, Immaculée, Diane pour leur soutien indéfectible au cours de toutes ces

années. Merci de m'avoir accompagnée jusque-là ! Je remercie également mes oncles Albert, Tiburce et Grégoire pour leur soutien. A toute la famille Adagbe et Sahossi, je dis merci.

Mes derniers remerciements vont à l'endroit de mon merveilleux et charmant époux Moïse Djaton et à l'endroit de mes enfants Kaïlane et Jaïrus. Merci chéri de m'avoir soutenue, portée, conseillée afin que cette thèse soit une réalité. Depuis le début de ce projet de thèse, tu étais de mon avis. De jeunes mariés, nous sommes devenus parents de la belle Princesse Kaïlane. Il fallait s'ajuster pour y parvenir et tu ne t'aies jamais fait prier pour jouer ton rôle de père et d'époux. De façon inopinée le Champion Jaïrus est également venu dans notre famille. Nous avions prévu un enfant pendant la thèse mais nous voilà avec deux qui font pleinement notre bonheur. Tu as été là pour moi et en même temps pour les enfants. Tu as fait passer cette thèse avant tes propres projets, reçois toute ma gratitude mon Cœur. A mes trésors Kaïlane et Jaïrus, je dis sincèrement merci pour m'avoir comprise, soutenue et aimée.

RESUME

Les matériaux en terre crue sont utilisés dans le bâtiment depuis des millénaires et ceci dans tous les pays du monde. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs. Ils demeurent des matériaux à faible impact environnemental. Pour de multiples raisons, le matériau terre a connu un regain d'intérêt dans le contexte international actuel et ce développement est accompagné par un perfectionnement et une modernisation du procédé.

Le Bénin dans son rapport de 2008 intitulé "Stratégie d'opérationnalisation et déclinaison en plans d'investissements sectoriels de la vision Bénin 2025", a prévu une intégration verticale d'une grappe BTP développant les matériaux locaux de construction. Cette politique vise la construction des logements confortables, modernes et à moindre coût par la valorisation des matériaux locaux de construction dont la terre.

L'objectif de cette étude est de développer un principe constructif de plancher à poutrelles et entrevous en terre crue pour la construction de logements sociaux modernes. Les entrevous et le béton des poutrelles sont en composite terre, tiges de paille de riz et décoction de néré. Les armatures des poutrelles sont le rônier ou le pin. Un premier travail a consisté à stabiliser la terre par les tiges de paille de riz et de la décoction de néré (*Parkia Biglobosa*). La terre utilisée pour la formulation du composite est sablo-argileuse. Les proportions de tiges de paille de riz utilisées ont varié de 0 à 4% et la proportion de décoction de néré de 0 à 12%.

L'analyse de la résistance en compression du composite a montré que cette dernière augmente avec l'ajout des tiges de paille de riz. Par contre, la décoction de néré à elle seule n'améliore pas la résistance en compression. La combinaison des tiges de paille de riz et la décoction de néré améliore la résistance en compression à partir de 6% de décoction ajoutée. L'étude de la durabilité du matériau composite retenu (2% de paille et 6% de décoction de néré) montre que le composite a une meilleure tenue dans le temps. Deux types d'entrevous (entrevous de 40 cm et de 50 cm) ont été confectionnés avec ce mélange et les entrevous obtenus peuvent être classés comme semi-résistants selon la norme EN 15037-3+A1.

L'étude de l'adhérence bois/terre a été réalisée sur des éprouvettes cubiques constituée chacune d'une armature de bois noyée. Cette étude a montré que l'anatomie du rônier conduit à une bonne adhérence avec la matrice argileuse comparativement au bois pin et que les trous façonnés sur le bois pin augmente significativement la contrainte d'adhérence.

La flexion 4 points a été réalisée sur différentes poutres. Dans cette partie de notre étude, la décoction de néré a été substituée par l'hexamétophosphate de sodium (HMP). Il a été observé que l'HMP a un effet positif sur la résistance en flexion du béton de terre et la résistance en flexion des poutres augmente avec l'ajout d'armatures en pin ou en rônier. Les résultats ont également montré que la bonne adhérence des armatures à la matrice argileuse conduit à l'amélioration des résistances en flexion des poutres.

Mots Clés : Matériau composite en terre crue, résistances mécaniques, entrevous en terre, adhérence bois/terre, poutres armées au bois.

ABSTRACT

Raw earth materials have been used in construction for thousands of years in all countries of the world. They have adapted to the evolution of construction and its requirements. They remain low environmental impact materials. For a variety of reasons, the earth material knows today a renewed interest in the current international context and this development is accompanied by an improvement and modernisation of the process.

Benin in its 2008 report entitled "Strategy for the operationalisation of the Benin 2025 vision and its translation into sectoral investment plans", envisaged the vertical integration of a construction cluster developing local building materials. This policy aims to build comfortable, modern and low-cost housing for the population by using local building materials, including earth.

The objective of this study is to develop a constructive principle of floor beams and raw earth hollow blocks for the construction of modern social housing. The hollow blocks and the concrete of the beams are manufactured using a composite of earth, stalks of rice's straw and "nééré" decoction. The reinforcement of the beams is made of roast wood or pine. The first step was to stabilise the soil with stalks of rice's straw and "nééré decoction" (Parkia Biglobosa). The soil used for the formulation of the composite is sandy-clay. The stalks of rice's straw were varied from 0 to 4% and the "nééré" decoction was varied from 0 to 12%.

The analysis of the compressive strength of the composite showed that it increased with the addition of stalks of rice's straw. However, the decoction itself alone did not improve the compressive strength. The combination of stalks of rice's straw and decoction improves the compressive strength from 6% added decoction. The study of the durability of the composite material optimised (2% straw and 6% decoction) shows that the composite has a better behaviour in time. Two types of hollow blocks were manufactured with the optimised composite, namely 40 cm and 50 cm, and all the hollow blocks obtained could be classed as semi-resistant according to EN 15037-3+A1.

The study of wood/earth adhesion was carried out on cubic test specimens, each consisting of an embedded wood reinforcement. This study showed that the anatomy of the roast wood allows its good adhesion to the clay matrix compared to pine wood and that the holes shaped on the pine wood increase its adhesion stress.

The 4-point bending was performed on different beams. In this part of our study, decoction was substituted by sodium hexametaphosphate (HMP). It was observed that HMP has a positive effect on the bending strength of earth concrete. Moreover, the bending strength of the beams increased with the addition of pine or roast wood reinforcements. The results also showed that the good adhesion of the reinforcement to the clay matrix leads to the improvement of the bending strength of the beams.

Key words: Raw earth composite material, mechanical strengths, earth hollow blocks, wood/earth adhesion, wood reinforced beams.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Teneurs en cellulose et lignine de diverses biomasses cellulosiques (GODIN et al., 2010 ; LABOREL-PRENERON, 2017)	36
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales (DUJARDIN, 2014)	37
Tableau I.3 : Répartition du potentiel de bas-fonds au Bénin.....	41
Tableau I.4: Caractéristiques chimiques du rônier.....	43
Tableau I.5: Propriétés mécaniques du rônier	43
Tableau II.1: Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité (VERDEYEN et al., 1968).....	65
Tableau II.2: Classification des sols en fonction de leur valeur au bleu (NF P11-300, 1992)	66
Tableau II.3: Activité des argiles en fonction de leur indice d'activité au bleu (CHRETIEN et al., 2007).....	66
Tableau II.4: Classes granulaires des six terres de la commune d'Abomey Calavi.....	75
Tableau II.5: Limites d'Atterberg des six terres de la commune d'Abomey-Calavi	75
Tableau II.6: Composition chimique des terres UAC et Bouisset.....	78
Tableau II.7: Proportions calculées de certains minéraux présents dans les deux terres	80
Tableau II.8: Masse volumique apparente et conductivité thermique des fibres.....	82
Tableau II.9: Teneur en eau des échantillons de bois à T=20°C et 65% HR.....	87
Tableau II.10: Masse volumique des échantillons de bois à T=20°C et 65% HR.....	87
Tableau II.11: Classes de densité et de dureté	88
Tableau II.12: Dureté Monnin des échantillons de bois.....	89
Tableau II.13: Résistance en compression des échantillons de pin	89
Tableau II.14: Résistance en compression des échantillons de rônier	90
Tableau II.15: Classes de résistance en compression axiale (σ_c).....	91
Tableau II.16: Résistance et module en flexion des échantillons de pin	92
Tableau II.17: Résistance et module en flexion des échantillons de rônier	92
Tableau II.18: Classes de résistance en flexion statique (σ_F) et module d'élasticité longitudinal (EF)	93
Tableau III.1: Indice d'érodabilité selon la profondeur du trou formé (NZS 4298, 1998).....	103
Tableau III.2 : Composition des différentes formulations.....	104
Tableau III.3: Résistance en compression des différentes formulations	105
Tableau III.4 : Paramètres physiques des mélanges	110
Tableau III.5 : Les différents types d'entrevous.....	111
Tableau III.6 : Résistances minimales des entrevous au poinçonnement-flexion.....	112
Tableau III.7: Quantités de matériaux utilisées pour les entrevous	114
Tableau III.8: Tolérances dimensionnelles des entrevous (NF EN 15037-3+A1, 2011)	117
Tableau III.9: Dimensions des entrevous	121
Tableau III.10 : Résistance en compression longitudinale des entrevous	122
Tableau IV.1: Compositions des bétons de terre étudiés	132
Tableau IV.2 : Présentation des différents éléments de béton de terre armé de bois testés	133
Tableau IV.3: Caractéristiques des bétons étudiés à l'état frais	139
Tableau IV.4: Résultats des essais en compression des compositions C4 et C5.....	141
Tableau IV.5: Résultats des essais d'adhérence	142

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Coupe verticale de matériaux altérés de la surface au substratum (roche non-altérée) (HAMARD et al., 2018).....	24
Figure I.2 : Répartition des plateaux de la terre de barre au sud du Bénin	26
Figure I.3 : Les différents procédés constructifs en terre (HOUBEN et GUILLAUD, 2006).....	27
Figure I.4 : Adobes	28
Figure I.5 : Construction d'une maison en bauge au Bénin (PERELLO, 2015)	30
Figure I.6 : Construction d'une clôture en bauge au Bénin (Photo ADAGBE M.).....	30
Figure I.7 : Coffrage et compactage des murs en pisé (MAKRI et al., 2000)	30
Figure I.8 : Répulsion électrostatique (a) et encombrement stérique (b) (LEWIS, 2000)	32
Figure I.9 : Arbre de néré (a) Arbre de néré montrant les gousses de néré (b).....	33
Figure I.10 : Schéma représentant une cellule végétale (ANGER et FONTAINE, 2013).....	35
Figure I.11: a: Paroi secondaire : en orange les fibres de cellulose dans leur matrice de lignine (en vert) et d'hémicellulose (en bleu), b: Même schéma avec seulement les fibres de cellulose (ANGER et FONTAINE, 2013).....	35
Figure I.12 : Greniers en banco du nord-ouest du Bénin construit avec de l'adobe stabilisé par les fibres de tiges de riz (Cliché GIBIGAYE)	38
Figure I.13 : Cycle de développement du riz (ADEGBOLA et al., 2014).....	40
Figure I.14 : (a) Rônier adulte avec un renflement (a) Fruit mûr du Borassus (b).....	42
Figure I.15 : Coupe transversale du rônier.....	42
Figure I.16 : a. Bâtiment colonial du musée d'Abomey, b : Linteau en rônier c : Vue agrandie de linteau en rônier, d : Charpente en bois rônier	45
Figure I.17 : Utilisation du bois rônier pour la construction d'une villa en terre de barre stabilisée (KOUKOUBOU, 2017)	45
Figure I.18 : Photographie d'un exemple d'habitat traditionnel rural africain.....	46
Figure I.19 : Vue partielle d'un plancher en matériaux conventionnels, en attente de recevoir la dalle de compression (Cliché ADAGBE).....	48
Figure II.1: Terre de barre du Bénin.....	58
Figure II.2: Terre de Bouisset	59
Figure II.3: Tiges de paille de riz coupées.....	60
Figure II.4: (a) Panicules de néré (b) Graines de néré (c) Décoction de néré	60
Figure II.5: Utilisation du stipe du rônier (Borassus Aethiopium).....	61
Figure II.6: Tasseau en pin L.2, 40 m - section 14 x 14 mm acheté dans le commerce	62
Figure II.7: Les limites d'Atterberg.....	64
Figure II.8: Appareil de l'Analyse Thermogravimétrique METLER TOLEDO.....	67
Figure II.9: Appareil de mesure de la conductivité thermique λ -Meter EP-500	68
Figure II.10: Echantillons des deux essences de bois pour les mesures de masse volumique et de teneurs en eau (le rônier est le bois de couleur sombre)	70
Figure II.11: Dispositif d'essai de dureté Monnin	71
Figure II.12: Essai de compression sur les échantillons de bois.....	72
Figure II.13: Essai de flexion 4 points sur éprouvettes de pin.....	73
Figure II.14: Courbes granulométriques des six terres de la commune d'Abomey Calavi.....	74
Figure II.15: Limites d'Atterberg des six terres de la commune d'Abomey Calavi	76
Figure II.16: Courbe granulométrique de la terre Bouisset.....	77
Figure II.17: Limites d'Atterberg de la terre Bouisset	78
Figure II.18: Diagramme des rayons X des terres UAC et Bouisset.....	79
Figure II.19: Analyse thermogravimétrique des terres UAC et Bouisset.....	80
Figure II.20: Cinétique d'absorption d'eau des tiges de paille de riz	82

Figure II.21: Images prises au vidéomicroscope des tiges de paille de riz	83
Figure II.22: Images prises au MEB des tiges de paille de riz (surfaces extérieure et intérieure, et section des tiges).....	84
Figure II.23: Diffraction des Rayons X des tiges de paille de riz	85
Figure II.24: Analyse thermogravimétrique des tiges de paille de riz.....	86
Figure II.26: Faciès de rupture en compression des échantillons de pin (a) et de rônier (b et c). 91	91
Figure II.26: Faciès de rupture en flexion des échantillons de pin (a) et de rônier (b et c)	93
Figure III.1: Compositions des mélanges étudiées	99
Figure III.2: Fabrication des éprouvettes cylindriques (a) et prismatiques (b).....	101
Figure III.3: Essai de compression sur les éprouvettes cylindriques.....	101
Figure III.4: Description de la brosse pour l'essai d'abrasion	102
Figure III.5: Essai d'érosion sur le composite terre-paille de riz.....	102
Figure III.6: Courbes de séchage des éprouvettes cylindriques de composite.....	104
Figure III.7: Résistance en compression du composite (sans décoction) en fonction du pourcentage de paille.....	105
Figure III.8: Résistance en compression du composite (sans paille) en fonction du dosage en décoction.....	106
Figure III.9 : Coefficient de résistance à l'abrasion des composites.....	107
Figure III.10 : Profondeur érodée des composites après le droptest	108
Figure III.11: Conductivité thermique des composites.....	109
Figure III.12: Entrevous traditionnels	113
Figure III.13: Entrevous à becquet (a) ou à languette (b)	113
Figure III.14 : Les entrevous mis au point	114
Figure III.15: Le moulage des entrevous.....	115
Figure III.16: Le démoulage des entrevous.....	115
Figure III.17: Le séchage des entrevous	116
Figure III.18: Mesurage des dimensions	116
Figure III.19: (a) Schéma de face du dispositif d'essai (b) Photo du dispositif d'essai mis au point	118
Figure III.20: Semelle plate de chargement de l'entrevous	119
Figure III.21: (a) Positionnement longitudinal de la semelle (b) Positionnement transversal de la semelle	119
Figure III.22: Corps d'épreuve de l'essai de compression longitudinale	120
Figure III.23: Essai de compression longitudinale sur entrevous	121
Figure III.24 : Résistance au poinçonnement-flexion des entrevous	122
Figure IV.1 : Courbes granulométriques du sable 0/4 et du gravier 4/10 de Garonne	130
Figure IV.2 : Les différents types d'armatures en bois utilisées : pin lisse, pin crénelé, pin troué et rônier lisse (de gauche à droite)	131
Figure IV.3: Fuseau granulométrique recommandé pour un pisé (HOUBEN et GUILLAUD, 2006).....	132
Figure IV.4: Malaxeur PH Digy	134
Figure IV.5: Essai d'affaissement	134
Figure IV.6 : Exemple d'une courbe de séchage pour la composition C4 (Terre + 1% HMP + 1% paille)	135
Figure IV.7 : Principes des essais d'adhérence sur éprouvettes cubiques.....	135
Figure IV.8 : Dimensions des poutres et positionnement des armatures en bois	136
Figure IV.9: Préparation des moules des poutres en béton de terre armé de bois.....	136
Figure IV.10: Poutres aux extrémités libres et aux extrémités bloquées.....	136
Figure IV.11 : Essais d'adhérence en compression (droite) ou en traction (gauche)	137

Figure IV.12: Essai de flexion 4 points	138
Figure IV.13 : Illustrations des retraits des éprouvettes de bétons C1, C2 et C3.....	139
Figure IV.14: Courbe contrainte-déformation d'un échantillon cubique (composition C4).....	140
Figure IV.15: Extrémité de l'armature en pin fendu durant l'essai d'adhérence	143
Figure IV.16 : Coupe transversale du rônier	143
Figure IV.17: Diagrammes du moment fléchissant M et de l'effort tranchant d'une poutre soumise à la flexion 4 points	144
Figure IV.18: Modes de rupture d'une poutre soumise à la flexion	146
Figure IV.19: Mode de rupture des poutres de béton de terre non armée.....	146
Figure IV.20: Mode de rupture des poutres de béton de terre avec armatures lisses et libres aux extrémités	147
Figure IV.21: Glissement des armatures.....	147
Figure IV.22: Modes de rupture des poutres de béton de terre avec armatures trouées et libres aux extrémités.....	148
Figure IV.23: Mode de rupture des poutres de béton de terre avec armatures en pin lisses bloquées aux extrémités	149
Figure IV.24: Courbe effort-flèche de la poutre.....	150
Figure IV.25: Courbes effort-flèche des poutres non armées sans et avec HMP	151
Figure IV.26: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées	152
Figure IV.27: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses non bloquées.....	153
Figure IV.28: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses bloquées aux extrémités	154

SOMMAIRE

DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
RESUME.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
SOMMAIRE	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	18
Chapitre 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	22
1. GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE.....	23
1.1. La terre.....	23
1.1.1. Définition.....	23
1.1.2. La composition granulaire de la terre	24
1.1.3. Les argiles.....	25
1.1.4. La terre de barre au Bénin	25
1.2. Les techniques de construction en terre crue.....	26
1.2.1. Les blocs de terre	27
1.2.2. Le torchis, la bauge et le pisé.....	29
1.2.3. Le béton de terre ou la terre coulée	31
1.3. Amélioration de la consistance des produits en terre crue	32
2. AMELIORATION DES PROPRIETES DE LA TERRE CRUE PAR DES FIBRES VEGETALES.....	34
2.1. Les caractéristiques chimiques des fibres végétales	34
2.2. Avantages et inconvénients du renfort par des fibres végétales.....	36
2.3. Amélioration des propriétés mécaniques des matériaux en terre crue par des fibres végétales.....	37
2.4. La paille de riz	39
2.4.1. Description de la plante.....	39
2.4.2. Usage du riz.....	40
2.4.3. Potentialités des rizicoles du Bénin	40
3. LES CONSTRUCTION TERRE-BOIS DE RÔNIER.....	41
3.1. Le palmier rônier.....	41
3.2. Les caractéristiques du bois rônier	42
3.2.1. L'anatomie du bois rônier	42

3.2.2. Les propriétés chimiques, mécaniques et thermiques du rônier	43
3.3. Utilisation du rônier dans les constructions	44
4. SYNTHÈSE ET PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE.....	45
4.1. La construction en terre crue aujourd'hui	45
4.2. Améliorations envisagées sur le matériau terre et le dispositif constructif	47
4.2.1. Composite terre, paille de riz et décoction de <i>Parkia biglobosa</i> (Néré).....	47
4.2.2. Planchers poutrelles et entrevous en terre crue.....	47
4.3. Programme de recherche de la thèse	49
5. REFERENCES	50
Chapitre 2 : CARACTÉRISTIQUES DES MATIÈRES PREMIÈRES	56
1. MATÉRIAUX.....	57
1.1. Les terres	58
1.1.1. La terre de barre (Bénin).....	58
1.1.2. La terre de Bouisset (France)	59
1.2. Les fibres végétales : la paille de riz.....	59
1.3. Les plastifiants : la décoction de néré et l'Hexamétophosphate de sodium	60
1.4. Armatures en bois	60
2. PROCÉDURES	63
2.1. Caractérisation géotechnique des terres	63
2.1.1. Granulométrie par tamisage	63
2.1.2. Sédimentométrie	63
2.1.3. Limites d'Atterberg.....	63
2.1.4. Valeur au bleu.....	65
2.2. Caractérisation chimique et minéralogique	66
2.2.1. Composition chimique par ICP-AES.....	66
2.2.2. Diffraction des Rayons X (DRX).....	67
2.2.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG)	67
2.3. Caractérisation physique et morphologique de la paille de riz	68
2.3.1. Masse volumique apparente et la conductivité thermique	68
2.3.2. Mesure d'absorption d'eau.....	69
2.3.3. Vidéomicroscopie.....	69
2.3.4. Microscope Electronique à Balayage (MEB)	69
2.4. Caractérisation physique et mécanique des éprouvettes de bois.....	69
2.4.1. Masse volumique et humidité	70
2.4.2. Dureté	70
2.4.3. Résistance en compression.....	71

2.4.4. Résistance en flexion.....	72
3. CARACTERISTIQUES DES TERRES.....	74
3.1. Caractéristiques géotechniques des terres	74
3.1.1. La terre de l'UAC.....	74
3.1.2 La terre de Bouisset.....	77
3.2. Caractéristiques chimique et minéralogique des terres	78
3.2.1 Composition chimique des terres	78
1.2.2 Diffraction des Rayons X	79
3.2.3 Analyse Thermogravimétrique (ATG)	79
4. CARACTERISTIQUES DES TIGES DE PAILLE DE RIZ.....	82
4.1. Masse volumique apparente et conductivité thermique des fibres	82
4.2. Absorption d'eau des fibres	82
4.3. Analyse morphologique des fibres	83
4.4. Analyse chimique et minéralogique des tiges de paille de riz.....	85
5. CARACTERISTIQUES DES BOIS	87
5.1. Masse volumique et humidité	87
5.2. Dureté	88
5.3. Résistance en compression.....	89
5.3. Résistance en flexion	91
6. CONCLUSION.....	94
7. REFERENCES	95
Chapitre 3 : ETUDE DES ENTREVOUS EN COMPOSITE TERRE - PAILLE DE RIZ.....	98
1. COMPOSITE TERRE – PAILLE DE RIZ	99
1.1. Matériaux et procédures.....	99
1.1.1. Compositions des mélanges étudiés	99
1.1.2. Procédures.....	100
1.2. Résultats et discussions	103
1.2.1. Essais Proctor et compositions des mélanges étudiés	103
1.2.2. Résistances en compression	105
1.2.3. Essais de durabilité : abrasion et érosion	107
1.2.4. Conductivité thermique	109
2. ETUDE DES ENTREVOUS FABRIQUES EN COMPOSITE TERRE - PAILLE.....	111
2.1. Présentation des différents types d'entrevous.....	111
2.2. Fabrication des entrevous à base de composite terre-paille de riz.....	113
2.3. Procédures d'essais sur les entrevous	116
2.3.1. Mesures des dimensions des entrevous.....	116

2.3.2. Essai de poinçonnement-flexion sur les entrevous.....	117
2.3.3. Essai de compression longitudinale.....	120
2.4. Résultats et discussions	121
2.4.1. Dimensions des entrevous	121
2.4.2. Résistance au poinçonnement-flexion.....	122
2.4.3. Résistance en compression longitudinale	122
3. CONCLUSION.....	124
4. REFERENCES	125
Chapitre 4 : ETUDE DES POUTRES EN BETON DE TERRE ARME DE BOIS	128
1. MATERIAUX ET PROCEDURES	129
1.1. Les matériaux	129
1.1.1. Les constituants du béton de terre et les armatures en bois	129
1.1.2. Formulation des bétons de terre	131
1.1.2. Présentation des différents éléments de béton de terre armé de bois testés	133
1.2. Les procédures.....	133
1.2.1. Malaxage, préparation des éprouvettes et essais sur béton de terre à l'état frais	133
1.2.2. Préparation et coulage des éléments de béton de terre armé de bois	135
1.2.3. Essai de compression sur les bétons de terre	137
1.2.4. Essais d'adhérence bois/béton de terre.....	137
1.2.5. Essai de flexion 4 points sur poutres de béton de terre armé de bois	137
2. CARACTERISATION DES BETONS DE TERRE A L'ETAT FRAIS ET DURCI	139
2.1. Caractéristique à l'état frais.....	139
2.2 Caractéristiques à l'état durci.....	140
3. ADHERENCE BOIS/BETON DE TERRE.....	142
4. FLEXION 4 POINTS DES POUTRES DE BETON DE TERRE ARME DE BOIS	144
4.1. Comportement théorique de poutres en béton armé sollicitées en flexion 4 points	144
4.1.1 Sollicitations dans les poutres en flexion 4 points	144
4.1.2. Modes de rupture des poutres sollicitées en flexion 4 points	145
4.2. Modes de rupture des poutres de béton de terre armé testées	146
4.2.1. Poutres non armées	146
4.2.2. Poutres avec armatures lisses et libres aux extrémités	147
4.2.3. Poutres avec armatures crénelées ou perforées et libres aux extrémités.....	147
4.2.4. Poutres avec armatures lisses et bloquées aux extrémités	148
4.3. Courbes effort flèche des poutres étudiées	149
4.3.1. Analyse qualitative globale des courbes effort-déformation	149
4.3.2. Poutres non armées	151

4.3.3. Poutres avec armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées.....	152
4.3.4. Poutres avec armatures en pin lisses et de rônier lisses non bloquées.....	153
4.3.5. Poutres avec des armatures en pin lisses et en rônier lisses bloquées aux extrémités.....	154
5. CONCLUSION.....	156
6. REFERENCES	158
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	160

INTRODUCTION GENERALE

Le programme de développement du Bénin à moyen et long terme dénommé Bénin Alafia 2025, prévoit que plus d'un Béninois sur deux vivra en ville à l'horizon 2030. Actuellement les villes africaines du point de vue du cadre de vie de la majeure partie de la population se caractérisent par la précarité et l'insalubrité de l'habitat assimilable même à une bidonvilisation de ces dernières. Le coût de construction des bâtiments en matériaux conventionnels reste toujours élevé par rapport aux revenus de la plus grande partie de la population. Par ailleurs selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2002, 60% de la population du Bénin est rurale et vit dans des habitats précaires dont le matériau de base est la terre. Cet habitat n'offre aucun confort au regard du développement actuel de la société. Voilà ce qui explique l'enjeu de l'habitat pour les gouvernants, tant en zone péri urbaine que rurale du Bénin mais également de tous les autres pays en voie de développement, caractérisés par leur forte croissance de la population et l'urbanisation rapide des villes.

Face à cet enjeu, deux fronts de lutte s'imposent : i) la modernisation de l'habitat rural afin de contrer l'exode rural ii) la mise en œuvre d'une politique d'aménagement de l'habitat urbain qui doit prévenir la tendance à la bidonvilisation si caractéristique des villes africaines. Pour ce faire les gouvernants ont mis en place des programmes de logements sociaux à moindre coût utilisant au maximum les matériaux locaux avec la prise en compte de la maîtrise de l'efficacité énergétique. Ces programmes au Bénin ne sont limités pour le moment qu'à l'utilisation du matériau ciment dont le coût reste toujours élevé. Actuellement, en dehors du ciment, peu de matériaux locaux y compris le matériau terre, ont fait l'objet d'une caractérisation pouvant conduire à leur utilisation d'un point de vue professionnel pour la construction des bâtiments modernes. Le composite à base de terre (banco) apparaît comme le matériau le plus approprié pour construire moderne, durable et moins cher à cause des multiples avantages qu'il offre : disponibilité, facilité de mise en œuvre, inertie thermique et faible coût des travaux de maintenance. Toutefois, la terre en tant que matériau de construction comparée au ciment, présente quelques insuffisances dont sa faible résistance à la compression, sa tenue à l'eau, son fort taux de retrait gonflement et sa faible résistance à l'abrasion.

En parallèle de cette problématique spécifique des habitats ruraux et périurbains africains, la construction en terre crue connaît, depuis plusieurs années, un regain d'intérêt croissant dans tous les pays du monde qu'ils soient fortement développés ou pas, notamment dans un objectif de diminution de l'impact environnemental de l'acte de construire. Grâce à ses performances, ce matériau semble particulièrement adapté à l'habitat individuel ou sous forme de petits collectifs. Cependant, le matériau terre a une image négative, artisanale et voire parfois archaïque qu'il est nécessaire aujourd'hui de transformer en modernisant le matériau et sa mise en œuvre.

Partant de ces problématiques communes, le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de l'Université Toulouse III (France) et l'Université d'Abomey Calavi (Bénin) se sont associés pour déposer une demande de financement d'une thèse de doctorat en cotutelle auprès de l'Ambassade de France au Bénin. L'objectif de cette thèse est de travailler sur un procédé constructif innovant à base de terre crue.

Dans les travaux de recherche actuellement disponibles, il existe plusieurs moyens pour améliorer les performances de la terre et en faire un matériau approprié pour la construction de bâtiments modernes (ajouts de granulats végétaux, de stabilisants chimiques d'origine minérale ou organique, ...). Dans le cadre de la présente thèse, nous envisageons d'améliorer la terre par stabilisation avec des tiges de paille de riz et de la décoction de néré (*Parkia Biglobosa*), pratique qui semble jusque-là n'avoir pas fait l'objet d'intérêt de la part de la communauté scientifique. Cette idée est inspirée du matériau utilisé pour la construction des greniers en terre pour le stockage des vivres en milieu rural au Nord-Ouest du Bénin, ouvrages ayant une durée de vie allant jusqu'à 50 ans. Des analyses d'identification faites sur le banco de grenier ont donné l'idée que le mélange utilisé pourrait servir à la fabrication de blocs de maçonnerie pour les parois en élévation ou pour la réalisation de planchers à corps creux et à poutrelles de bâtiments.

Les bâtiments modernes pour la plupart sont constitués de plus d'un étage, ce qui fait appel à la mise en œuvre de planchers porteurs en béton de ciment armé d'armatures en acier. Le coût très élevé de ces matériaux au Bénin fait qu'ils sont difficilement accessibles à la majorité de la population. Ainsi, dans le cadre de la présente thèse, nous envisageons la possibilité de développer un système constructif innovant de planchers à poutrelles et entrevous en terre crue. Pour les entrevous et le béton des poutrelles, nous allons développer un composite à base de terre, de paille de riz et de décoction de néré. Pour les armatures des poutrelles, nous allons une nouvelle fois nous inspirer du patrimoine en nous référant à la mise en œuvre des planchers de bâtiments traditionnels (les tatas somba) du Bénin et du Togo pour lesquels l'armature couramment utilisée est en bois (rônier, bambou, etc...). Le rônier qui sera étudié dans ce travail est un bois localement disponible au Bénin déjà largement utilisé comme matériau de structure.

Le manuscrit de la thèse va se décomposer en quatre chapitres.

Le premier chapitre est un chapitre bibliographique classique dans une thèse de doctorat qui permettra de dresser l'état de l'art sur la construction écologique en terre crue. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons particulièrement aux éléments de la bibliographie disponibles sur les différents matériaux que nous allons utiliser durant notre travail (la terre, les fibres, les fluidifiants et le bois de rônier). Une analyse de cet état de l'art sera réalisée à la fin de ce chapitre afin de présenter la problématique de la thèse, ses objectifs et la méthodologie qui sera utilisée dans notre travail.

Le second chapitre portera sur la présentation et la caractérisation des matériaux utilisés durant cette thèse. Dans un premier temps, nous avons envisagé de ne travailler qu'avec des matériaux provenant du Bénin mais des problèmes d'envoi de ces matériaux nous ont contraints à utiliser aussi pour l'étude des matériaux originaires de la France. Ainsi, nous avons travaillé durant cette thèse avec deux terres (une béninoise, une française), deux échantillons de tiges de paille de riz (une béninoise, une française), des graines de néré et deux essences de bois (le rônier du Bénin et le pin de France). L'ensemble de ces matériaux seront caractérisés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre portera sur le premier élément structurant du système de plancher en terre crue à savoir les entrevous en terre crue. Ce chapitre sera scindé en deux parties. Dans la première partie, nous étudierons et chercherons à optimiser le matériau composite à base de terre crue, de paille de riz et de décoction de néré. Le matériau alors obtenu sera utilisé pour fabriquer des entrevous à l'université d'Abomey Calavi qui seront ensuite caractérisés du point

de vue mécanique. La fabrication et la caractérisation des entrevous seront développés dans la seconde partie de ce troisième chapitre.

Le troisième chapitre portera sur le deuxième élément structurant du système de plancher en terre crue à savoir les poutrelles en béton de terre armé d'armatures en bois. Ce principe est tout à fait innovant car, à notre connaissance, une telle étude d'éléments en béton de terre armé d'armatures en bois n'a jamais été réalisée auparavant. Ce chapitre, organisé comme un article scientifique, sera découpé en quatre parties. Dans la première, nous présenterons les matériaux et les procédures spécifiques utilisés dans ce chapitre. Dans la seconde partie, nous formulerons et caractériserons les bétons de terre utilisés pour la fabrication des éléments en béton de terre armé. La base de la composition de ces bétons sera la même que celle du composite utilisé pour les entrevous (terre et paille de riz) seule la nature du fluidifiant utilisé sera différente. La troisième partie portera sur l'étude de l'adhérence bois/terre qui sera réalisée sur des matériaux modèles constitués d'une seule armature de bois noyée dans un cube de béton de terre. Enfin, la quatrième partie portera sur l'étude du comportement en flexion 4 points de poutrelles de béton de terre armé d'armatures longitudinales en bois. Pour faciliter les études en laboratoire, ces poutrelles auront des dimensions réduites (15 x 15 x 60 cm³).

Ce manuscrit de thèse se terminera par une conclusion générale suivie d'une présentation des perspectives possibles à nos travaux.

Chapitre 1: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

SOMMAIRE

1. GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE	23
1.1. La terre	23
1.2. Les techniques de construction en terre crue	26
1.3. Amélioration de la consistance des produits en terre crue	32
2. AMELIORATION DES PROPRIETES DE LA TERRE CRUE PAR DES FIBRES VEGETALES	34
2.1. Les caractéristiques chimiques des fibres végétales	34
2.2. Avantages et inconvénients du renfort par des fibres végétales	36
2.3. Amélioration des propriétés mécaniques des matériaux en terre crue par des fibres végétales	37
2.4. La paille de riz	39
3. LES CONSTRUCTION TERRE-BOIS DE RÔNIER	41
3.1. Le palmier rônier	41
3.2. Les caractéristiques du bois rônier	42
3.3. Utilisation du rônier dans les constructions	44
4. SYNTHESE ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE LA THESE	45
4.1. La construction en terre crue aujourd'hui.....	45
4.2. Améliorations envisagées sur le matériau terre et le dispositif constructif	47
4.3. Programme de recherche de la thèse	49
5. REFERENCES	50

□

Ce chapitre bibliographique a pour objectif de faire l'état de l'art sur la construction écologique en terre crue et de présenter les différents matériaux que nous allons utiliser durant notre travail : la terre, les fibres, les fluidifiants et le bois de rônier. Les éléments extraits de la bibliographie nous permettront à la fin de ce chapitre de dresser un bilan des activités de recherche passées et de présenter la problématique de la thèse basée sur des pratiques vernaculaires de construction de greniers en banco armé d'armatures en bois. Les objectifs de la thèse, la méthodologie utilisée ainsi que la structuration du manuscrit seront alors présentés à la fin de chapitre.

1. GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE CRUE

1.1. La terre

1.1.1. Définition

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres ayant des caractéristiques variées. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre crue (HOUBEN et GUILLAUD, 2006).

Ces différentes couches de sols sont décrites dans la figure I.1 par (HAMARD et al., 2018). Les couches de terre utilisables pour la construction en terre crue y sont précisées.

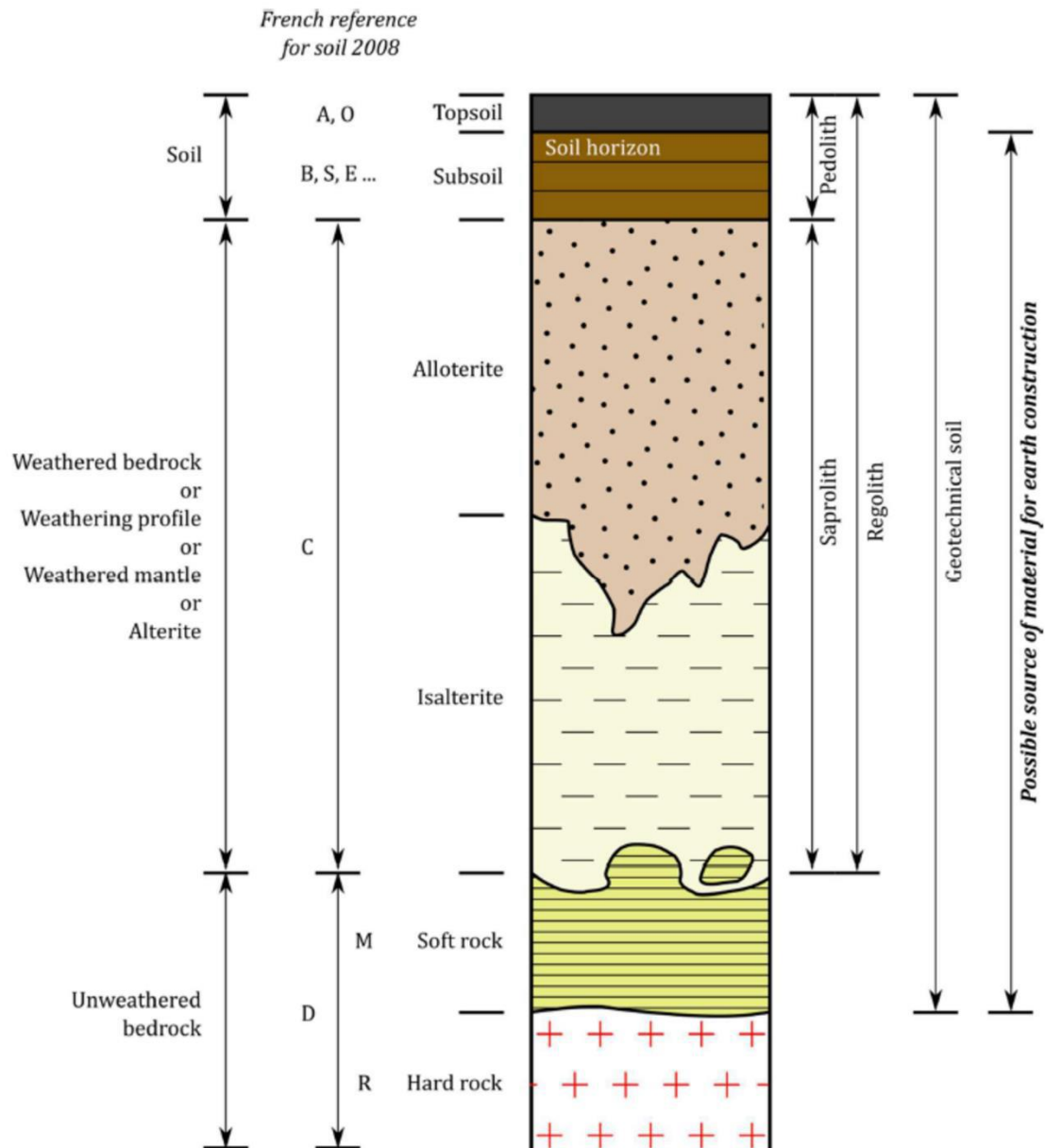


Figure I.1 : Coupe verticale de matériaux altérés de la surface au substratum (roche non-altérée) (HAMARD et al., 2018)

1.1.2. La composition granulaire de la terre

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.063-5 mm), les limons (2 μm -0.063 mm) et les argiles (< 2 μm). On considère souvent que la terre est composée de matériaux « inertes » (graviers, sables) et de matériaux « actifs » (silts, argiles), les premiers jouant un rôle de squelette granulaire et les seconds assurant celui de liant comme la pâte de ciment dans le cas des bétons (HOUBEN et GUILLAUD, 2006). Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés. Par exemple, certaines terres contenant certaines argiles (smectites notamment) vont changer de volume lorsqu'elles sont soumises à des variations d'humidité, d'autres non. On considérera certaines argiles comme stables et d'autres non. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire l'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse

sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (TAALLAH, 2014).

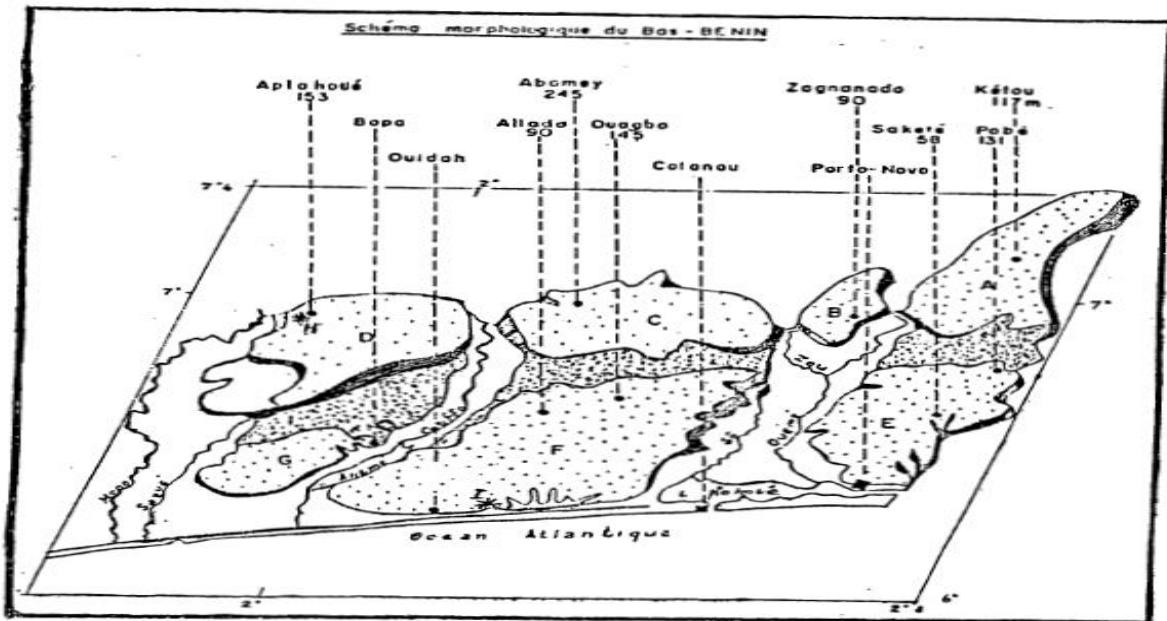
Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des matériaux en terre crue, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

1.1.3. Les argiles

Le terme argile désigne un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz, etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates, l'argile majoritaire lui donnera alors son nom. Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferri-fères (lepidocrocite, maghémite...).

1.1.4. La terre de barre au Bénin

Une des terres utilisées dans ce travail de recherche provient du Bénin. C'est une terre appelée « Terre de barre » qui se localise entre 6°20' et 7°20' de latitude nord puis 1°40' de longitude Est et couvre une superficie d'environ 10.500 km². Elle est développée sur les sept plateaux du sud Bénin (plateau de Kétou, Zangnanado, Abomey, Aplahou, Porto-Novo, Allada et Bopa) (figure I.2). Ces sols sont ferralitiques rouges profonds et perméables, issus d'une altération poussée du continental terminal. Ils sont sablo-limoneux en surface et argilo-sableux en profondeur. Leur fertilité est essentiellement due à leur teneur en matière organique. La terre de barre du sud Bénin décrite par VOLKOFF et WILLAIME (1976) et présentant les caractéristiques granulométriques suivantes: 15,3% d'argile, 5,4% de limon et 77,3% de sable. De plus, sa teneur en azote totale est de 0,05% avec une teneur en matière organique de 2,64%. La somme totale des bases échangeables est de 2,44 még/100 g et la capacité d'échange cationique égale à 4,4.



Légende : A : Plateau de Kétou, B : Plateau de Zagnanado, C : Plateau d'Abomey, D : Plateau d'aplahoué, E : Plateau de Sakété, F : Plateau d'Allada, G : Plateau de Bopa, H : Zouzouvou, I : Agonkanmey.

Figure I.2 : Répartition des plateaux de la terre de barre au sud du Bénin

1.2. Les techniques de construction en terre crue

Il existe un grand nombre de techniques de construction en terre crue dont certaines sont très anciennes (maçonneries d'adobes) et d'autres beaucoup plus récentes (briques extrudées ou terre coulée (« bétons de terre »). Cette variabilité de techniques est résumée sur la figure I.3 extraite du « Traité de construction en terre » d'HOUBEN et GUILLAUD (2006).

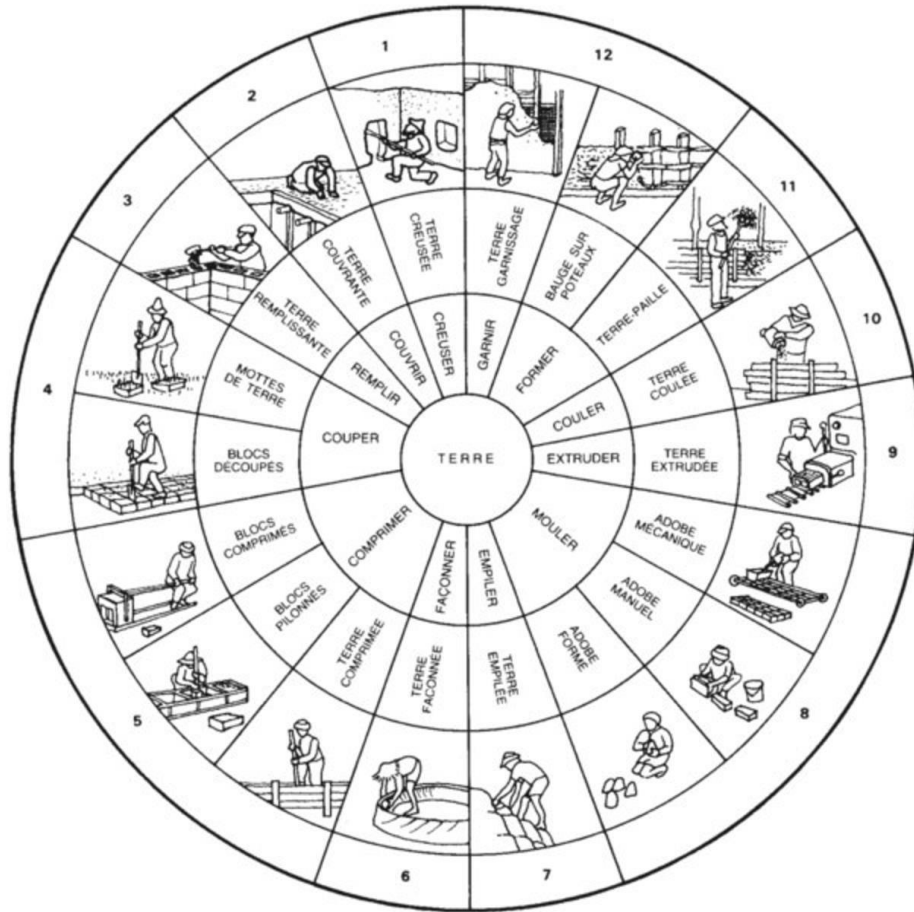


Figure I.3 : Les différents procédés constructifs en terre (HOUBEN et GUILLAUD, 2006)

1.2.1. Les blocs de terre

Une des façons la plus ancienne et encore la plus utilisée de construire des murs de terre crue consiste à maçonner des blocs (ou briques) de terre crue. De manière traditionnelle, ces blocs de terre crue sont maçonnés avec des mortiers de terre mais, dans certaines constructions modernes, il n'est pas rare de voir l'utilisation de mortiers de chaux ou de ciment. Au fil du temps, la fabrication des blocs de terre crue a évolué avec le modernisme et l'utilisation de matériel de plus en plus sophistiqué. Le matériau le plus ancien est l'adobe pour lequel la terre à l'état plastique est moulée dans un moule en bois, immédiatement démoulée et séchée au soleil. Un des problèmes de cette technique est la grande quantité d'eau utilisée pour que le bloc soit moulable et qui nécessite alors des durées de séchage longues ainsi que des conditions de séchage optimales (chaleur, absence d'intempéries, ...). Les fabricants ont cherché alors à réduire la quantité d'eau mais la terre est devenue difficile à compacter dans les moules : il a fallu commencer à la presser et c'est ainsi que sont apparus les BTC (Blocs de Terre Comprimée). Dans les premiers temps, le compactage s'effectuait avec des presses manuelles puis le système s'est modernisé avec des presses hydrauliques automatiques. Enfin, plus récemment, la technologie de l'extrusion, utilisée pour produire tous les matériaux de construction en terre cuite (briques, tuiles, ...) a été utilisée pour produire industriellement à grande échelle des blocs de terre crue en utilisant le même matériel que pour la terre cuite (en

dehors évidemment de l'étape de cuisson). Ces différentes techniques vont être présentées dans ce chapitre.

Les adobes

Les adobes sont des briques de terre faites à la main, moulées et généralement séchées au soleil. Ces briques sont moulées à partir d'une terre argileuse humide. Cette technique encore utilisée dans certains pays non industrialisés est très ancienne et ne nécessite aucun appareil, ni énergie ni matériaux d'apport.

Cependant, pour améliorer leurs performances, les adobes peuvent être amendées de fibres végétales comme de la paille (QUAGLIARINI et LENCI, 2010), des fibres d'Hibiscus Cannabinus (MILLOGO et al., 2014), des fibres de fonio (OUEDRAOGO et al., 2019) ou encore de la chènevotte, de la rafle de maïs et de la paille d'orge (LABOREL-PRENERON, 2017). Il y a une grande diversité d'ajouts de fibres et granulats végétaux possible dans les matériaux en terre crue comme cela est présenté dans la synthèse bibliographique de LABOREL-PRENERON en 2016. Dans d'autres cas, des stabilisants naturels sont ajoutés aux adobes comme de la bouse de vache (MILLOGO et al., 2016), de la laine de mouton (GALAN-MARIN et al., 2010), de la paille de riz (GIBIGAYE et al., 2013) ou encore du ciment (DAO et al., 2018).

Les différents constituants sont malaxés traditionnellement avec les pieds ou mécaniquement jusqu'à atteindre une bonne plasticité. L'adobe est mis en œuvre sous différentes formes selon le pays ou la localité considéré. Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde.



Figure I.4 : Adobes (AKPO, 2013)

Les Blocs de Terre Comprimée (BTC)

Les blocs de terre comprimée, pendant des années, ont été fabriqués avec de moules dans lesquels, on comprimait la terre à l'aide d'un pilon ou en rabattant avec un couvercle lourd. Cette technique est de nos jours mécanisée et la production de BTC est faite par différentes presses avec des produits de diverses formes.

L'emploi des presses et l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée se sont vite développés. Ce développement remarquable a été engagé à partir de 1952 suite à

l'invention de la fameuse petite presse "CINVARAM" imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie. L'apparition dès les années 70 et 80 d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée (RIGASSI, 1995).

Les BTC sont des blocs très réguliers en formes et en dimension ; ils sont plus denses et ils ont une meilleure résistance à la compression que les adobes (blocs moulés à la main) (CRATERRE, 1991).

Blocs de terre extrudée

Ce sont des blocs fabriqués avec la terre à l'état plastique. Après malaxage et homogénéisation, la pâte de terre est mise sous vide pour augmenter sa compacité puis elle est poussée par une vis sans fin à travers une filière qui va donner sa forme à la brique. Il est aussi possible avec ce dispositif de faire des blocs perforés. A la sortie de la filière, les blocs sont coupés à la bonne longueur grâce à un fil puis ils sont séchés à une température voisine d'une centaine de degrés.

1.2.2. Le torchis, la bauge et le pisé

Le torchis

C'est le premier matériau composite de l'histoire. Il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts (fibres végétales). C'est le matériau de construction des habitations dès le néolithique. Il était utilisé par les Celtes pour la construction des murs. L'essor de cette technique a principalement été du XIV^e au XVI^e siècle, mais a perduré jusqu'au lendemain de la seconde guerre mondiale avec un colombage plus simple.

Le torchis est une technique de construction du type ossature-remplissage. Traditionnellement, l'ossature porteuse principale est constituée de colombes de bois, complétée par un clayonnage à base de bois, petits morceaux de bois de châtaignier ou noisetier appelés fuseaux, éclisses, jonc, roseau ou bambou (DEWULF, 2015).

La bauge

La bauge est un système constructif monolithique en terre crue empilée. La terre est dans un état plastique, généralement mélangée à des fibres végétales ou animales même si ça n'est pas obligatoire. Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage alors que le matériau n'est pas trop dur.

La terre est généralement extraite sur le lieu de la construction (d'où les nombreuses mares autour des maisons en bauge) sous la couche de terre végétale. Cette terre doit être moyennement argileuse: suffisamment pour qu'elle possède une bonne cohésion, pas trop pour qu'elle ne fissure pas. La terre est ensuite piétinée par les hommes ou des animaux afin d'y incorporer les végétaux (paille, bruyère, ajonc, fougère, etc.).

Une fois ce mélange réalisé, on dresse des couches successives sur le mur qui sont tassées au fur et à mesure à coup de trique (sorte de manche en bois). Ces couches dépassent largement la largeur finie du mur. On réalise ainsi une "levée" d'environ 60 cm de hauteur (MAKRI et al., 2000).



Figure I.5 : Construction d'une maison en bauge au Bénin (PERELLO, 2015)



Figure I.6 : Construction d'une clôture en bauge au Bénin (Photo ADAGBE M.)

Les murs de terre façonnée

Cette technique de construction est si proche de la technique des bauges qu'on les appelle toutes par le terme générique commun bauge. Cette technique utilisant la terre à l'état plastique permet de modeler des formes riches et variées sans avoir recours à un moule ni à un coffrage.

La technique de mise en œuvre des murs en terre façonnées est très proche de la poterie. Des boules de quelques centimètres de diamètre sont superposées par impact dynamique en couches. Ces couches sont ensuite travaillées et lissées à la main comme en poterie.

Le pisé

Le pisé est un consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur des murs ordinaires de moellons, de la terre préparée à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend de la consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations.

La terre à pisé est généralement prélevée à proximité du chantier. Elle est débarrassée de ses impuretés (matière végétale), légèrement humidifiée puis malaxée. Ensuite, on déverse de la terre ni trop sèche ni trop humide dans un coffrage, en couches successives d'égale épaisseur de 15 à 20 cm maximum.



Figure I.7 : Coffrage et compactage des murs en pisé (MAKRI et al., 2000)

Ces couches de terre sont compactées, à l'aide d'un psoir et ramenées à moitié d'épaisseur, de 7 à 10 cm. Ces "lits" de terre forment une masse dure et homogène constituant à chaque décoffrage une portion de mur porteur monolithique.

Pour faire une pleine hauteur de « banchée », de 80 à 90 cm, il faut une dizaine de couches de terre compactée. Le pisé existe traditionnellement dans de nombreux pays dans le monde. En France, c'est principalement en région Rhône-Alpes que l'on trouve un patrimoine en pisé.

1.2.3. Le béton de terre ou la terre coulée

De nombreuses recherches portent aujourd'hui sur cette technique qui séduit de nombreux clients et entrepreneurs qui souhaitent à la fois utiliser de la terre comme matériau de construction mais construire rapidement et en utilisant les mêmes outils que pour le béton de ciment traditionnel. Ces bétons de terre nécessitent souvent l'ajout d'une grande quantité de liants hydrauliques ce qui pose des problèmes sur l'impact environnemental de ces matériaux (VAN DAMME et HOUBEN, 2018).

Du point de vue des travaux de recherche, peu d'études ont été publiées pour le moment sur le sujet. On peut citer les travaux de MOEVUS et al. (2016) et PINEL et al. (2017) ayant la même origine, un projet appelé Béton d'Argile Environnemental (BAE) financé par un appel à projets C2D2 de la Direction de la Recherche et de l'Innovation du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. La formulation d'un béton de terre est complexe car elle doit s'attaquer à 3 aspects souvent contradictoires :

- obtenir un mélange ayant une consistance suffisante pour pouvoir être mis en place par coulage : pour cela, il faut fluidifier la terre sans ajouter trop d'eau car cela poserait des problèmes de séchage et de résistance du béton durci,
- obtenir un mélange qui fasse prise et durcit rapidement pour pouvoir permettre un décoffrage rapide des éléments sur chantier,
- utiliser des matériaux ajoutés à la terre à faible impact environnemental car, dans le cas contraire, l'utilisation de la terre comme matériaux écologique et disponible perdrait son intérêt.

Dans leurs travaux, MOEVUS et al. (2016) ont travaillé sur l'utilisation de fluidifiants chimiques sur la terre et ils ont montré que les acides polyacryliques (PAA) et l'héxamétaphosphate de sodium (HMP) étaient efficaces pour fluidifier la terre sur laquelle ils avaient travaillé. PINEL et al. (2017) ont travaillé sur la solidification à court terme des bétons de terre sans avoir recours à l'utilisation de quantité importante de liants minéraux qui anéantirait les bienfaits environnementaux de l'utilisation de la terre dans les bétons. Dans sa thèse de doctorat, PINEL (2017) a réussi à formuler un béton de terre sans ciment ayant une formulation très complexe à base d'Hexamétaphosphate de sodium comme fluidifiant et d'un couple GDL (Glucono- δ -lactone)/alginate comme agent de solidification.

Il est possible aussi de citer une autre étude provenant d'un projet différent réalisée par OUELLET-PLAMONDON et HABERT (2016). Les auteurs ont travaillé sur une preuve de concept d'un béton de terre autocompactant à base d'argile, d'un superplastifiant (éther polycarboxylate) et d'un ciment à base de sulfoaluminat de calcium. Les performances obtenues sont comparables à celles d'un bloc de terre comprimé. De plus, l'empreinte carbone de cette solution a été évaluée et les résultats montrent que ce nouveau matériau est compétitif par rapport aux techniques de construction actuelles.

Dans ces différentes études, l'amélioration de la consistance de la terre crue est un point clé. Pour les études citées, les auteurs ont eu recours à des fluidifiants chimiques souvent coûteux. La partie suivante porte sur des solutions alternatives (notamment d'origine naturelle) pour améliorer la consistance des produits en terre crue.

1.3. Amélioration de la consistance des produits en terre crue

Il existe plusieurs types de dispersant. Ces dispersants sont des espèces chimiques qui peuvent s'adsorber à la surface des particules d'argile grâce à de multiples mécanismes d'interaction (forces de Van der Waals, liaisons hydrogène, interactions électrostatiques) (PINEL, 2017). Cette adsorption à la surface des argiles permet d'éviter leur floculation en faisant en sorte que les forces de répulsion entre les particules d'argiles soient les plus fortes possible. Souvent la dispersion est régie par 2 modes d'action différents : la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique.

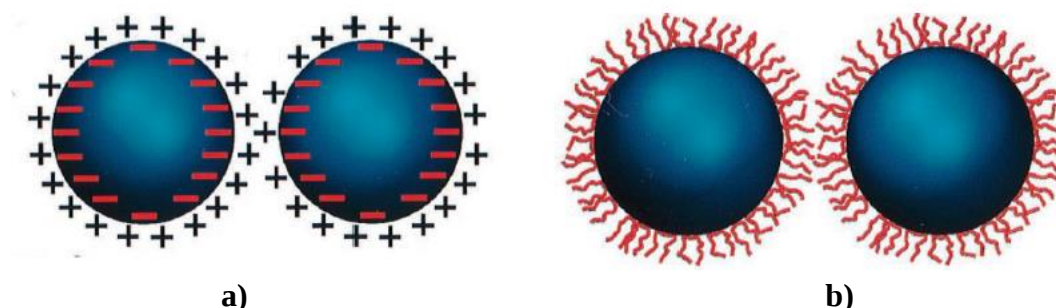


Figure I.8 : Répulsion électrostatique (a) et encombrement stérique (b) (LEWIS, 2000)

Certains auteurs utilisent les technologies des dispersants issus de l'industrie céramique ou des superplastifiants utilisés dans les bétons de ciment pour fluidifier les produits en terre crue (LANDROU et al., 2016 ; MOEVUS et al., 2016. ; OUELLET-PLAMONDON et HABERT, 2016). Cependant, les dispersants dont l'efficacité a été prouvée, comme le Na-HMP, sont des produits chimiques qui pourraient avoir un impact significatif sur l'environnement et présentent souvent un coût élevé. Le rapport de Paterre+ pnrcc 2013 (ANGER et FONTAINE, 2013) rédigé sur la base de plusieurs documents et témoignages recueillis à travers le monde montre que l'utilisation de fluidifiants biosourcés est envisageable et notamment certains tanins.

Différentes études scientifiques ont été menées sur les ajouts de tanins à la terre crue. Certains tanins seraient capables de chélater des cations métalliques (dans les terres comportant des oxydes de fer par exemple), libérant des ions multivalents qui collent fortement les plaquettes d'argiles entre elles, en rendant la terre insensible à l'eau. Dans certaines conditions, certains tanins pourraient aussi provoquer une répulsion électrostérique et défloculer les argiles (ANGER et FONTAINE, 2013). Des études ont été réalisées sur des glands de chêne broyés riches en tannins ou sur l'utilisation de tanins de châtaigniers pour défloculer les argiles. Dans notre étude, nous allons nous intéresser au tanin issu du néré.

Le Néré

Le genre *Parkia* (genre d'arbres de la famille des Mimosaceae) comprend environ 30 espèces et a une répartition pantropicale. Seulement trois espèces de *Parkia* sont observées en Afrique continentale et une quatrième à Madagascar. On trouve l'espèce *Parkia biglobosa*, ou néré (nere

en bambara), dans les savanes arborées de la région soudanienne (OUEDRAOGO, 1995). *Parkia biglobosa* est une Leguminosae-Mimosoideae (selon la classification phylogénétique) originaire des zones sahéliennes et soudaniennes (figure I.9a).

Le néré est un fruitier agroforestier apprécié autant que le karité. Les graines fermentées (Afintin, Sonrou, Soumbala, Dawadawa, Nététu, etc.) servent prioritairement de condiment pour assaisonner les sauces et les soupes (LAMIEN et al., 2011). Torréfiées, elles sont utilisées comme un substitut du café connu sous le nom de “Sudan coffee” ou “café nègre”. La pulpe farineuse des fruits est consommée ou mélangée avec de l’eau afin de préparer une boisson sucrée et rafraîchissante riche en hydrates de carbone (LAMIEN et al., 2011). Les fruits du *Parkia biglobosa* constituent une nourriture de base et thérapeutique pour les populations de l’Afrique de l’Ouest (figure I.9b). La pulpe et les gousses du fruit sont riches en saccharose et les graines en glucides, protéines et lipides, constituant ainsi une source importante d’énergie. *Parkia biglobosa* est classée cinquième parmi trente et une plantes ligneuses médicinales utilisées dans la médecine traditionnelle au Bénin (EYOG-MTIG et al., 2000). Elle est également classée quatrième sur 18 plantes industrielles alimentaires prioritaires à préserver (FAO, 2001).

Le Néré est présent dans tous les départements du Bénin. Les pieds de *Parkia Biglobosa* existent dans les aires protégées, les systèmes agroforestiers et terroirs des 77 communes du Bénin. Dans les conditions environnementales actuelles, 59% du territoire Béninois et 32% de la superficie des aires protégées se sont avérés très favorables respectivement à la culture et à la conservation du néré. La production et la conservation de *Parkia Biglobosa* est possible au Bénin à l’horizon 2050 (AYIHOUENOU et al., 2016).



Figure I.9 : Arbre de néré (a) Arbre de néré montrant les gousses de néré (b)

Certaines études ont été réalisées sur l’amélioration des matériaux en terre crue par l’ajout de tanin de néré. KEITA et al. (2014) ont montré que l’ajout du tanin extrait de l’infusion des gousses de néré à la matrice argileuse améliore le comportement plastique et augmente la résistance en compression du matériau. D’autres auteurs ont utilisés la poudre de gousse de néré qui contient également du tanin et qui augmente la résistance en compression et la durabilité des briques de terre crue (BANAKINAO et al., 2017).

Les tanins se comportent comme un liant dans la terre augmentant la cohésion des grains de la terre et donc la résistance mécanique. Les travaux de NTOUDA NKE (2009) ont montré que des briques traitées à la décoction de poudre de gousse de néré donnent une résistance en compression et une durabilité nettement supérieure à ceux traités au karité et au lait de chaux. L'amélioration de la résistance et de la durabilité par l'ajout du néré serait due à la formation de complexes chimiques entre les atomes de fer des oxy-hydroxydes dans l'espace interfolaire des minéraux argileux et les radicaux carboxyliques des macromolécules de tanins (SORGHO et al, 2016).

2. AMELIORATION DES PROPRIETES DE LA TERRE CRUE PAR DES FIBRES VEGETALES

2.1. Les caractéristiques chimiques des fibres végétales

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

- les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok),
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (paille de riz, lin, chanvre, jute, ramie),
- les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille) ou d'enveloppes de fruits (noix de coco).

Les fibres végétales sont essentiellement composées de cellulose, hémicellulose et de lignine. Les fibres végétales contiennent également des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques (en de très faibles teneurs).

La cellulose est le principal constituant des plantes et elle joue un rôle structurel essentiel dans les parois cellulaires. Elle est très présente dans le bois, le coton, ainsi que dans les fibres naturelles. La cellulose présente dans les fibres végétales possède une structure en grande partie cristalline. Cette cellulose cristalline est l'un des polymères ayant un module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa comparé au 75 GPa de la fibre de verre (CARMA, 2006). Cette rigidité lui est procurée par sa structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné. A l'intérieur de la fibre, les chaînes cellulosiques sont groupées en micro fibrilles qui en s'agglomérant forment des fibrilles sur plusieurs couches. Les liaisons hydrogènes s'établissant le long et entre les chaînes cellulosiques sont responsables des bonnes propriétés des fibres cellulosiques.

Toutes les cellules végétales sont entourées par une paroi cellulaire (« cell wall » sur la figure I.10) rigide constituée essentiellement de cellulose. Cette enveloppe apporte de la résistance structurelle à la cellule.

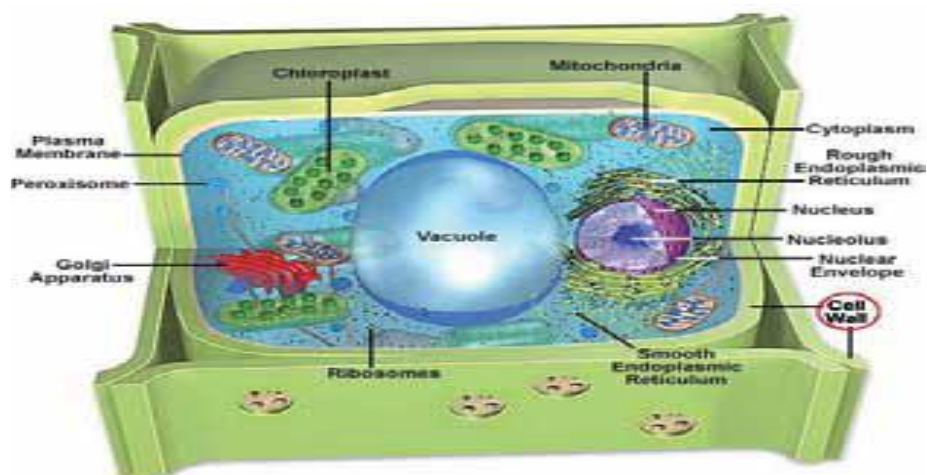


Figure I.10 : Schéma représentant une cellule végétale (ANGER et FONTAINE, 2013)

L'**hémicellulose** est constituée de longues chaînes qui relient les fibres de cellulose entre elles par des liaisons de type hydrogène ou Van der Waals (Figure I.11a). Ces dernières, en portant les fibres de cellulose enchevêtrées, verrouillent et rigidifient le réseau de fibres de cellulose. Les hémicelluloses sont des polymères ramifiés. Ces fibres baignent dans une matrice de lignine qui constitue le « ciment » de la paroi cellulosique.

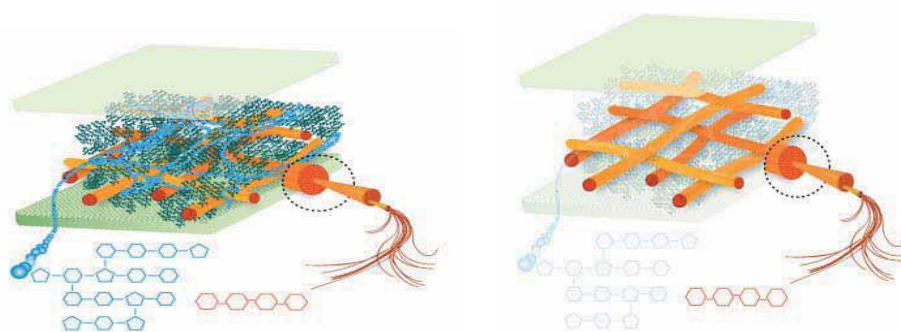


Figure I.11: a: Paroi secondaire : en orange les fibres de cellulose dans leur matrice de lignine (en vert) et d'hémicellulose (en bleu), b: Même schéma avec seulement les fibres de cellulose (ANGER et FONTAINE, 2013)

La **lignine** est le deuxième composant de la biomasse, après la cellulose. C'est un polymère complexe qui rend la paroi cellulaire imperméable et permet ainsi le transport de l'eau et des éléments nutritifs à travers le système vasculaire et protégeant les plantes de l'invasion microbienne. Parmi les végétaux, il y en a qui contiennent plus de lignine comme le bois qui est un matériau très rigide. Plus les végétaux sont rigides, plus ils contiennent de la lignine.

Le tableau I.1 présente les teneurs en cellulose et en lignine (avec leur écart-types) de diverses biomasses cellulosiques. Le nombre entre parenthèse indique le nombre de valeurs à partir duquel les moyennes sont faites.

Tableau I.1 : Teneurs en cellulose et lignine de diverses biomasses cellulosiques (GODIN et al., 2010 ; LABOREL-PRENERON, 2017)

Biomasse lignocellulosique	Cellulose (Kg.100Kg ⁻¹ MS)	Hémicellulose (Kg.100Kg ⁻¹ MS)	Lignine (Kg.100Kg ⁻¹ MS)
Bagasse de canne à sucre (10)	40,1 ± 6,7	26,3 ± 6,3	17,9 ± 6,8
Fétuque (5)	33,3 ± 2,7	30,4 ± 1,8	6,5 ± 2,2
Fibre de maïs (6)	38,0 ± 3,8	27,4 ± 1,2	7,3 ± 1,6
Miscanthus (4)	44,0 ± 4,8	25,4 ± 2,2	20,4 ± 4,8
Paille d'avoine (5)	35,5 ± 5,7	24,3 ± 6,5	13,7 ± 4,0
Paille de blé (27)	36,6 ± 4,6	29,8 ± 7,7	16,9 ± 4,7
Paille de maïs (12)	37,3 ± 5,1	25,4 ± 4,3	15,8 ± 3,6
Paille d'orge (17)	40,4 ± 7,8	25,6 ± 5,1	12,7 ± 3,6
Paille de riz (32)	35,3 ± 3,8	26,7 ± 4,9	9,8 ± 5,5
Paille de seigle (3)	37,0 ± 3,0	28,9 ± 1,0	12,7 ± 9,6
Panic érigé (36)	38,3 ± 3,8	31,2 ± 2,9	8,4 ± 3,9
Ray-grass italien (4)	23,1 ± 4,8	18,7 ± 6,3	4,3 ± 2,4
Fibre de sorgho (7)	42,3 ± 2,6	26,2 ± 0,6	8,0 ± 0,4
Fibre de coco (3)	35,0 ± 9,3	11,42 ± 7,4	40,0 ± 8,6
Sorgho fourrager (3)	28,3 ± 4,6	22,8 ± 3,6	8,7 ± 3,9
Chanvre (3)	60,3 ± 6,2	16,8 ± 3,9	6,8 ± 3,4
Kénaf (6)	53,2 ± 4,1	18,4 ± 1,4	7,9 ± 1,2
Hêtre (3)	45,4 ± 1,9	27,9 ± 6,8	23,1 ± 1,3
Peuplier (4)	42,0 ± 2,9	22,0 ± 6,2	24,8 ± 3,8
Saule (2)	46,5 ± 13,5	18,5 ± 6,4	20,0 ± 1,4
Douglas (3)	48,8 ± 7,6	21,1 ± 11,4	25,9 ± 2,2
Epicea (4)	44,3 ± 4,2	26,1 ± 3,7	28,4 ± 0,7
Fibre de lin (3)	67,33 ± 9,1	19,0 ± 5,3	4,7 ± 2,2

2.2. Avantages et inconvénients du renfort par des fibres végétales

Les avantages écologiques et économiques des fibres végétales sont nombreux. En effet, ce sont des matériaux renouvelables et disponibles et leur production peut être adaptée à la demande. Les fibres naturelles présentent un bilan énergétique neutre en fin de vie, contrairement aux fibres synthétiques qui ne peuvent pas être recyclées ou incinérées (WAMBUA et al., 2003 ; JOSHI et al., 2004).

L'utilisation des fibres végétales comme renforts de matériaux composites présentent de nombreux avantages. En effet, elles sont largement disponibles à moindre coût et leur utilisation dans les constructions constitue de nouveaux débouchés pour l'agriculture. Par ailleurs, la valorisation des fibres végétales réduit les impacts environnementaux. Ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandent peu d'énergie pour leur production (BALEY, 2004). Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des fibres végétales dans les matériaux composites sont présentés dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales (DUJARDIN, 2014)

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO ₂	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

2.3. Amélioration des propriétés mécaniques des matériaux en terre crue par des fibres végétales

La terre renforcée par des fibres fait l'objet de beaucoup d'investigations par plusieurs chercheurs ces dernières années. La littérature a permis d'appréhender les réflexions déjà menées dans le sens de l'utilisation de la terre renforcée par des fibres comme matériau de construction. La majorité des auteurs sont unanimes pour reconnaître les opportunités qu'offre ce matériau de construction. De nombreuses études ont été réalisées dans ce sens.

BOUCHICHA et al. (2005) ont étudié la performance du composite terre renforcé par des pailles d'orge et ils ont remarqué que la résistance en compression du composite avec une teneur en fibres égale à 3% est sensiblement égale à 2,3 MPa tandis que cette résistance en compression est de 3,3 MPa avec une teneur en fibres de 1,5%. Quant à la résistance en flexion, elle augmente linéairement avec la teneur en fibres. Cette étude confirme également une bonne performance sur le retrait par l'ajout des fibres.

YETGIN et al. (2006) ont étudié les effets de la teneur des fibres sur les propriétés mécaniques des adobes. Les fibres utilisées étant des pailles, il a été observé que l'augmentation de leur teneur fait augmenter la résistance en traction et fait diminuer la résistance en compression et donc que pour de meilleures performances des adobes renforcés, la teneur en fibres ne doit pas dépasser 0,5 %. Il a aussi été remarqué que l'augmentation de la teneur en fibres fait diminuer le taux de retrait. Par contre, ce taux augmente avec l'augmentation de la teneur en eau et en argile et il a été suggéré que la teneur en argile d'un bon mélange d'adobe se situe entre 13% à 17%.

MILLOGO et al. (2014) ont étudié des adobes renforcés par des fibres d'Hibiscus Cannabinus avec des teneurs allant de 0,2 à 0,8% et des longueurs de fibre comprises entre 3 cm et 6 cm. Les auteurs ont mis en évidence la diminution de la porosité des adobes renforcés par les fibres

végétales et aussi l'amélioration de leurs propriétés mécaniques pour des teneurs en fibres de 0,2 à 0,6% et de longueur 3 cm. Par contre, avec des fibres plus longues (6 cm) ajoutées en plus grande quantité (0,8%), on note un effet négatif sur la résistance en compression. Pour de bonne performance mécanique, il est donc judicieux d'utiliser des fibres courtes dans des dosages inférieurs à 0,8%.

AMBARKA (2010) a travaillé sur les caractéristiques physico-mécaniques du matériau banco et la vérification de la résistance portante mécanique des greniers en terre dans le nord du Bénin. Dans son rapport, AMBARKA indique que le sol argileux seul ne fournit pas de bonnes caractéristiques mécaniques. L'ajout de paille de riz permet d'augmenter les performances mécaniques : les résultats des résistances en compression sur éprouvettes cylindriques comme prismatiques montrent que ces résistances se sont accrues lorsqu'on passe d'un taux de 1,5% de paille à 2%. A 2,5%, ces résistances chutent et encore plus à 3%. Les résultats des résistances en traction par fendage comme en traction par flexion montrent que ces résistances s'accroissent pratiquement de façon linéaire avec le pourcentage de paille. Il conclut alors que l'utilisation de la paille dans les constructions traditionnelles joue le même rôle que l'utilisation des armatures dans les constructions en béton. Le pourcentage maximum de paille sera obtenu par la contrainte de compression minimale qu'on désire avoir car au-delà de 2% de paille, plus il y a la paille moins grande est la résistance en compression.

En 2002, AMBARKA a travaillé sur l'étude des ouvrages de stockage de type traditionnel des produits vivriers dans la Donga (greniers de stockage présentés sur la figure I.12). Ces greniers traditionnels sont posés sur un socle qui est fait de grosses pierres ou construit en banco surmonté de petits cailloux qui laissent passer l'aération pour la volaille qui s'abrite en dessous. Leurs dimensions sont variables en fonction de l'usage envisagée par les populations rurales mais les plus petits ont une capacité de stockage de 2 tonnes de céréales alors que les plus grands peuvent aller jusqu'à 4 tonnes. Ils sont protégés des intempéries par une jupe de chaume (figure I.12) et ils ont pour certains une longévité exceptionnelle qui peut aller jusqu'à 50 ans.



Figure I.12 : Greniers en banco du nord-ouest du Bénin construit avec de l'adobe stabilisé par les fibres de tiges de riz (Cliché GIBIGAYE)

Dans son étude, AMBARKA (2002) a ajouté de la décoction de néré au mélange de sol argileux et de paille comme cela se fait traditionnellement dans la construction des greniers en banco et il a constaté que les mélanges sans décoction de néré étaient beaucoup moins maniables que ceux avec la décoction de néré. De plus, la décoction de néré rendait la surface plus lisse et empêchait donc l'effritement des éprouvettes au séchage (AMBARKA, 2010). Au cours de cette étude, il avait utilisé de l'argile de termitière, ce qui lui a permis de mettre un accent particulier sur la granulométrie du sol à utiliser pour le banco. ADAGBE (2014) a également travaillé sur l'amélioration de la terre par des tiges de pailles de riz à travers son mémoire d'ingénieur de conception intitulé « Caractérisation physique, mécanique et thermique du matériau banco de grenier en vue de son utilisation dans les blocs de construction » (ADAGBE, 2014). Le matériau étudié appelé « banco de grenier » était composé d'un mélange de tiges de paille de riz, de sol argileux et de décoction de néré. Les résultats obtenus par ADAGBE sur ces mélanges étaient très encourageants du point de vue de la résistance à la flexion et à la compression et ils sont à l'origine de ce travail de thèse.

D'autres auteurs (GREESHMA et JOSEPH, 2011) ont travaillé sur l'amélioration de la terre avec la paille de riz. Deux types de mélange ont été étudiés : un mélange de terre et de pailles de riz avec des dosages de 0,25; 0,5; 0,75 et 1% et un mélange de paille de riz, de terre et de chaux. Chacun de ces mélanges a été soumis à deux types d'exposition différente : trempage et séchage alternatif d'une part et immersion continue d'autre part. Les résultats ont montré que la résistance en compression de la terre renforcée avec 0,5% de paille de riz augmente de 1,94 fois par rapport à celle de la terre non renforcée et que cette même résistance en compression augmente de 3,86 fois dans le cas de la terre renforcée avec de la paille et de la chaux. Mais, une étude sur la durabilité des pailles durant 60 jours dans un milieu alcalin (solution de chaux et d'eau) révèle que les pailles sont sévèrement attaquées quand elles sont soumises à une exposition de trempage et séchage alternatif plutôt qu'à une exposition d'immersion continue. Ainsi, on comprend par cette étude que malgré la bonne performance que peut procurer la chaux à la terre renforcée de paille de riz dans les premiers jours, elle détruit de façon significative les pailles au bout de 60 jours et conduit ainsi le composite à de très faible résistance en compression (soit 91% de moins par rapport à celle des fibres non exposées).

2.4. La paille de riz

2.4.1. Description de la plante

Le riz est une plante annuelle glabre à chaume dressé ou étalé. C'est une plante prédisposée au tallage, formant un bouquet de tiges, à racines fasciculées. La plante développe successivement trois types de racines : la racine séminale, les racines du mésocotyle et les racines nodales. Le système racinaire est très abondant, ramifié et superficiel chez les variétés aquatiques, moins ramifié, de plus grand diamètre et plus profond chez les variétés pluviales. Chaque grain germé donne naissance à une touffe pouvant compter jusqu'à trente talles au stade végétatif. Environ la moitié de ces talles produit des panicules. La hauteur de la plante à maturité varie de 0,60 m à plus de 2 m selon les variétés et peut aller jusqu'à 5 m pour les variétés flottantes. La plante du riz comporte les organes végétatifs (racines, tiges, et feuilles) et les organes floraux (panicules comportant les épillets). La vie ou cycle de développement d'un plant de riz se divise en les trois phases suivantes (figure I.13) : la phase végétative qui commence de la germination

à l'initiation paniculaire, la phase reproductive qui commence de l'initiation paniculaire à la floraison et la phase de maturation qui commence de la floraison à la maturité (ADEGBOLA et al., 2014).

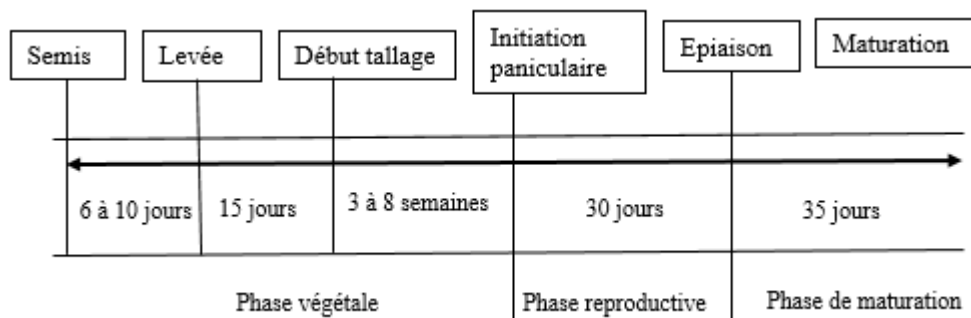


Figure I.13 : Cycle de développement du riz (ADEGBOLA et al., 2014)

2.4.2. Usage du riz

Le riz constitue l'aliment de base de plus de la moitié de l'humanité. Outre son utilisation directe dans l'alimentation humaine, les grains de riz servent à fabriquer de l'alcool, de l'amidon et ses dérivés, de l'huile, des produits pharmaceutiques, des aliments diététiques, etc. Les sous-produits de transformation (brisure, farine, son) et la paille sont utilisés en alimentation animale. Les balles de riz servent de combustible et les cendres d'engrais. La paille est également utilisée comme litière, une matière première pour la fabrication de pâte à papier ou encore pour la fabrication de papier mural. La paille de riz et les balles de riz sont également utilisées dans la construction des bâtiments. La terre mélangée aux pailles de riz constitue un véritable écomatériau ayant de très bonnes performances mécaniques (voir section 2.3).

2.4.3. Potentialités des rizicoles du Bénin

Le Bénin est l'un des pays de l'Afrique de l'Ouest qui dispose d'importantes ressources hydrauliques et hydro agricoles réparties sur toute l'étendue du territoire national. La Cellule Bas-fonds de la Direction Générale de l'Aménagement et de l'Equipement Rural (DGAER), ex Direction du Génie Rural, évalue les eaux superficielles et souterraines respectivement à 13 milliards et 12 milliards de mètre cubes. Les terres irrigables sont estimées à 322 900 ha de terres irrigables dont 117 000 ha de plaines inondables et 205.900 ha de bas-fonds. Le Bénin dispose alors d'un potentiel non négligeable en ressources naturelles pour la production de riz. La répartition des potentialités en bas-fonds du Bénin (tableau I.3) montre que les départements du Zou/Collines regroupent 31,57%, l'Atacora/Donga 27,44%, le Borgou/Alibori 16,03%, l'Atlantique 7,28%, le Mono/Couffo 8,45% et l'Ouémé/Plateau 9,23%.

Concernant les plaines inondables, elles sont réparties comme suit : 27 000 ha dans le Mono, 30 000 ha dans le Nord et 60 000 ha dans l'Ouémé. Le Bénin dispose au total de 117 000 ha de plaines inondables (KONNON et al., 2014).

A ce jour, le niveau de valorisation du potentiel hydro agricole disponible reste encore très faible et porte seulement sur moins de 10 % dudit potentiel (SNDR, 2011).

Cela nous permet de conclure que la paille de riz est disponible sur toute l'étendue du territoire béninois et elle pourra être aisément disponible pour le renforcement des blocs de terre au Bénin.

Tableau I.3 : Répartition du potentiel de bas-fonds au Bénin

Départements	Potentiels estimés (en ha)	%
Atacora-Donga	56.500	27,44
Borgou-Alibori	33.000	16,03
Zou-collines	65.000	31,57
Mono-Couffo	17.400	8,45
Ouémé-Plateau	19.000	9,23
Atlantique	15.000	7,28
Total	205.900	100

Source : Fao/NEPAD 2005 cité par (KONNON et al., 2014)

3. LES CONSTRUCTION TERRE-BOIS DE RÔNIER

3.1. Le palmier rônier

Le palmier rônier, *Borassus Aethiopum Mart, Arecaceae*, est un arbre ligneux qu'on trouve dans les régions tropicales de l'Afrique sahélienne. Il a été découvert par le botaniste sénégalais Adamson depuis 1750 qui l'appela « ron », mot qui fût transformé ultérieurement en rônier. Les peuplements de rônier s'étendent en Afrique tropicale dans les zones semi-arides et subhumides avec de grands peuplements en Mauritanie, Sénégal, Mali, Guinée, Niger, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée Bissau et à Madagascar. Il est aussi connu sous le nom de palmier à sucre (français), Palmyra palm (anglais), Aghon Oludu (yoruba), Sébé (mina) ou Agontin (fon). Avec une hauteur pouvant atteindre 25 mètres, il peut avoir jusqu'à 60 cm de diamètre. Après 30 ans de vie, il se forme un renflement près de la couronne avec un second qui se forme après 90 à 120 ans (figure I.14a). Le rônier est un bois localement disponible qui est employé dans diverses activités de construction surtout dans les ouvrages de génie civil. Il est également cultivé pour le sucre de son fruit (figure I.14b) en Asie.

Au Bénin, on retrouve le rônier dans presque toutes les contrées (HOUANKOUN, 2004). En effet, on le retrouve dans l'Atlantique (Cococodji, Pahou), le Mono (Sè, Adjaha), les Collines (Savè et Glazoué), le Borgou (Sinendé), l'Alibori (Goroubi, Loumbou-Loumbou, Karimama) et l'Atacora (Kérou, Matéri). GBESSO et al. (2014) ont étudié sa distribution géographique dans la zone méridionale et ont montré que Savè et Glazoué sont des zones à forte prédominance de rônier dépassant ainsi Bassila et la zone du Borgou sud. L'espèce la plus répandue au Bénin, d'après les résultats des enquêtes réalisées auprès des populations, est le rônier. Le bois de rônier représente un potentiel économique important. D'après les travaux de GBESSO et al. (2014), les habitats préférés du *Borassus Aethiopium Mart* sont les savanes, précisément les savanes humides et les galeries forestières.



Figure I.14 : (a) Rônier adulte avec un renflement (a) Fruit mûr du Borassus (b)

3.2. Les caractéristiques du bois rônier

3.2.1. L'anatomie du bois rônier

La structure anatomique du rônier se présente sous forme d'une couronne en couches concentriques (GBAGUIDI-AISSE et al., 2011). Elle est composée de l'extérieur vers l'intérieur (figure I.15) :

- d'une écorce constituée des cellules mortes,
- du duramen qui est la partie correspondant aux zones d'accroissement les plus anciennement formées et qui ne comportent plus de cellules vivantes appelé généralement "bois parfait". Il s'agit d'un bois dur, compact, dense, sec et imputrescible. Il est le plus souvent sombre et occupe les couches externes sous l'écorce.
- de l'aubier qui la partie généralement moins dure que le duramen et de couleur blanchâtre qui correspond aux zones d'accroissement les plus récemment formées. Il contient des cellules vivantes.
- de la moelle ou du cœur qui est la partie centrale spongieuse qui est très riche en eau et en hydrate de carbone.

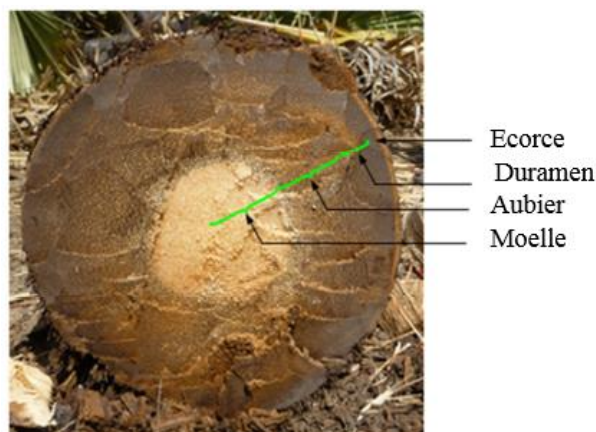


Figure I.15 : Coupe transversale du rônier

3.2.2. Les propriétés chimiques, mécaniques et thermiques du rônier

Les caractéristiques chimiques du bois de rônier issus de deux études sur des échantillons provenant du Tchad sont présentées dans le tableau I.4.

Tableau I.4: Caractéristiques chimiques du rônier

Pays	Humidité (%)	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Extractibles (%)	Références
Tchad	-	62,57	10,46	19,52	7,48	(NGARGUEUEDJIM et al., 2016)
Tchad	17 ± 0,87	72	16	35	-	(BLANPAMBE et al., 2015)

Comme nous l'avons vu précédemment, la cellulose qu'on retrouve sous forme de fibres constituent des renforts et améliore la résistance à la traction. La structure de la cellulose de forme de chaîne de grande rigidité lui permet de s'associer parallèlement en une structure micro fibrillaire plus ou moins cristalline. Avec cette géométrie qui leur permet de s'entasser et de se lier les unes aux autres, elles forment la microfibrille (fibre primaire). Cette structure compacte et très ordonnée est due aux nombreuses liaisons hydrogènes intramolécules et intermolécules à l'intérieur de la structure. La cellulose, principal constituant de la fibre, confère au bois rônier sa structure très dense en fibres et très compacte ainsi que sa grande résistance aux dégradations chimiques et physiques. La lignine et l'hémicellulose forment une matrice et contribuent à la distribution des contraintes et à la stabilité de l'ensemble de la structure. La lignine est un biopolymère stable vis à vis de la chaleur et des agents de modification physique et biologique de la structure cellulaire. Elle renforce cette résistance aux dégradations (FELBY et al., 2002).

Les caractéristiques mécaniques du bois rônier à savoir sa résistance en traction (R_t), en compression (R_c), en flexion (R_f), en cisaillement (R_{cis}) et son module d'élasticité (E) ont été étudiées par plusieurs auteurs et sont résumées dans le tableau I.5. Ces caractéristiques ont été déterminées sur le bois dur, le duramen.

Tableau I.5: Propriétés mécaniques du rônier

	R_t (MPa)	R_c (MPa)		R_f (MPa)	R_{cis} (MPa)		E (MPa)
Références	// fibres	// fibres	⊥ fibres		// fibres	⊥ fibres	
SAMAH et al., 2013	105	92,5	26	91,4		6,5	15900
GBAGUIDI A. I. K. et al., 2011	303	82	22		0,88	13,59	17196
BLANPAMBE et al., 2015							1918

La conductivité thermique du bois de rônier a été mesurée par AHOUANNOU et al. (2014). Les résultats montrent une certaine anisotropie puisque la conductivité thermique varie de 0,23 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ dans la direction tangentielle à 0,34 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ dans la direction axiale. Ces valeurs

sont du même ordre de grandeur que celles mesurées sur un autre bois tropical, le teck (les valeurs respectives dans ces deux mêmes directions sont 0,30 et 0,55 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

3.3. Utilisation du rônier dans les constructions

Le rônier est un bois traditionnellement accepté et localement utilisé pour les travaux portuaires et la construction navale. De forte densité, il résiste également bien aux termites et aux xylophages marins. C'est un bois imputrescible qui peut conserver son intégrité en usage pendant plusieurs siècles (DIALLO et al., 1998). Son utilisation comme matériau de construction est d'une tradition très ancienne et remonte même au néolithique. Il est classé parmi les espèces à vocation de bois d'œuvre. Matériau composite naturel, le bois rônier présente une bonne densité comparativement aux autres espèces. Presque toutes ses parties sont utiles : son stipe (le tronc avant le renflement) pouvant dépasser 15 m de hauteur est utilisé dans les charpentes des habitats traditionnels et semi-modernes. Le taux d'humidité optimal d'utilisation admis est compris entre 16% et 18% (mesuré selon la norme NF B 51-002) (NGARGUEUEDJIM et al., 2015).

Au Bénin spécifiquement, c'est un bois qui avait été utilisé pour la construction des bâtiments coloniaux. Dans le musée d'Abomey en République du Bénin (figure I.16a), et dans les constructions traditionnelles (constructions en terre), le rônier est utilisé sous forme de platelage servant de linteau pour assurer la continuité des murs après la réalisation des baies de portes et de fenêtres.

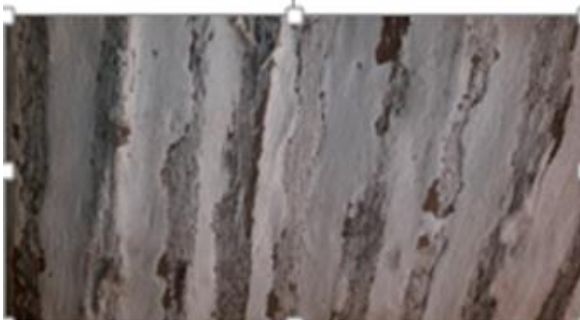
Il est également utilisé pour la charpente de toiture des bâtiments comme montant, diagonale et arbalétrier pour la réalisation des fermes et comme panne, chevron, en tant qu'éléments de répartition. Le bois de rônier est utilisé comme élément de structure (poutre, poteau) (figures I.16b, I.16c et I.16d).



a)



b)



c)



d)

Figure I.16 : a. Bâtiment colonial du musée d'Abomey, b : Linteau en rônier c : Vue agrandie de linteau en rônier, d : Charpente en bois rônier

Par ailleurs, une villa a été construite par le cabinet SECCART au Bénin dont le rônier est utilisé comme armatures pour des poteaux raidisseurs (figure I.17).



Figure I.17 : Utilisation du bois rônier pour la construction d'une villa en terre de barre stabilisée (KOUKOUBOU, 2017)

4. SYNTHÈSE ET PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

4.1. La construction en terre crue aujourd'hui

Dans la plupart des régions du monde et notamment dans les pays africains au sud du Sahara, 30% de la population vit dans des habitations construites avec des adobes (BINICI HANIFI et al., 2005). Malheureusement, l'architecture de l'habitat rural est encore dans un état presque « primitif » comme le montre la photographie de la figure I.18 du fait de la non-modernisation de l'adobe et des techniques de construction utilisées, comparées à celles de l'architecture moderne occidentale.



Figure I.18 : Photographie d'un exemple d'habitat traditionnel rural africain

Selon le recensement général de la population et de l'habitation (RGPH 3, 2002), 60% de la population est rurale et vit dans des habitats précaires, délabrés, à l'image de celui de la figure I.18. Selon le programme de développement socio-économique du Bénin (ALAFIA, 2025) plus d'un Béninois sur deux vivra en ville à l'horizon 2030. Dans le souci de l'amélioration du cadre de vie et pour anticiper les conséquences de la forte croissance de la population et l'urbanisation rapide, les gouvernants du Bénin luttent sur deux fronts :

- i) moderniser l'habitat rural par la nature des constructions et en utilisant les matériaux locaux pour augmenter la qualité de vie des populations rurales,
- ii) prévenir la tendance à la « bidonvilisation » si caractéristique des villes africaines à travers des programmes de logements sociaux à moindre coût dans les zones péri-urbaines, avec la prise en compte de la maîtrise de l'efficacité énergétique.

De façon pratique, cette politique vise à mettre à la disposition des populations des logements confortables et modernes et à moindre coût par la valorisation des matériaux locaux de construction, dont la terre.

En parallèle de cette problématique des habitats ruraux africains, la construction en terre crue, en général, a besoin aujourd'hui d'être modernisée dans sa mise en œuvre. En effet, en France et partout dans le monde, essentiellement pour des raisons écologiques, la terre crue est de plus en plus plébiscitée dans la construction moderne mais son développement est freiné par certains inconvénients de la terre et par son utilisation encore très artisanale. Là aussi, des développements sont nécessaires que ce soit pour améliorer les performances du matériau terre ou pour moderniser sa mise en œuvre par le développement de nouveaux procédés constructifs.

4.2. Améliorations envisagées sur le matériau terre et le dispositif constructif

4.2.1. Composite terre, paille de riz et décoction de *Parkia biglobosa* (Néré)

Malgré ses multiples avantages (résistance au feu, inertie thermique et abondante disponibilité sur place), la terre crue présente certains inconvénients importants pour son utilisation comme matériau de construction :

- la principale est sa faible résistance à l'eau qui conduit à des problèmes importants de durabilité,
- ses variations dimensionnelles importantes en fonction de la composition de la terre utilisée (retrait/gonflement) qui peuvent conduire à de la fissuration,
- sa faible résistance à l'abrasion qui pose problème lorsque ce matériau est utilisé apparent à l'intérieur des habitats comme c'est souvent le cas.

Comme nous l'avons vu dans la bibliographie, il existe des ajouts naturels qui permettent d'améliorer le comportement de la terre crue et qui présentent l'avantage d'être écologiques et disponibles. De nombreuses études ont porté récemment sur l'utilisation de fibres ou de biopolymères dans les matériaux en terre crue et nous proposons dans ce présent travail une étude originale sur l'incorporation dans les matériaux en terre crue de fibres de paille de riz et la décoction des graines de *Parkia biglobosa* (Néré). L'étude de ce nouveau composite s'inspire du matériau utilisé pour la construction du grenier en terre de la figure I.12 qui ont notamment prouvé leur longévité (certains greniers en terre ont une durée de vie de plus de 50 ans) et leur résistance très importante aux intempéries. Comme cela l'a été montré dans l'étude bibliographique, les deux matériaux ajoutés (paille de riz et décoction) devraient permettre d'améliorer le comportement du composite à base de terre :

- les fibres vont réduire les variations dimensionnelles (notamment lors du retrait de séchage), améliorer les performances mécaniques et améliorer les performances d'isolation thermique du matériau,
- l'action de la décoction de néré pose plus de questions : elle était utilisée par les anciens à la fois comme fluidifiant mais aussi à la surface de certains enduits comme imperméabilisant. Ainsi, l'action fluidifiante améliorera la mise en œuvre du matériau tout en permettant de réduire la quantité d'eau ajoutée aux mélanges, ce qui aura deux conséquences majeures : une diminution du retrait et une augmentation des résistances mécaniques. De plus, l'ajout de décoction de néré aux mélanges pourrait améliorer la tenue du composite à l'eau comme la résistance exceptionnelle des greniers en terre aux intempéries semble le prouver. On peut noter ici qu'une partie de cette résistance à l'eau est sans doute liée aussi à la présence de paille de riz car la littérature a montré à plusieurs reprises que l'ajout de fibres végétales améliore la résistance à l'érosion ainsi qu'à l'abrasion (MILLOGO et al., 2014 ; OUEDRAOGO et al., 2019).

4.2.2. Planchers poutrelles et entrevous en terre crue

La seconde piste d'amélioration de la construction en terre crue envisagée dans cette thèse porte sur le dispositif constructif. Dans ce travail, nous allons nous intéresser en particulier à la problématique de la réalisation de planchers en terre crue.

Il existe plusieurs technologies de réalisation de planchers en béton armé et parmi elles on trouve la technique des poutrelles et entrevous. Le principe de cette technique est que les éléments de coffrage utilisés pour la réalisation du plancher se présentent sous la forme d'entrevous qui viennent s'intercaler entre des poutrelles et servent de coffrages audit plancher. De manière générale, les entrevous utilisés dans l'industrie du bâtiment sont des éléments préfabriqués. Ils sont la plupart du temps portés par des poutrelles, l'ensemble formant une structure coffrante sur laquelle est coulée une dalle de compression.

La figure I.19 montre l'exemple d'un plancher à base de poutrelles et d'entrevous fabriqués à partir de matériaux dits « conventionnels » (matériaux cimentaires et acier).

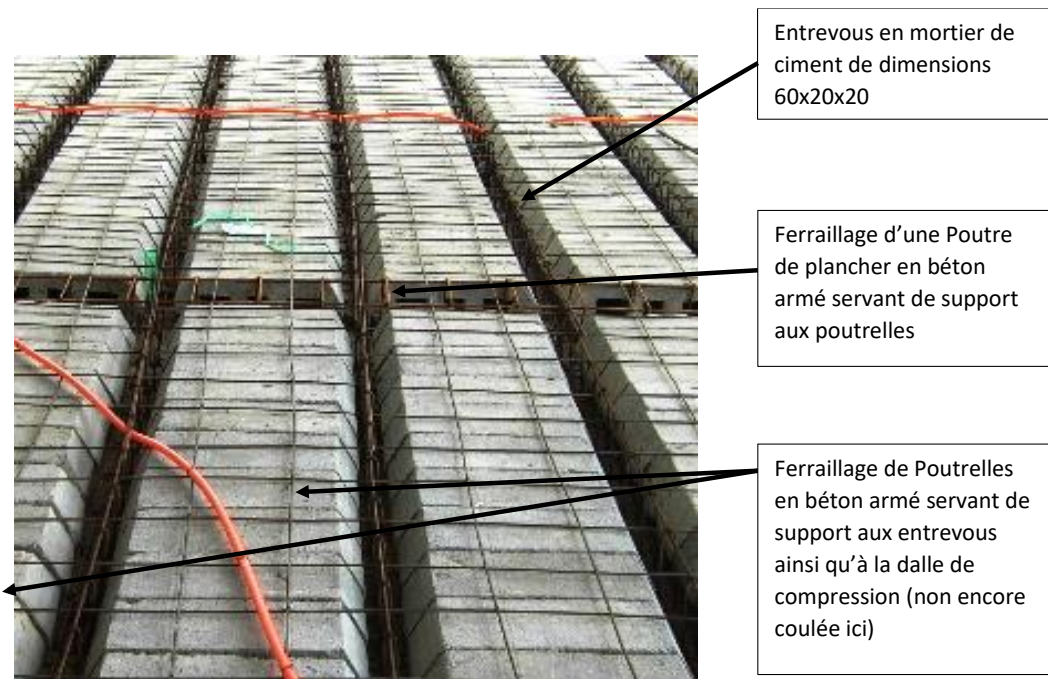


Figure I.19 : Vue partielle d'un plancher en matériaux conventionnels, en attente de recevoir la dalle de compression (Cliché ADAGBE)

Des retours d'expérience en lien avec la construction des pavillons en matériaux conventionnels (ciment, sable, gravier, fer à béton) dans les pays africains de l'Afrique de l'Ouest ont montré que le coût du gros œuvre (maçonnerie, béton) est de l'ordre de 55% du coût total de la construction. Selon l'Association des Artisans du Bénin, le coût du fer à béton dans la mise en place des planchers des pavillons à étages est de l'ordre de 50% de celui des mortiers et bétons, nécessaires pour cette partie d'ouvrage. Il s'ensuit que pour ériger des pavillons à moindre coût, il serait intéressant de trouver une alternative à l'utilisation du fer à béton.

A cet effet, dans le cadre de la présente thèse, nous allons nous intéresser à l'utilisation du bois de rônier qui connaît quelques applications dans les constructions présentées dans le chapitre 3 de cet état de l'art. Le bois de rônier a déjà été utilisé (de façon empirique) dans les éléments de structures des constructions coloniales dans certaines grandes villes coloniales du Bénin comme Cotonou, Porto-Novo, Abomey, Parakou et Natitingou (BOUKARY, 2000).

4.3. Programme de recherche de la thèse

Notre projet de recherche vise à développer un principe constructif original de plancher à base de terre renforcée par de la paille de riz et des armatures de bois en rônier. Le système s'apparentera à celui des planchers à poutrelles et entrevous :

- les entrevous seront faits en matériau composite terre, paille de riz et décoction de néré,
- les poutrelles armées seront constituées de béton de terre contenant de la paille de riz et de la décoction de néré et les armatures longitudinales seront en rônier.

Pour atteindre ces objectifs, notre travail va se décomposer en trois parties :

- nous allons dans un premier temps caractériser de manière approfondie tous les matériaux que nous allons utiliser durant cette thèse : les terres, la paille de riz, les fluidifiants (décoction de néré et hexamétaphosphate de sodium) et les bois servant pour les armatures du béton de terre armé,
- nous allons ensuite formuler et caractériser les mélanges terre, paille de riz et décoction de néré qui vont servir à la fabrication des entrevous en terre. Des entrevous seront fabriqués avec le composite optimisé et caractérisés conformément aux normes en vigueur,
- enfin, la troisième partie sera consacrée à l'étude des poutres en béton de terre armé de bois. Dans cette partie, nous formulerons et caractériserons un béton de terre sur les mêmes bases que le composite utilisé pour la fabrication des entrevous et, ensuite, nous nous intéresserons aux propriétés des éléments en béton de terre armé de bois (adhérence et flexion 4 points).

5. REFERENCES

- ADAGBE M.T. Caractérisation physique, mécanique et thermique du matériau banco de grenier en vue de son utilisation dans les blocs de maçonnerie. Mémoire d'Ingénieur de Conception en Génie Civil BTP/ Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, Bénin, 2014, p. 168.
- ADEGBOLA Y.P., AHOYO ADJOVI N.R., ALLAGBE C.M., HOUSSOU A.P.F. et al. Deuxième partie : analyse bibliographique critique des travaux effectués par domaine sur le riz et la riziculture au Bénin. Document technique et d'informations, Centre de Recherche Agricole à vocation Nationale basé à Agonkamey, 2014, p. 69.
- AHOUANNOU C., VODOUNNOU E., AGOUA E., SANYA E. A., GBAGUIDI V., JANNOT Y., VIANOU A. Détermination expérimentale et approches simplifiées de modélisation des propriétés thermo-physiques du bois borassus (palmier rônier). Journal de Recherche Scientifique, Université de Lomé (Togo) Série E, 16(2), 2014, 189-201.
- ALAFIA 2025 : Plan national, Ministère de la Planification (ou du Plan), Bénin, 2000.
- AMBARKA I. Etude des ouvrages de stockage de type traditionnel des produits vivriers dans la Donga. Mémoire d'Ingénieur des travaux en Génie Civil, EPAC, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2002.
- AMBARKA I. Caractéristiques physico-mécaniques du matériau banco et vérification de la résistance portante mécanique des greniers en terre dans le nord du Bénin. Mémoire d'ingénieur de conception en Génie Civil / Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso, 2010, p. 94.
- ANGER R., FONTAINE L. Interactions argiles/biopolymères : Patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale. Rapport final projet PaTerre+, 2013, p585.
- AYIHOUENOU E. B., FANDOHAN A. B., SODE A. I., GOUWAKINNOU N. G. et DLOSSA A. B. Biogéographie du néré (*Parkia Biglobosa* (Jack) R. Br. Ex. Don) sous les conditions environnementales actuelles et futures au Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB), Numéro spécial Agronomie, Société, Environnement et Sécurité Alimentaire, 2016, p 93-108.
- BALEY C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur, 2004, AM 5 130.
- BANAKINAO S., TIEM S., ATTIPOU K., NOVINYO K., LOLO K., KOUTSAWA Y., BEDJA K. Use of the Nere Pod (*Parkia Biglobosa*) for the improvement of mechanical properties of soils. American Journal of Applied Sciences 14 (2), 2017.
- BIANPAMBE H., NGARGUEDEDJIM K., BASSA B., LEMANLE SANGA R.P., NTAMACK G.E., CHARIF D'OUAZZANE S. Caractérisation physico-chimique et mécanique du bois rônier du Tchad. 12ème congrès de Mécanique 21-24 Avril 2015 Casablanca (Maroc).

BINICI H., AKSOGAN O., SHAH T. Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials* 19, 2005, 313-318.

BOUKARY B.A. Architecture et Structure de bâtiments coloniaux des villes historiques du Bénin : Cas de Porto-Novo dans le cadre de la vulgarisation et de la promotion des matériaux locaux. CPU-UNB, Abomey-Calavi, 2000.

CARMA, Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés. Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable, 2006, p. 24.

CRATERRE. Bloc de terre comprimée, Eléments de base. GATE, Eschborn, Allemagne, 1991, p. 28.

DAO K., OUEDRAOGO M., MILLOGO Y., AUBERT J.E., GOMINA M. Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 2018, 84–96.

DEWULF M. Le torchis mode d'emploi : connaître la terre crue, interpréter les désordres, organiser le chantier, restaurer et protéger le torchis. Editions EYROLLES, 2015.

DIALLO A. K., DIOP I., SOW M.B. Problématique de la gestion durable du rônier dans la sous-région Ouest-africaine. Atelier technique sur le rônier en République de Guinée Conakry, 1998.

DUJARDIN N. Un matériau biosourcé de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications. 25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement, L'économie verte en question, 2014.

EYOG-MATIG O., GAOUE O.G., DOSSOU B. Réseau « Espèces ligneuses alimentaires ». Compte rendu de la première réunion du réseau tenue les 11-13 décembre 2000 au CNSF Ouagadougou, Burkina Faso. Institut Internationale des Ressources phytogénétiques, 2002, 235p.

FAO. Evaluation des ressources en produits forestiers non ligneux. FAO, Rome, Italie, 2001, 119p.

FELBY C., HASSINGBOE J., LUND M. Pilot-scale production of fiber boards made by laccase wood fibers. Board properties and evidence for cross-linking of lignin. *Engyme and Microbial Technology* 31, 2002, 736-741.

GALAN-MARIN C., RIVERA-GOMEZ C., PETRIC J. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fiber. *Construction and Building Materials*, 2010.

GBAGUIDI-AISSE L.G., GBAGUIDI V.S., GIBIGAYE M., AMADJI T.A., AGOSSOU Y.D., SOCLO P., SINSIN B.A. Etude de la possibilité d'utilisation du rônier comme armature végétale dans les éléments en béton: cas des poutres. *Annales des Sciences Agronomiques*, 15, 2011.

GBESSO F., YEDOMONHAN H., TENTE B., AKOEGNINOU A. Distribution géographique des populations de rôniers (*Borassus aethiopum* Mart, Arecaceae) et caractérisation

phytoécologique de leurs habitats dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Journal of Applied Biosciences* 74, 2014, 6099- 6111.

GIBIGAYE M., ZENOUVO C., GBAGUIDI G.L., KAKI C., LABI R.A., AMBARKOU I., DEGAN G. Physical and mechanical characteristics of earthen barns used for food crop storage in North West of Benin (West Africa). *Les nouvelles de l'université Russe d'amitié des peuples: série les études des ouvrages d'ingénieur* 1, 2013, 48-58.

GODIN B., GHYSEL F., AGNEESESENS R., SCHMIT T., GOFFLOT S., LAMAUDIERE S., SINNAEVE G., GOFFART J. P., GERIN P. A., STILMANT D. et al. Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération. *Biotechnol Agron Soc* 14, 2010, 549-560.

GREESHMA P.G., JOSEPH M. Rice straw Reinforcement for Improvement in Kuttanad clay. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, 2011.

HAMARD E., LEMERCIER B., CAZACLIU B., RAZKAMANANTSOA A., MOREL J.C. A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – Application to cob in Brittany. *Construction and Building Materials* 170 (2018) 485–497. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097.

HOUANKOUN D.S.E. Importance socio-économique du rônier : Différents usages et commercialisation de quelques sous-produits au Bénin. *Mémoire de DEA, EDP/GEN-UAC, Bénin*, 2004, p. 105.

HOUBEN H., GUILLAUD H.. *Traité de construction en terre*. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 2006, p 335.

JOSHI S.V., DRZAL L.T., MOHANTY A.K., ARORA S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 2004, 371-376.

KEITA I., SORGHOB., DEMBELE C., PLEA M., ZERBO I., GUEL B., OUEDRAOGO R., GOMINA M., BLANCHART P. Ageing of clay and clay–tannin geomaterials for building. *Construction and buildings materials* 61, 2014, 114-119.

KONNON D., SOTONDJI C.S., ADIDEHOU Y.A. Rapport de l'étude d'état des lieux de la filière riz au Bénin en 2014. *Rapport final, Conseils de Concertation des Riziculteurs du Bénin (CCR-B)*, 2014, p97.

KOUKOUBOU C.A. Analyse élasto plastique d'une pièce fléchie à base du béton armé de rônier. *Mémoire d'Ingénieur de Conception en Génie Civil BTP, Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, Bénin*, 2017, p125.

LABOREL-PRENERON A. Formulation and characterization of unfired clay bricks with plant aggregates. *Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III*, 2017, p. 260.

LABOREL-PRENERON A., AUBERT J.E., MAGNIONT C., BERTRON A., TRIBOUT C. Plant aggregates and fibers in earth construction materials: a review. *Construction and Building Materials*, 111, 2016, 719-734. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119.

LAMIEN N., EKUE M., OUEDRAOGO M., LOO J. *Parkia biglobosa*, néré. Conservation et utilisation durable des ressources génétiques des espèces ligneuses alimentaires prioritaires de l'Afrique subsaharienne. Bioversity International, Rome, Italie, 2011, 8p.

LANDROU G., BRUMAUD C., WINNEFELD F., FLATT R.J., HABERT G. Lime as an Anti-Plasticizer for Self-Compacting Clay Concrete. *Materials*, 9(5), 2016, p.330.

LEWIS J.A. Colloidal Processing of Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 83(10), 2000, 2341–2359.

MAKRI M., MASSON C., VERDAN M., GUEDIRA M., BOISSARD J.-B. *Projet GE 12, Construire en terre*. Université de Technologie Compiègne, 2000.

MILLOGO Y., MOREL J.C., AUBERT J.E., GHAVAMI K. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 2014, 71–78.

MILLOGO Y., AUBERT J.E., SERE A.A., FABBRI A., MOREL J.C. Earth blocks stabilized by cow-dung. *Materials and structures*, 49, 2016, 4583–4594.

MOEVUS M., JORAND Y., OLAGNON C., MAXIMILIEN S., ANGER R., FONTAINE L., ARNAUD L. Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. *Materials and Structures* 49, 2016, 1555–1568.

NGARGUEUEDJIM K.N., BASSA B., ALLARABEYE N., ANNOUAR V., ABDEL-RAHIM M., SOH FOTSING B., FOGUE M. Caractéristiques physiques du bois Rônier (*Borassus aethiopum* Mart., Arecaceae) du Tchad. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 13(3), 2015, 553-560.

NGARGUEUEDJIM K.N., MBAYNGONE E., NADJITONON N., BASSA B., ALLARABEYE N., DESTREBECQ J.-F., MOUTOU PITTI R., AGNES R. Caractérisation anatomique et chimique du bois rônier (*Borassus Aethiopum* Mart, Arecaceae) du Tchad. *International Journal of Innovation and Scientific research* 20(1), 2016, 129-137.

NTOUDA NKE R.J. Etude de la résistance mécanique des blocs de latérite ayant subi un traitement de renforcement. Mémoire du master d'ingénierie en génie civil, Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2009, p87.

OUEDRAOGO A.S. *Parkia biglobosa* (Leguminosae) en Afrique de l'Ouest: Biosystématique et Amélioration. Thèse doctorat de Wageningen University (Institute for Forestry and Nature Research), 1995, 205p.

OUEDRAOGO M., DAO K., MILLOGO Y., AUBERT J.E., MESSAN A., SEYNOU M., ZERBO L., GOMINA M. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *Journal of Building Engineering*, 23, 2019, 250-258.

OUELLET-PLAMONDON C.M., HABERT G. Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept. *Journal of Cleaner Production*, 117, 2016, 160–168.

PERELLO B. Pisé or not pisé? Problème de définition des techniques traditionnelles de la construction en terre sur les sites archéologiques. *ArchéOrient - Le Blog*, 4 septembre 2015, <https://archeorient.hypotheses.org/4562>

PINEL A. Transition liquide-solide dans des dispersions d'argiles contrôlée par un biopolymère. Application à la construction en terre. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, 2017, p. 234.

PINEL A., JORAND Y., OLAGNON C., CHARLOT A., FLEURY E. Towards poured earth construction mimicking cement solidification: demonstration of feasibility via a biosourced polymer. *Materials and Structures* 50, 2017, 224.

QUAGLIARINI E., LENCI S. The influence of natural stabilizers and natural fibers on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11, 2010 309-314.

RGPH 3 : Troisième Recensement General de la Population et de l'Habitation, Rapport Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE), Bénin 2002.

RIGASSI V. Blocs de terre comprimée - Volume I. Manuel de production. CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 1995, p. 104.

SNDR. Stratégie nationale de développement de la riziculture. 2011.

SORGHO B., BRESSOLIER P., GUEL B., ZERBO L., OUEDRAOGO R., GOMINA M., BLANCHART P. Etude des propriétés mécaniques des géomatériaux argileux associant la décoction de *Parkia Biglobosa* (nééré). *Comptes Rendus Chimie* 19, 2016, 895-901.

TAALLAH B. Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2014, p. 202.

VAN DAMME H., HOUBEN H. Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research* 114, 2018, 90-102.

VOLKOFF B., WILLAIME P. Notice explicative n°66. Carte pédologique de reconnaissance de la République populaire du Bénin à 1/200.000. Feuille de Porto-Novo (1). Paris ORSTOM, 1976, 39p.

WAMBUA P., IVENS J., VERPOEST I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 2003, 1259-1264.

YETGIN S., CAVDAR O., CAVDAR A. The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(3), 222-227.

Chapitre 2 : CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES

SOMMAIRE

1. MATERIAUX	57
1.1. Les terres	58
1.2. Les fibres végétales : la paille de riz	59
1.3. Les plastifiants : la décoction de néré et l'Hexamétaphosphate de sodium	60
1.4. Armatures en bois	60
2. PROCEDURES	63
2.1. Caractérisation géotechnique des terres	63
2.2. Caractérisation chimique et minéralogique	66
2.3. Caractérisation physique et morphologique de la paille de riz	68
2.4. Caractérisation physique et mécanique des éprouvettes de bois	69
3. CARACTERISTIQUES DES TERRES	74
3.1. Caractéristiques géotechniques des terres	74
3.2. Caractéristiques chimique et minéralogique des terres	78
4. CARACTERISTIQUES DES TIGES DE PAILLE DE RIZ	82
4.1. Masse volumique apparente et conductivité thermique des fibres	82
4.2. Absorption d'eau des fibres	82
4.3. Analyse morphologique des fibres	83
4.4. Analyse chimique et minéralogique des tiges de paille de riz	85
5. CARACTERISTIQUES DES BOIS	87
5.1. Masse volumique et humidité	87
5.2. Dureté	88
5.3. Résistance en compression	89
5.3. Résistance en flexion	91
6. CONCLUSION	94
7. REFERENCES	95

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matières premières utilisées durant cette thèse. Dans un premier temps, nous présenterons les matériaux que nous avons utilisés dans notre travail. Nous avons d'abord envisagé de ne travailler que sur des matériaux provenant du Bénin mais des problèmes administratifs aux cordons douaniers nous ont obligés à remplacer ces matériaux par des matériaux français pour l'étude sur les poutres armées.

Un des objectifs de ce chapitre est de présenter les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans ce travail. Aussi, dans un second temps, nous présenterons les procédures des essais de caractérisation utilisés avant de présenter, dans les trois dernières parties de ce chapitre, les résultats des essais de caractérisation réalisés sur les différents types de matériaux (terres, fibres végétales et bois).

1. MATERIAUX

Au démarrage de la thèse, nous avons envisagé de ne travailler qu'avec des matériaux locaux provenant du Bénin :

- Une terre dite de « barre » sélectionnée par une étude préliminaire réalisée sur 6 sites de prélèvement.
- De la paille de riz provenant de la riziculture de Zinvié utilisée comme renfort,
- De la décoction de Néré utilisée comme plastifiant.

Pour la première partie de la thèse qui concernait l'optimisation des mélanges pour la fabrication d'entrevous, nous avons pu utiliser ces matériaux car les quantités nécessaires n'avaient pas posé de problèmes spécifiques d'acheminement du Bénin vers la France. Par contre, quand nous avons voulu envoyer des quantités plus importantes, avec en plus des échantillons de rônier, pour les poutres armées, nous avons été confrontés à des soucis majeurs de transport de ces matériaux (notamment de douanes et de vérification de la non dangerosité de nos matériaux (par exemple au niveau de la problématique des termites)). Nous avons perdu un temps considérable à essayer de résoudre ce problème qui finalement n'a pu l'être et pour cette seconde partie de notre étude sur les poutres de béton de terre armé par des armatures en bois, nous avons finalement décidé de remplacer les matériaux béninois par des matériaux français aussi semblables que possible :

- Une terre proche de Toulouse provenant de la briqueterie « Bouisset » a été sélectionnée car elle contenait les mêmes argiles que la terre de barre du Bénin.
- De la paille de riz provenant de Camargue,
- La décoction de néré a été remplacée par de l'héxamétaphosphate de sodium comme plastifiant. Enfin, pour les armatures, nous avions prévu initialement de travailler avec une essence locale couramment utilisée au Bénin (le rônier) mais nous avons dû réaliser une partie de l'étude sur un bois de substitution facilement accessible en France, le pin. L'ensemble de ces matériaux vont être présentés dans ce chapitre.

1.1. Les terres

1.1.1. La terre de barre (Bénin)

Le sol argileux du Bénin est un sol sableux argileux communément appelé terre de barre. Il s'agit d'un sol ferralitique présent dans le sous-sol du Bénin au niveau du bassin sédimentaire côtier. Cette terre se caractérise par une altération poussée des minéraux primaires, une présence presque exclusive de la kaolinite comme minéral argileux et une couleur rouge. Au Bénin, les études ont identifié 18 sites favorables au niveau du bassin sédimentaire côtier. Les réserves minimales évaluées s'élèvent à 10 410 949 m³ sur les plateaux du bassin sédimentaire côtier (départements de l'Atlantique, de l'Ouémé, du Plateau, du Mono et du Couffo) et 724 806 m³ au niveau des zones du socle, des unités structurales de l'Atacora, du Buem et du Bassin sédimentaire de Kandi (départements des Collines, du Borgou de l'Alibori, de l'Atacora et de la Donga).

Dans la base mondiale de classification des sols, ce type de sol se rencontre sur toutes les plateformes continentales terminales et sur le grès du Crétacé dans le sud-ouest du bassin sédimentaire, de la zone climatique côtière et pré-côtière, sous des pluviométries moyennes annuelles comprises entre 850 et 1350 mm (YOUSSOUF et LAWANI, 2000). Cette terre de barre est utilisée pour des constructions en bauge ou en adobe depuis les temps anciens avec des constructions en BTC de nos jours.

Un travail préliminaire a consisté à faire la caractérisation physique des terres de la commune d'Abomey Calavi. Cette étude préliminaire a pour but de vérifier la disponibilité de terre pouvant servir à la construction en terre dans la commune. A cet effet des prélèvements ont été réalisés à 6 endroits répartis sur toute la commune. Il s'agit de : Zinvié (6°35'16,80''N ; 2°35'52,54''E), Misséssinto (6°31'16,80''N ; 2°22'02,56''E), Ouèdo (6°27'30,80''N ; 2°15'35,11''E), Kpakè (6°25'13,65''N ; 2°14'50,38''E), Togoudo (6°24'41,44''N ; 2°20'04,50''E) et du campus principal de l'Université d'Abomey Calavi (6°24'50,05''N ; 2°20'19,84''E).



a) Prélèvement de l'échantillon



b) Echantillon pour les essais de laboratoire

Figure II.1: Terre de barre du Bénin

1.1.2. La terre de Bouisset (France)

Pour la réalisation des poutres de béton de terre armé par des armatures en bois, nous avons besoin de grandes quantités de terre qui n'ont pu être envoyées du Bénin. Aussi, nous avons cherché à remplacer la terre de barre par une terre locale en France mais qui aurait des caractéristiques similaires. Les sols autour de Toulouse (dans le bassin de la Garonne) ont des minéralogies très différentes de la terre de barre : ce sont des sols constitués de montmorillonite et de chlorite alors que la terre de barre est constituée de kaolinite (CAGNON et al., 2014). Cependant, CAGNON et al. (2014) ont montré qu'il existe une briqueterie à une centaine de kilomètres de Toulouse (proche de Mazamet) dont la terre est très différente des terres classiques de la vallée de la Garonne. Similairement à la terre de barre du Bénin, la terre de Mazamet est une terre ferralitique de couleur rouge qui contient de la kaolinite et des paillettes brillantes dues à la présence de muscovite (figure II.2).

Cette terre sert régulièrement de référence pour les études réalisées au LMDC sur les matériaux en terre crue ((OUEDRAOGO, 2019), (LAGOUIN, 2020))



Figure II.2: Terre de Bouisset

1.2. Les fibres végétales : la paille de riz

Les pailles de riz utilisées durant cette thèse proviennent de deux origines différentes. Initialement, nous devions pour la totalité de l'étude utiliser des matériaux béninois et nous avons donc prélevé de la paille de riz de la riziculture de Zinvié du Bénin. C'est cette paille qui sera caractérisée dans ce chapitre et qui a servi à l'étude des matériaux composites utilisés pour la confection des entrevous étudiés dans le chapitre 3. Par contre, pour la confection des poutres, comme dans le cas de la terre, nous avons dû remplacer les matériaux béninois par des matériaux français et de la paille de riz originaire de Camargue nous a été fourni par une coopérative agricole proche d'Arles, le silo de Tourtoulon.

Chacune des 2 pailles a été débarrassée de ses feuilles non résistantes et ce n'est que la tige qui a ensuite été découpée en morceaux de $3\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$ comme le montre la figure II.3. Ces tiges ont été séchées jusqu'à poids constant avant d'être utilisées.



Figure II.3: Tiges de paille de riz coupées

1.3. Les plastifiants : la décoction de néré et l'Hexamétaphosphate de sodium

Dans la formulation du matériau composite, une partie de l'eau de gâchage a été remplacée par la décoction de néré que nous avons nous-même préparée. Elle est obtenue en ajoutant à un volume donné de grains de néré 5 fois le même volume de l'eau chauffé pendant 6 heures à 80°C environ. Cette décoction est un peu plus dense que l'eau et elle est sensée améliorer la maniabilité du mélange. Il s'agit d'une pratique ancestrale qui consiste à l'utilisation de l'eau issue de la préparation de la moutarde béninoise (à partir des graines de néré) pour la construction des maisons traditionnelles en banco. Dans la tradition, la réutilisation dans la construction des habitats ruraux de cette eau destinée à être jetée s'avérait louable.



Figure II.4: (a) Panicules de néré (b) Graines de néré (c) Décoction de néré

Toujours à cause des problèmes d'approvisionnement des matériaux en provenance du Bénin, nous avons décidé de remplacer cette décoction de néré par un fluidifiant chimique, l'HexaMétaPhosphate de sodium (HMP), pour le coulage des poutres.

1.4. Armatures en bois

Deux types de bois ont été utilisés dans cette thèse: du rônier du Bénin et du pin de France.

Le rônier

Le rônier utilisé pour nos travaux provient de la commune de Kpomassè au Bénin. Ce bois a été scié dans un arbre mâle d'environ 50 ans d'âge, non fourchu à cime bien équilibrée. Comme nous pouvons le voir sur la figure II.5, ce rônier mâle une fois abattu a été débarrassé du renflement et de la partie au-dessus du renflement. Seul le stipe a été scié et découpé en des lattes de dimension 3 cm x 10 cm x 60 cm pour être envoyées en France. Les lattes, une fois arrivées en France, ont été sciées en des armatures à section carrée (14 x14 mm²) pour la

confection des poutres armées. Ces lattes ont également été sciées pour la caractérisation physique et mécanique, réalisée à l'Institut Clément Ader (ICA) à Tarbes par le Professeur Florent Eyma.



Figure II.5: Utilisation du stipe du rônier (*Borassus Aethiopium*)

Le pin

Parce que nous pensions que nous ne pourrions pas recevoir les échantillons de rônier, nous avons voulu réaliser une preuve de concept avec une essence de bois facile à obtenir en France. Ainsi, nous sommes allés dans un magasin de bricolage pour acheter des tasseaux en pin de 14 mm x 14 mm x 2400 mm que nous avons ensuite sciés aux longueurs nécessaires pour la fabrication des éléments en béton de terre armé ou pour les essais de caractérisation. Même si cette essence de bois est très connue et largement caractérisée, il est difficile d'obtenir les fiches « produit » des matériaux dans ce genre de magasins. Aussi, pour les besoins de l'étude, avons-nous préféré caractériser de nouveau ces échantillons à l'ICA notamment pour pouvoir comparer les caractéristiques de cette essence avec celle du rônier. De plus, il n'a pas été possible de connaître la nature exacte du pin qui avait été utilisé (pin maritime, pin sylvestre, ...). On peut néanmoins penser que cet échantillon est du pin maritime et, de toute manière, les caractéristiques des différents pins sont très proches comme on peut le trouver dans les fiches issues de la base de données Tropix© 7 du CIRAD (centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) (<http://tropix.cirad.fr>).



Figure II.6: Tasseau en pin L.2, 40 m - section 14 x 14 mm acheté dans le commerce

2. PROCEDURES

2.1. Caractérisation géotechnique des terres

2.1.1. Granulométrie par tamisage

Un granulat est formé d'un ensemble de grains couvrant un certain nombre de classes granulaires. La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans ce granulat.

Cette caractéristique a été déterminée sur les deux types de terres utilisés dans cette étude à savoir la terre de barre du Bénin et la terre Bouisset de France. Les terres étant des terres argileuses contenant une proportion considérable de fines, la granulométrie par tamisage a été évaluée par voie humide suivant la norme (NF P94-041, 1995). La procédure consiste à séparer par lavage les grains agglomérés des terres puis à les fractionner au moyen d'une série de tamis (de 5 mm à 80 μ m) et à peser successivement après séchage à 105°C le refus cumulé sur chaque tamis. Les résultats sont arrondis au pour cent et fournis sous forme de graphique (courbe granulométrique). Le tamisât du tamis de dimension 80 μ m est recueilli sous forme de boue qui après décantation est séchée pour la granulométrie par sédimentation.

2.1.2. Sédimentométrie

Cette méthode (NF P94-057, 1992) complète l'analyse granulométrique par tamisage pour la granulométrie des particules < 80 μ m. Elle utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins est fonction de leur dimension. Elle est basée sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite des particules tombant sous l'action de la pesanteur dans un liquide visqueux au repos. La partie fine issue de la granulométrie par tamisage est mise en suspension dans de l'eau distillée avec une solution défloculante de 5% d'Hexamétaphosphate de sodium. Une éprouvette témoin contenant que de l'eau distillée est également préparée. Des mesures de densité et de température sont faites sur la suspension à différentes fréquences (15s, 30s, 1min, 2min, 5min, 10min, 20min, 40min, 80min, 4h et 24h). A chaque lecture, la densité de la solution à 0,0001 près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin à 0,1 °C près sont notées.

Pour chaque série de lectures, le pourcentage pondéral d'éléments inférieurs ou égaux à D contenus dans la suspension et le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées sont calculés. La distribution granulaire est présentée sous forme de courbes granulométriques classiques avec le pourcentage pondéral en ordonnée et la taille des particules en abscisse.

2.1.3. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont mesurées pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm) selon la norme (NF P94-051, 1993). Ce sont des paramètres d'identification des sols fins permettant de connaître la limite de liquidité à la coupelle et la plasticité du rouleau. De ces résultats, on déduit l'indice de plasticité qui caractérise la consistance des sols.

La limite de liquidité (W_L) est la teneur en eau exprimée en pourcentage au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide sous l'influence de son propre poids. Cette valeur est mesurée

à l'aide de l'appareil de Casagrande. Après avoir mélangé le sol fin et un certain volume d'eau, 70 g environ de ce mélange sont placés dans la coupelle et une rainure d'environ 2 mm est réalisée avec un outil normalisé. La manivelle de l'appareil est actionnée afin d'appliquer des chocs à la coupelle à raison de 2 chocs par seconde. On note le nombre N de coups provoquant la fermeture de la rainure normalisée sur une longueur d'environ un centimètre. On prélève alors environ 5g de part et d'autre des lèvres de l'échantillon pour réaliser une mesure de teneur en eau après séchage à 105°C. L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. La limite de liquidité est la teneur en eau du mélange dont la rainure se referme sur une longueur d'un centimètre après 25 chocs.

La limite de plasticité (W_p) correspond au passage de l'état solide à l'état plastique. Pour mesurer cette valeur, on étale une quantité donnée de pâte sur une plaque de verre pour faire des rouleaux de 3 mm de diamètre et de 10 cm de longueur. Si le rouleau se désagrège avant qu'il n'ait atteint le diamètre de 3 mm, on est au-dessous de la limite de plasticité ; il faut alors humidifier légèrement l'échantillon, malaxer et recommencer. Si, au contraire, le rouleau reste malléable et ne se fissure pas quand on le soulève de 1 à 2 cm par le milieu, c'est qu'il faut sécher la terre. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau pour laquelle le rouleau de 3 mm se fissure quand on le soulève de 1 à 2 cm par le milieu.

L'indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité (figure II.7). Cet indice mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il est en relation avec la quantité et la nature des argiles contenues dans le sol.

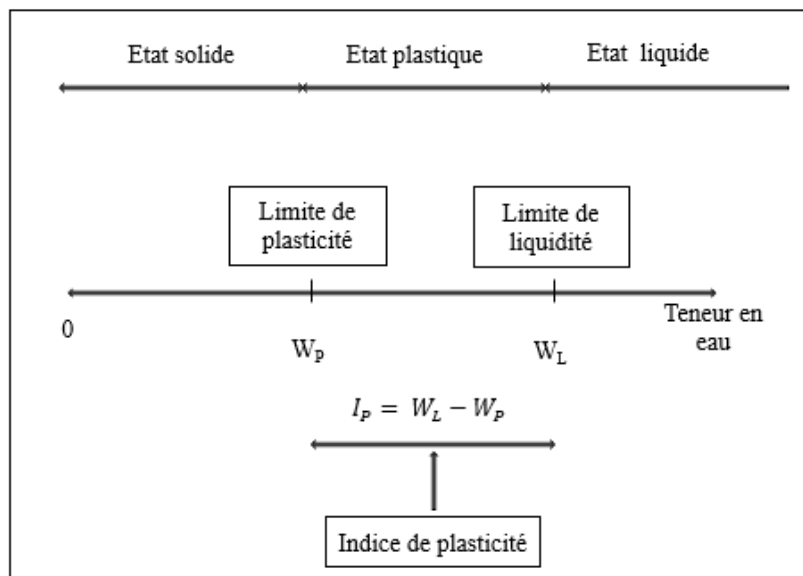


Figure II.7: Les limites d'Atterberg

Burmister cité dans (VERDEYEN et al. 1968) a proposé une classification des sols en fonction de leur I_p (Tableau II.1).

Tableau II.1: Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité (VERDEYEN et al., 1968)

Ip	Plasticité
0	Non plastique
1-5	Très faiblement plastique
5-10	Faiblement plastique
10-20	Moyennement plastique
20-40	Plastique
>40	Très plastique

2.1.4. Valeur au bleu

Cet essai est utilisé pour déterminer la propreté du sol et les différents types d'argiles qu'il contient. Il est réalisé conformément à la norme (NF P94-068, 1998). Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonite (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (illite et kaolinite) sont peu sensibles au bleu. C'est un essai qui consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/5 mm du sol. La valeur de bleu du sol peut être reliée à la surface spécifique des particules constituant le sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pendant toute la durée du dosage, une agitation permanente (vitesse 400 tr/min $\pm$ 100tr/min) est maintenue afin que toutes les particules de sol soient en suspension. Une goutte de la suspension prélevée est déposée sur un papier filtre, provoquant ainsi la création d'une tâche. Il faut procéder à des ajouts successifs de solution de bleu par pas de 5 cm³ à 10 cm³ (selon l'argilosité du matériau) jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tâche. On laisse se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et on effectue alors des tâches successives, de minute en minute, sans ajout de solution. L'essai est dit positif quand il demeure positif après cinq tâches consécutives (soit cinq minutes).

La valeur au bleu de méthylène VBS est calculée pour des sols de diamètre inférieur à 5 mm et s'exprime par : $VBS = \frac{B}{m_0} \times 100$ avec VBS exprimée en g ; B (solutions à 10 g/l) la masse de bleu introduite exprimée en g et m_0 la masse sèche de la prise d'essai exprimée en g.

Il existe six catégories de sols en France selon la valeur de VBS, d'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92) (NF P11-300, 1992) comme présenté dans le tableau II.2.

Tableau II.2: Classification des sols en fonction de leur valeur au bleu (NF P11-300, 1992)

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
$VBS < 0,1$	Sol insensible à l'eau
$0,2 \leq VBS < 1,5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq VBS < 2,5$	Sol sablo argileux, peu plastique
$2,5 \leq VBS < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq VBS < 8$	Sol argileux
$VBS > 8$	Sol très argileux

L'indice d'activité de bleu (A_{CB}) du sol peut être déterminé par la formule $A_{CB} = \frac{100 \times VBS}{C}$ où C est le pourcentage de la fraction argileuse ($< 2\mu m$).

Le tableau II.3 donne une classification de l'activité des argiles d'un sol en fonction de leurs A_{CB} selon (CHRETIEN et al., 2007)

Tableau II.3: Activité des argiles en fonction de leur indice d'activité au bleu (CHRETIEN et al., 2007)

A_{CB}	Qualificatif
< 3	Inactive
3-5	Peu active
5-13	Moyennement active
13-18	Active
> 18	Très active

2.2. Caractérisation chimique et minéralogique

La détermination des limites d'Atterberg et la courbe granulométrique sont insuffisantes pour préjuger complètement du comportement mécanique des sols. Il convient de connaître également leur mode de formation, c'est-à-dire entre autres, leur nature minéralogique et chimique.

2.2.1. Composition chimique par ICP-AES

La spectroscopie d'émission atomique à plasma à couplage inductif est une technique basée sur le couplage d'une torche à plasma et d'un spectromètre d'émission atomique.

L'ICP-AES est une méthode d'analyse multiéléments qui permet la mesure de plusieurs éléments tout en utilisant la mesure quantitative de l'émission optique provenant des atomes stimulés, pour déterminer la concentration de la substance à analyser. Elle permet d'analyser avec grande précision un grand nombre d'éléments en milieu aqueux et aussi l'analyse des solutions organiques.

L'analyse chimique par l'ICP-AES est faite sur l'échantillon de sol broyé en poudre ($< 80\mu m$) qui est ensuite fondu en combinaison avec du métaborate de lithium ($LiBO_2$) qui joue le rôle de fondant pour former une « perle ». Cette perle est ensuite dissoute dans une solution d'acide nitrique pour ensuite pouvoir être analysé à l'ICP-AES.

Par convention, et pour que la somme des concentrations des différents éléments présents dans l'échantillon soit proche de 100%, ces concentrations sont exprimées sous la forme d'oxydes.

2.2.2. Diffraction des Rayons X (DRX)

La Diffraction des Rayons X est une méthode utilisée pour identifier la nature et les caractéristiques cristallographiques des matériaux cristallisés. Elle consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X et à enregistrer l'intensité de rayons X qui est diffractée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, et l'intensité présente donc des maxima dans certaines directions ; on parle de phénomène de «diffraction». On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ (deux thêta) du faisceau.

Les analyses par Diffraction de Rayons X ont été effectuées à l'aide d'un diffractomètre de type BRUCKER D8 ADVANCE équipé d'un monochromateur arrière SOLLER et d'une anticathode au cobalt ($\text{CoK}\alpha$). La tension d'accélération utilisée est de 40kV avec une intensité du courant de 30 mA. Les analyses ont été réalisées sur une plage allant de 4 à 70° (2θ) sur les sols et les tiges de paille de riz préalablement broyées au mortier d'agate jusqu'à obtenir une poudre passant au tamis de 80 μm . Les deux terres ne contenant pas d'autres argiles que la kaolinite (argiles dont le plan (100) diffracte autour de 14 Å comme les smectites ou les chlorites), il n'a pas été nécessaire d'utiliser la technique des lames orientées sur ces matériaux.

2.2.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est fondamentale pour analyser la perte de masse par décomposition de l'échantillon en fonction de la température. L'essai consiste à enregistrer la variation de la masse d'un échantillon suivant une montée en température programmée. La vitesse de cette montée est généralement fixée à 10°C.min⁻¹. L'échantillon est placé dans un creuset en alumine taré.



Figure II.8: Appareil de l'Analyse Thermogravimétrique METTLER TOLEDO

Cette technique expérimentale permet d'analyser et de quantifier les phases minéralogiques composées au sein d'un échantillon. En effet, lors du chauffage, on constate différentes pertes de masses de l'échantillon en fonction de la température. Ces pertes sont attribuées à l'évaporation de composés volatils et à la rupture de liaisons chimiques. La température d'évaporation sera fonction de la force de liaison.

La terre de barre du Bénin, la terre Bouisset et les tiges de paille de riz ont été soumises à l'Analyse Thermogravimétrique (ATG). Elle a été réalisée à l'aide d'un équipement composé d'un four (METLER TOLEDO) couplé à un système d'acquisition (HP 34970A associé au logiciel STARe v.15).

2.3. Caractérisation physique et morphologique de la paille de riz

2.3.1. Masse volumique apparente et la conductivité thermique

La masse volumique apparente des tiges de paille de riz a été déterminée suivant la recommandation Rilem TC 236 (AMZIANE et al, 2017). Cette caractéristique s'avère importante dans la formulation des écomatériaux. En effet, l'introduction de fibres végétales dans une matrice argileuse ou cimentaire améliore l'isolation thermique du matériau composite et rend ce dernier moins dense. L'isolation thermique dépendant de la densité des fibres, cette caractéristique est suivie lors de la détermination de la conductivité thermique des tiges de paille de riz.

La conductivité thermique des fibres a été déterminée avant leur incorporation dans la matrice argileuse. La conductivité thermique caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Un matériau est dit isolant lorsque sa conductivité est faible. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la conductivité thermique selon qu'on soit en régime permanent (plaque chaude gardée) ou en régime variable (fil chaud, plan chaud, ruban chaud, méthode flash, ...).

La méthode utilisée dans cette étude est la méthode de la plaque chaude gardée. C'est une méthode utilisée pour les matériaux de faible conductivité thermique. L'appareil utilisé est le λ -Meter EP-500 à plaque stationnaire et mesure directe de la conductivité thermique sans échantillon d'étalonnage (figure II.9).



Figure II.9: Appareil de mesure de la conductivité thermique λ -Meter EP-500

La conductivité thermique du matériau est calculée suivant la formule suivante :

$$\lambda = \frac{Q \cdot e}{\Delta T \cdot A}$$

Avec λ : la conductivité thermique en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, Q : la puissance électrique en W, e : l'épaisseur de l'échantillon, A : la section de l'échantillon en m^2 et ΔT : la différence de température entre les deux surfaces de l'échantillon en K.

2.3.2. Mesure d'absorption d'eau

L'absorption des fibres a été évaluée en suivant les recommandations Rilem TC 236 BBM (AMZIANE et al., 2017) pour les agrégats végétaux. Cette caractéristique correspond à la quantité d'eau absorbée par les tiges de paille de riz en fonction du temps. Elle est capitale car elle va influencer énormément la consistance des matériaux en terre crue incorporant ces fibres. De plus, l'absorption d'eau par les fibres peut conduire à des variations volumiques des fibres végétales dans le mélange et provoquer ainsi donc des modifications au niveau de l'interface fibres/matrice argileuse.

Les tiges de paille de riz sont placées dans un sac synthétique perméable puis elles sont immergées dans de l'eau. A différentes échéances (1 min, 15 min, 240 min (4h) et 2880 min (48h)), les fibres sont récupérées et elles sont essorées à l'aide d'uneessoreuse à salade à raison de 100 tours du filateur à environs 2 rotations par seconde. Ces procédures ont été faites sur 3 échantillons pour déterminer le coefficient d'absorption en pourcentage (%) qui s'exprime par :

$$w(t) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad \text{avec } m_h \text{ la masse humide après essorage en kg et } m_s \text{ la masse sèche en kg.}$$

2.3.3. Vidéomicroscopie

La morphologie des fibres a été étudiée avec le vidéomicroscope Keyence VH 5911. Les observations ont été faites à différents grossissements à savoir : x19.9, x153 et x382. Cette technique présente le gros avantage qu'il n'y a pas de préparation spécifique préalable à réaliser sur les échantillons.

2.3.4. Microscope Electronique à Balayage (MEB)

L'intérêt d'utiliser le Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour l'étude de la microstructure réside dans l'observation d'échantillons avec de forts grossissements. L'appareillage utilisé pour les observations MEB est un microscope Jeol JSM-6380LV. Pour l'observation des fibres, elles ont simplement été collées sur un support métallique puis recouverte d'une couche fine d'or évaporé avant l'observation avec une tension d'accélération de 15 kV en mode vide poussé.

2.4. Caractérisation physique et mécanique des éprouvettes de bois

Les essais sur les deux essences de bois (pin et rônier) ont été réalisés à l'Institut Clément Ader de Tarbes par le Professeur Florent Eyma.

2.4.1. Masse volumique et humidité

Les mesures de masse volumique et d'humidité ont été effectuées suivant la norme NF B 51-005 (1985). Dans cette norme, il faut tester des éprouvettes de dimensions 20 mm x 20 mm x 20 mm. Il a été possible de scier des échantillons de ces dimensions pour le rônier mais pour le pin, les sections étant de 14 mm x 14 mm environ, des échantillons parallélépipédiques ont été préparés (dimensions d'environ 14 mm x 14 mm x 30 mm). Ces échantillons sont présentés sur la figure II.10.



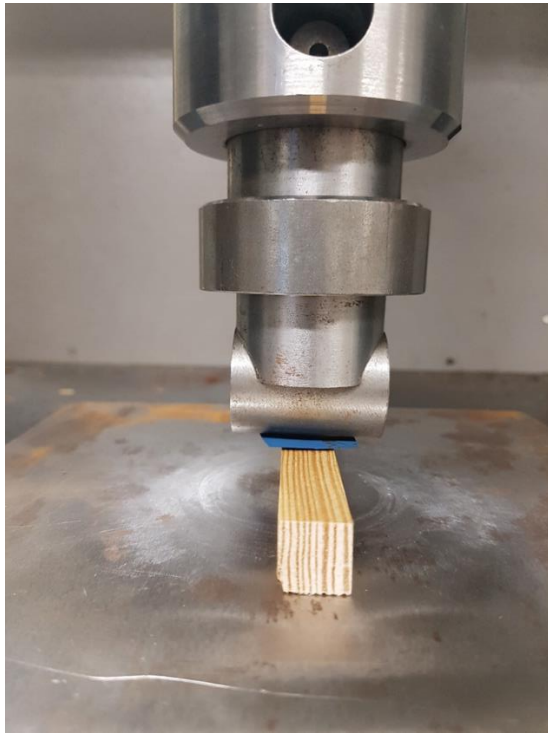
Figure II.10: Échantillons des deux essences de bois pour les mesures de masse volumique et de teneurs en eau (le rônier est le bois de couleur sombre)

Le protocole suivi a consisté en des séries de pesées et de mensurations des dimensions des éprouvettes dans les trois directions après mise en équilibre des échantillons dans une enceinte climatique à 20°C et 65% HR. Les pesées de masse ont été réalisées sur une balance de marque Ohaus© avec une précision de 0,001 g et les mesures de dimensions ont été effectuées avec un micromètre mécanique d'une précision de 0,01 mm (en arrière-plan sur la photo de droite de la figure II.10). Pour les mesures de la teneur en eau, les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 103°C.

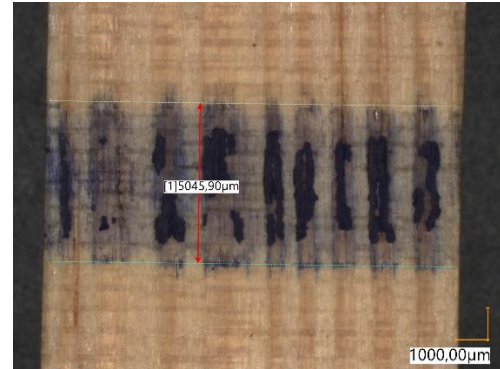
2.4.2. Dureté

Les essais de dureté Monnin ont été réalisés en suivant la norme NF B 51-013 (1985). Ils ont été réalisés sur des échantillons de 14 x 14 mm² pour le pin et le rônier et des essais supplémentaires ont été réalisés sur des échantillons 20 x 20 mm² pour le rônier conformément aux dimensions d'éprouvettes recommandées par la norme. Les essais ont été réalisés sur une machine d'essais MTS© 20M équipée d'un dispositif d'essai de dureté qui comprend un plateau monté sur une rotule avec un cylindre d'empreinte de 30 mm de diamètre (figure II.11.a). La charge a été appliquée progressivement à une vitesse de 0,8 mm/min jusqu'à obtenir la charge maximale de 1960 N pour les éprouvettes 20 x 20 mm² et de 1372 N pour les éprouvettes de 14 x 14 mm² afin de conserver constante la charge appliquée par cm de largeur (égale à 980 N/cm). Pour les échantillons de pin, l'axe du cylindre a été placé perpendiculairement aux cernes. La largeur de l'empreinte a été mesurée au microscope optique numérique Keyence (objectif x20) en utilisant du papier carbone sur les éprouvettes pour bien voir les empreintes (figure II.11.b). La valeur de la largeur d'empreinte est la moyenne de deux mesures effectuées sur le même échantillon.

Le calcul de la valeur de la dureté Monnin (N) a été effectué en utilisant l'équation : $N=1/t$ avec : $t = 15 - 0,5\sqrt{900 - a^2}$ où t est la flèche de pénétration en mm et a est la largeur d'empreinte en mm.



a) Réalisation de l'empreinte



b) Mesure de l'empreinte

Figure II.11: Dispositif d'essai de dureté Monnin

2.4.3. Résistance en compression

La résistance en compression des éprouvettes de bois est mesurée conformément à la norme NF B 51-007 (1985). De manière conventionnelle, la dimension normalisée des éprouvettes est de $60 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$. Les échantillons de pin ayant une section de $14 \times 14 \text{ mm}^2$, nous avons, comme pour l'essai de dureté travailler sur des échantillons de deux géométries différentes :

- $60 \times 14 \times 14 \text{ mm}^3$ pour le pin et le rônier,
- $60 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ pour le rônier.

Les essais ont été réalisés sur une machine d'essais MTS© 20M à une vitesse de chargement de 2 mm/min. Un film téflon a été intercalé aux deux extrémités des éprouvettes afin d'éviter les efforts de frottement parasites (figure II.12). Les essais ont été réalisés sur au moins 5 échantillons différents.

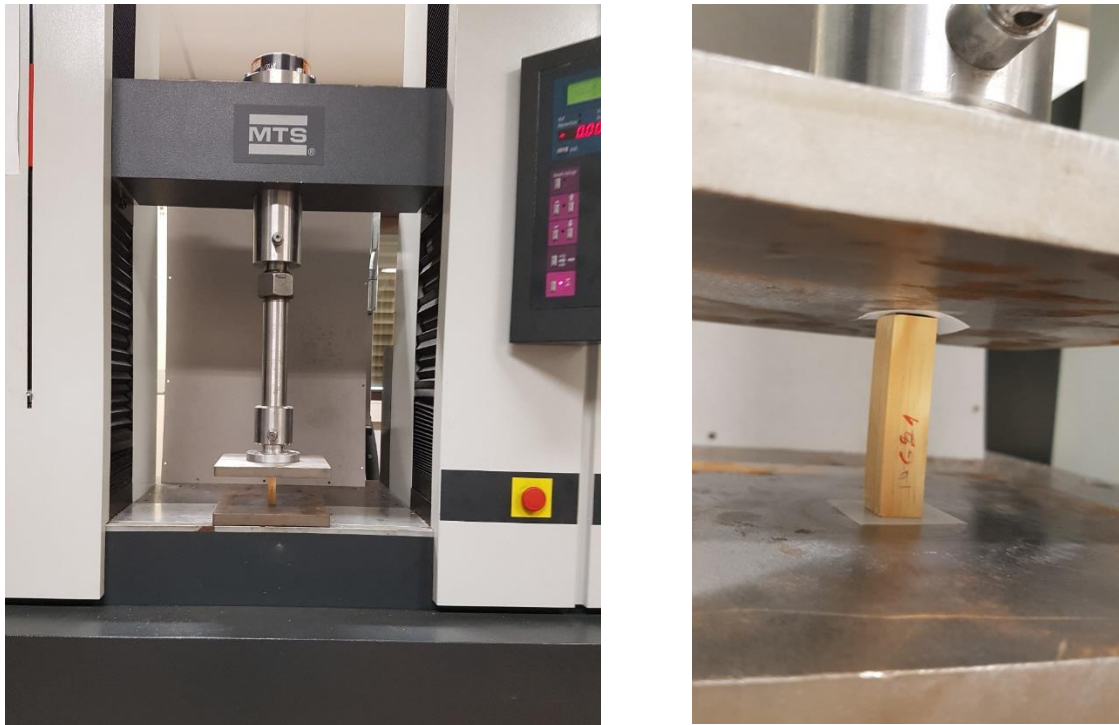


Figure II.12: Essai de compression sur les échantillons de bois

2.4.4. Résistance en flexion

Le module d'élasticité en flexion statique E_F et la contrainte de rupture en flexion statique σ_F des échantillons de bois ont été mesurés selon la norme NF B 51-008 (1987). Comme pour les essais de compression, deux géométries d'éprouvettes ont été utilisées :

- 320 x 14 x 14 mm³ pour le pin et le hêtre,
- 320 x 20 x 20 mm³ pour le chêne.

Les essais ont été réalisés en utilisant une machine d'essais MTS© 20M équipée d'un banc de flexion quatre points. La mesure de la flèche a été réalisée avec un capteur de déplacement LVDT Solartron AX5S avec une précision égale à 0,3% de l'étendue de la mesure (figure II.13). Les essais sont réalisés pour obtenir une rupture entre 1.5 et 2 minutes soit à une vitesse de 10 mm/min.



Figure II.13: Essai de flexion 4 points sur éprouvettes de pin

3. CARACTERISTIQUES DES TERRES

3.1. Caractéristiques géotechniques des terres

3.1.1. La terre de l'UAC

La distribution de la taille des grains des terres de la commune d'Abomey Calavi prélevés sur 6 sites différents a été déterminée par analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie. La figure II.14 présente les courbes granulométriques des six terres ainsi que le fuseau de la norme XP P13-901 qui fournit des valeurs indicatives sur la granularité des terres utilisées pour la confection de blocs de terre compressée (XP P13-901, 2001).

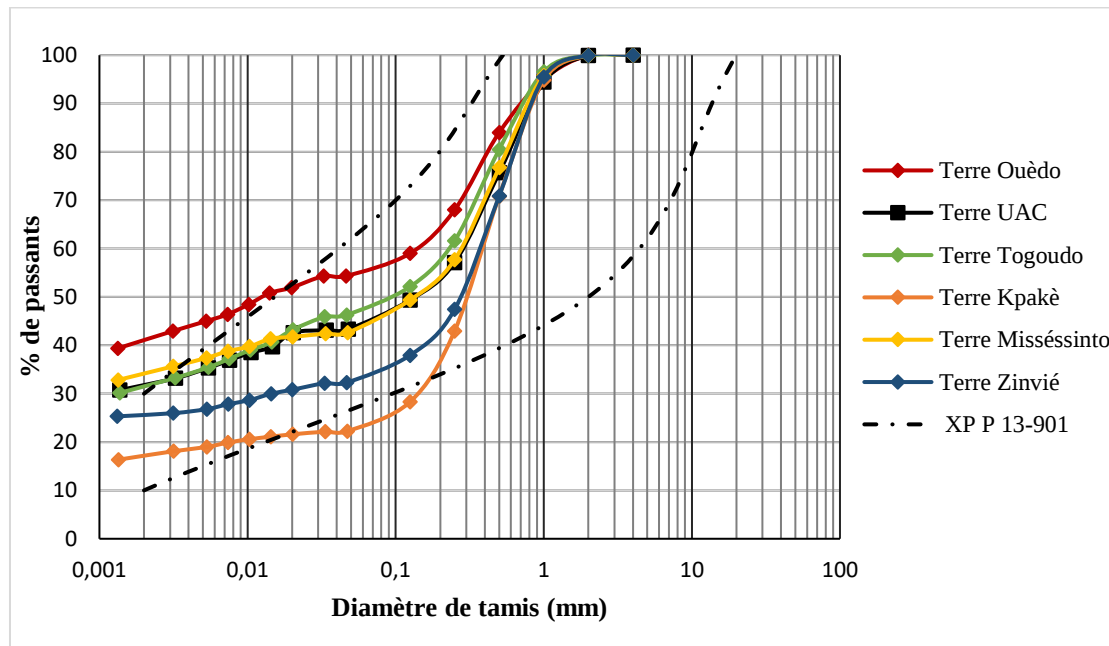


Figure II.14: Courbes granulométriques des six terres de la commune d'Abomey Calavi

La figure II.14 montre que la forme des courbes granulométriques des six prélèvements est identique. Si l'on compare avec le fuseau de la norme XP P13-901, les courbes s'inscrivent toutes quasiment dans leur entièreté dans ce fuseau, à l'exception de la terre de Ouèdo qui a un pourcentage de fines supérieur à 35% et de la terre de Kpakè qui semble contenir trop de sable. Même si elles ont la même allure, il existe des différences importantes entre ces prélèvements notamment sur la teneur en particules fines. Afin d'apprécier ces différences, le tableau II.4 présente les proportions des différentes classes granulaires constitutives de ces terres : argile ($< 2\mu\text{m}$), silt ($2-63\mu\text{m}$), sable ($63-2000\mu\text{m}$) et gravier ($> 2\text{mm}$).

Tableau II.4: Classes granulaires des six terres de la commune d'Abomey Calavi

Prélèvements	Argile <2 μm (%)	Silt 2-63 μm (%)	Sable 63-2000 μm (%)	Gravier >2 mm (%)
UAC	32,10	12,90	54,96	0,04
Ouèdo	41,90	13,10	45,00	0,00
Togoudo	32,00	15,00	52,90	0,10
Kpakè	17,50	7,00	74,96	0,04
Missésinto	34,00	10,40	55,56	0,04
Zinvié	26,00	9,20	64,76	0,04
Moyenne	30,58	11,27	58,02	0,04

Les résultats du tableau II.4 mettent en avant les similitudes et les différences des six terres. Tout d'abord, ces terres ne contiennent quasiment pas de particules > 2 mm. De plus, comme évoqué précédemment, la principale différence vient des teneurs en argile qui varient de 17,5% (Kpakè) à 41,9% (Ouèdo) avec une moyenne sur les six terres se situant autour de 30%. En comparaison, les silts ne varient que de 7,0% à 15,0% et les sables de 52,9% à 75,0%. La terre de Kpakè est beaucoup plus sableuse que les autres : c'est la terre qui contient le moins d'argile et le plus de sable. En se référant à la classification USCS des sols grenus (ASTM D2487, 1998), les terres de la commune d'Abomey Calavi peuvent être considérées comme des sables argileux. Du point de vue granulométrique, les terres qui se rapprochent le plus des valeurs moyennes sont les terres d'UAC, de Togoudo et de Missésinto.

Les limites d'Atterberg des six prélèvements sont présentées dans le tableau II.5 et les valeurs des indices de plasticité et de limite de liquidité ont été reportées sur la figure II.15 afin de les comparer au fuseau indicatif de la norme XP P13-901 (XP P13-901, 2001).

Tableau II.5: Limites d'Atterberg des six terres de la commune d'Abomey-Calavi

Limites d'Atterberg	UAC	Ouèdo	Togoudo	Kpakè	Mssésinto	Zinvié
WL (%)	41	48	57	35	48	51
WP (%)	23	25	32	24	26	27
I _p (%)	18	23	25	11	22	24

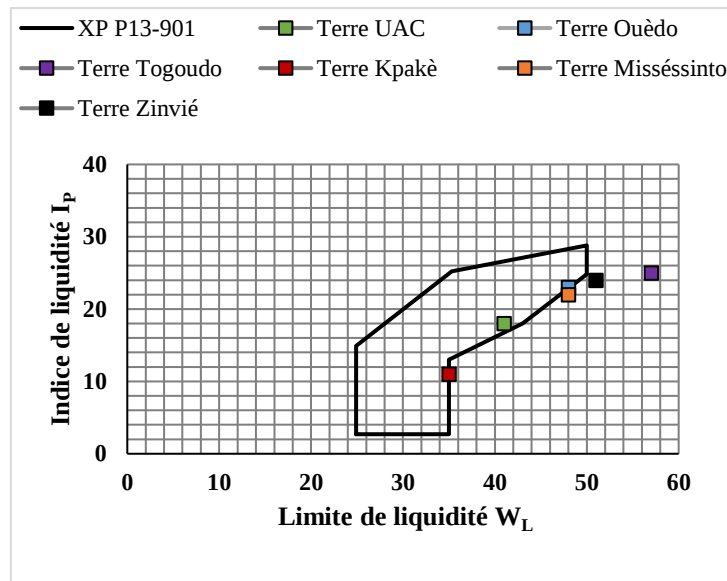


Figure II.15: Limites d'Atterberg des six terres de la commune d'Abomey Calavi

Contrairement aux résultats de la granulométrie, les prélèvements effectués dans la commune d'Abomey Calavi n'entrent pas correctement dans le fuseau de la norme. Les terres analysées ont globalement une limite de liquidité trop élevée. Seule la terre UAC entre dans le fuseau de la norme même si elle est proche des limites. Les terres Ouèdo, Misséssinto et Kpakè chevauchent le fuseau tandis que les terres Zinvié et Togoudo se retrouvent hors du fuseau de plasticité. Il convient ici de nuancer ces comparaisons faites avec les fuseaux de la norme données à titre indicatif et qui sont souvent critiqués dans la littérature. En effet, il arrive souvent que des matériaux aient des performances acceptables pour des BTC avec des courbes granulométriques et les limites d'Atterberg en dehors des limites recommandées par la norme XP P13-901 (AUBERT et al., 2015 ; LABOREL-PRENERON, 2017 ; OUEDRAOGO, 2019). Selon la classification des sols de Burmister dans (VERDEYEN et al., 1968), la terre UAC ($I_p = 18$) et Kpakè ($I_p = 11$) sont considérées comme moyennement plastiques car leur indice de plasticité est compris entre 10 et 20 tandis que les terres Ouèdo, Togoudo, Misséssinto et Zinvié sont des terres plastiques (indice de plasticité compris entre 20 et 40).

Toutes les terres, à l'exception de la terre Kpakè, ont un indice de plasticité supérieure à 12,5. La proportion élevée de sable (74,96%) et la faible teneur en argiles (17,50%) sont directement liées à cette faible valeur de l'indice de plasticité de la terre de Kpakè. Le deuxième critère de choix du type de sol pouvant servir pour le banco est l'indice de plasticité qui doit être compris entre 12,5 et 29 (CNERTP, 1993). Par conséquent, en dehors de la terre Kpakè, les échantillons respectent tout ce deuxième critère.

Cette étude préliminaire permet de conclure qu'il existe dans la commune d'Abomey Calavi de la terre sablo-argileuse pouvant servir à la construction en terre crue. Pour la suite des travaux, nous avons décidé de retenir la terre UAC. En effet, cette terre s'inscrit dans la moyenne des caractéristiques granulaires mesurées et elle entre dans le fuseau du diagramme de plasticité. De plus, cette terre a été également choisie à cause de sa disponibilité dans l'enceinte de l'Université d'Abomey Calavi au Bénin.

3.1.2 La terre de Bouisset

Comme souligné plus haut, l'envoi de la terre UAC en grande quantité du Bénin pour la France n'était pas possible. Elle a du coup été substituée par la terre Bouisset pour les travaux sur les poutres qui nécessitait de grande quantité de matériaux. La distribution en taille des grains de la terre Bouisset a également été déterminée. La figure II.16 présente la courbe granulométrique de la terre de Bouisset qui servira à la confection des poutres dans la suite des travaux.

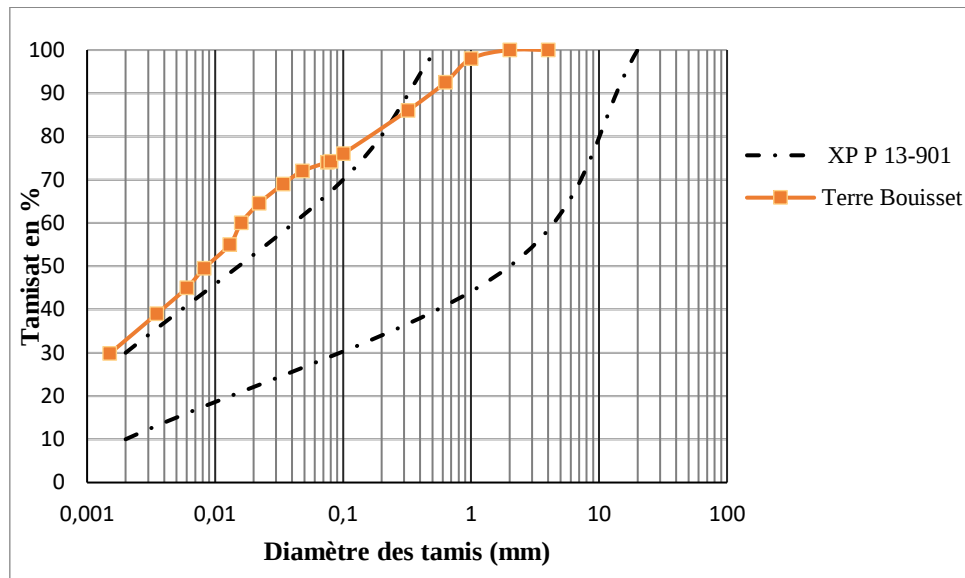


Figure II.16: Courbe granulométrique de la terre Bouisset

La terre de Bouisset n'entre que très peu dans le fuseau des terres recommandées par la norme XP P13-901 pour la fabrication des BTC. Seule 16 % de la partie sableuse se retrouve dans le fuseau du diagramme des textures de la norme. Ceci peut s'expliquer facilement par la provenance et l'utilisation de cette terre. En effet, cette terre provient d'une briqueterie de terre cuite (qui produit aussi des briques de terre crue) par extrusion et non par compactage. Il est assez classique que les mélanges utilisés pour l'extrusion sont plus fins que ceux pour la production des BTC (AUBERT, 2013). Les différentes classes granulaires de la terre de Bouisset ont les proportions suivantes : argile (32,10%), silt (41,50%) et sable (26,40%). La terre de Bouisset est donc beaucoup plus fine que celle d'UAC dont la teneur en sable était de 54,96%.

L'indice de plasticité de la terre Bouisset a également été déterminé et la figure II.17 présente les résultats dans le fuseau de la norme NF XP P301.

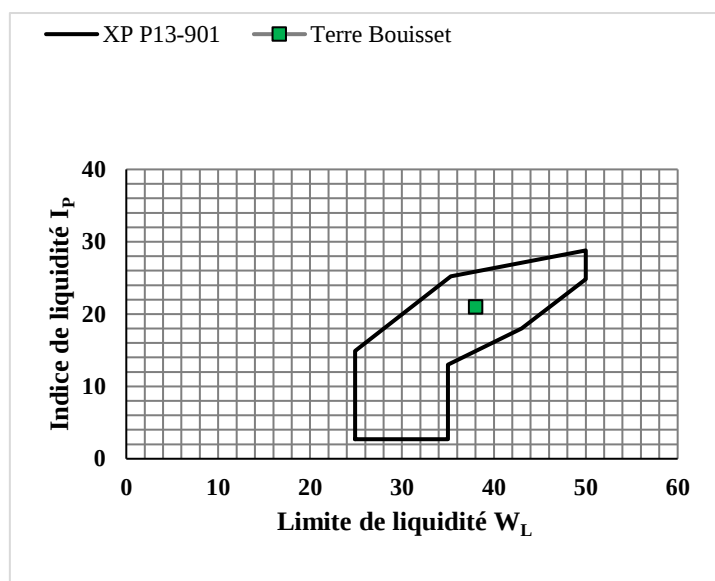


Figure II.17: Limites d'Atterberg de la terre Bouisset

La terre de Bouisset s'inscrit bien dans le fuseau du diagramme de plasticité recommandée par la norme XP P13-901 pour la fabrication des BTC. Avec son indice de plasticité égale à 21, la terre Bouisset est considérée comme une terre plastique selon le tableau de classification des sols de Burmister (VERDEYEN et al., 1968).

Pour mieux cerner la nature de la terre Bouisset, sa valeur au bleu de méthylène et son indice d'activité au bleu ont été mesurées. Les valeurs obtenues sont de 2,7 et de 8,3 respectivement ; en conséquence, ce sol est classé ce sol comme un sol limoneux de plasticité moyenne avec des argiles moyennement actives. Ceci confirme la possibilité d'utiliser cette terre dans la fabrication des matériaux en terre crue qui se comportera correctement sans subir de variation dimensionnelle trop importante au séchage.

3.2. Caractéristiques chimique et minéralogique des terres

3.2.1 Composition chimique des terres

Le tableau II.6 montre les différents éléments chimiques des terres avec leurs quantités.

Tableau II.6: Composition chimique des terres UAC et Bouisset

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
UAC	66,16	17,95	5,30	0,04	0,10	0,09	0,01	0,06	1,07	0,07	8,38
Bouisset	61,71	17,24	5,59	0,07	1,34	1,87	0,16	3,84	0,73	0,12	7,52

L'analyse chimique des terres révèle la présence significative de la silice et de l'alumine comme dans toute terre argileuse. La présence du fer dans les deux terres explique leur couleur rouge. La composition chimique de la terre UAC est remarquable car elle ne contient que trois oxydes en quantité significative : SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ les concentrations dans les autres oxydes étant proches de 0. Pour la terre de Bouisset, en dehors de ces trois oxydes majeurs, trois autres oxydes sont en quantité non négligeable : K₂O surtout (3,8%) et dans de moindres proportions MgO et CaO. Malgré ces légères différences, on peut conclure que les compositions chimiques des deux terres sont très proches quand on considère les concentrations en majeur ce qui valide

notre choix de remplacer la terre UAC par la terre de Bouisset pour la seconde partie de l'étude sur les poutres en béton de terre armé.

1.2.2 Diffraction des Rayons X

La figure II.18 présente les diagrammes de rayons X des deux terres UAC et Bouisset.

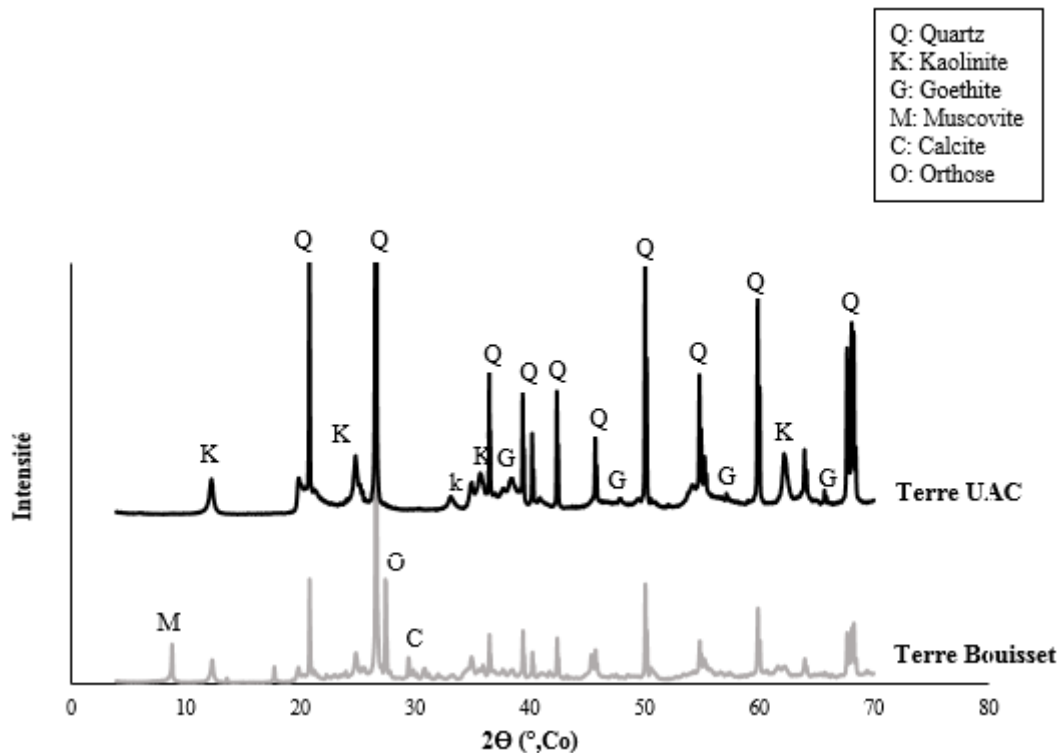


Figure II.18: Diagramme des rayons X des terres UAC et Bouisset

Les diagrammes des deux terres montrent la présence du quartz (SiO_2), de kaolinite ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de goethite (FeOOH) dans les deux terres. Comme la composition chimique l'avait montré précédemment, la terre UAC ne contient que ces 3 minéraux. A l'opposé, il est possible pour la terre de Bouisset d'identifier des pics de muscovite (ou d'illite), de calcite (CaCO_3) et d'orthose (KSi_3AlO_8). Il n'est pas possible par DRX de distinguer les pics de muscovite (mica) des pics d'illite (argile) et il est probable que les deux espèces coexistent. La seule chose que l'on puisse attester avec certitude est la présence de la muscovite dans la terre Bouisset que l'on observe visuellement (et encore mieux à la binoculaire) par la présence des paillettes brillantes.

3.2.3 Analyse Thermogravimétrique (ATG)

Pour compléter les analyses qualitatives par DRX, des analyses thermogravimétriques ont été réalisées sur les deux terres. La figure II.19 présente les courbes thermogravimétriques (TG) et leur différentielle (DTG) de 40°C à 1000°C des deux terres.

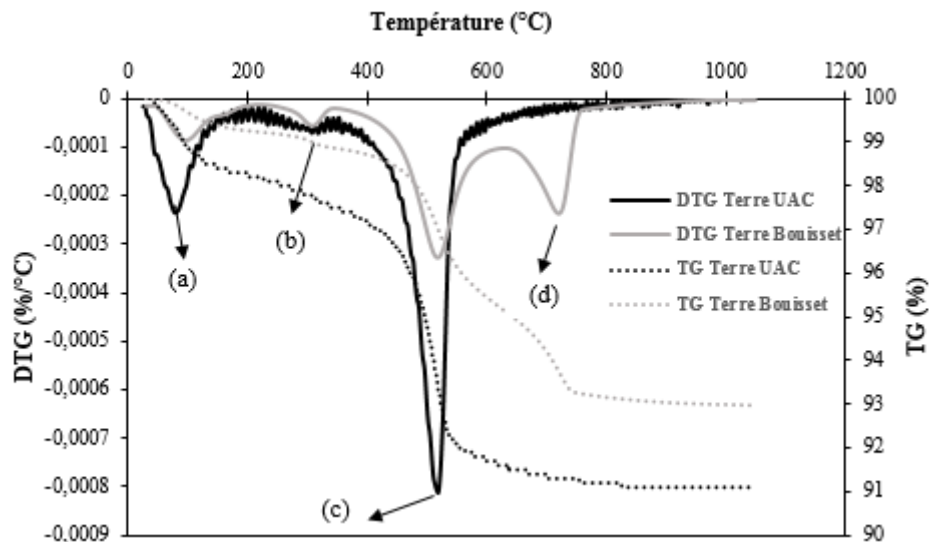


Figure II.19: Analyse thermogravimétrique des terres UAC et Bouisset

L'analyse thermogravimétrique des terres permet de confirmer la présence des principaux minéraux des deux terres :

- le pic (a) autour de 100°C correspond au départ de l'eau hygroscopique ;
- le pic (b) autour de 300°C correspond à la décomposition de la goethite en hématite selon la formule : $2 \text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$. La perte de masse autour de 300°C correspond au départ d'eau et connaissant ce départ d'eau, il est possible de calculer la proportion de goethite correspondante ;
- le pic (c) autour de 500°C correspond à la déshydroxylation des argiles. La DRX a révélé que les deux terres contenaient de la kaolinite. Pour la terre de Bouisset, il est possible qu'elle contienne aussi de l'illite qui pourrait se décomposer à cette température. Autour de 500°C, la kaolinite se décompose en métakaolinite selon la réaction : $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$. Ainsi, connaissant la perte de masse à 500°C, il est possible d'estimer la quantité de kaolinite contenue dans les deux sols, en faisant l'hypothèse pour Bouisset qu'il n'y a pas d'illite et seulement de la muscovite.
- le pic (d) entre 650 et 750°C pour la terre Bouisset présente la décarbonatation de la calcite.

Il est possible d'utiliser les résultats de l'ATG pour quantifier certaines phases présentes dans les deux terres. Le tableau II.7 donne les pertes de masse mesurées par ATG pour les transformations citées précédemment et la proportion des phases calculées pour les deux terres.

Tableau II.7: Proportions calculées de certains minéraux présents dans les deux terres

T (°C)	Minéral	UAC	Bouisset
250-350	Goethite	6%	3%
350-600	Kaolinite	42%	24%
650-750	Calcite	0%	8%

Pour la terre d'UAC, il est possible de connaître la composition minéralogique de cette terre puisqu'elle ne contient que 3 minéraux : goethite (6%), kaolinite (42%) et quartz (52%). Il serait possible pour cette terre de calculer la composition minéralogique d'une autre manière en

utilisant les résultats de la composition chimique et en faisant les hypothèses suivantes : tout le fer est contenu dans la goethite, tout l'aluminium est contenu dans la kaolinite et une fois retiré le silicium de kaolinite, tout le silicium restant est contenu dans le quartz. Ce calcul donne les résultats suivants : goethite (6%), kaolinite (45%) et quartz (45%). Les compositions minéralogiques obtenues avec les deux méthodes donnent des résultats très proches.

Pour la terre de Bouisset, le calcul serait beaucoup complexe à réaliser et nécessiterait des hypothèses importantes. Il est difficile donc de connaître la composition minéralogique de cette terre mais on constate, en première approximation (et en faisant l'hypothèse qu'il n'y a que de la muscovite et pas d'illite dans cette terre), que la teneur en argile minéralogique est plus faible que pour la terre UAC alors que les deux terres contenaient exactement la même teneur en argile granulométrique (32%). Cette différence entre argile minéralogique et granulométrique est parfaitement connue même si depuis de nombreuses années beaucoup d'auteurs confondent ces deux notions (LAGOUIN, 2020).

On peut au final conclure sur la caractérisation des deux terres (UAC et Bouisset) que ces terres sont globalement très proches dans leurs compositions chimiques et minéralogiques ainsi que dans leurs caractéristiques géotechniques. Il semble donc que la solution retenue de remplacer la terre d'UAC pour la dernière partie de l'étude à cause des problèmes d'approvisionnement soit pertinente.

4. CARACTERISTIQUES DES TIGES DE PAILLE DE RIZ

4.1. Masse volumique apparente et conductivité thermique des fibres

Le tableau II.8 présente les mesures de la masse volumique apparente et de la conductivité thermique des tiges de paille de riz utilisées durant cette thèse. Les valeurs obtenues sont comparées à celles de 3 autres travaux de recherche dans lesquels la paille de riz a été broyée entière (tiges et feuilles) ce qui est légèrement différent de la tige seule que nous avons étudiée.

Tableau II.8: Masse volumique apparente et conductivité thermique des fibres

Référence	Type de matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.k)
Cette étude	Tiges de paille de riz	52 ± 1	0,057 ± 0,001
(NOBLE, 2018)	Paille de riz	40	0,043
(ABAKAR, 2018)		30	
(FBT ISOLATION, 2019)		50	0,039

La valeur obtenue pour la masse volumique densité apparente dans notre étude est incluse dans celles que propose la littérature malgré qu'il s'agisse dans notre cas des tiges de paille de riz. Par ailleurs, la valeur de conductivité thermique obtenue dans notre étude est légèrement supérieure à celles proposées par la littérature. Cette différence pourrait découler de la nature des tiges de paille de riz qui à priori sont plus denses que la paille de riz.

4.2. Absorption d'eau des fibres

La figure II.20 présente la courbe d'absorption des tiges de paille de riz.

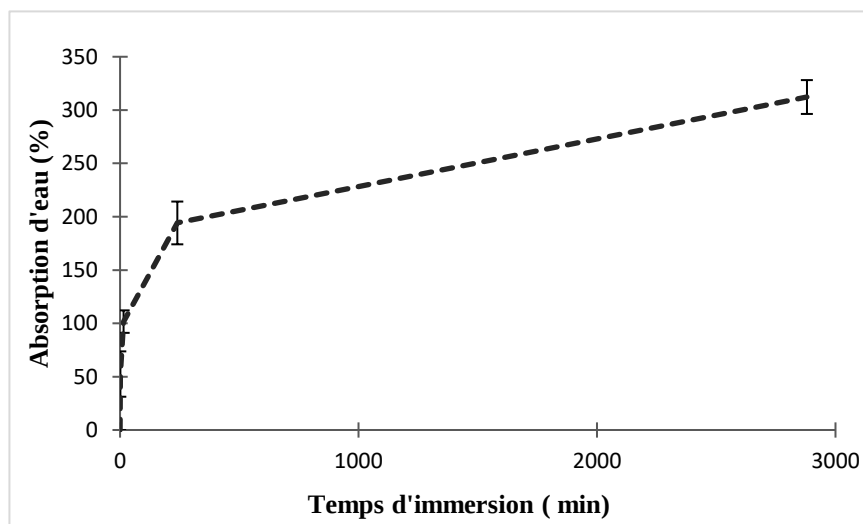


Figure II.20: Cinétique d'absorption d'eau des tiges de paille de riz

On retrouve une cinétique d'absorption classique des tiges de paille de riz avec une vitesse d'absorption rapide dans les premières heures. Dans les quatre premières heures, on enregistre déjà plus de la moitié de l'absorption d'eau obtenue en 48h. Cette absorption rapide peut s'expliquer par la structure anatomique des tiges de paille de riz. Déjà dans cette étude, il ne s'agit pas de la paille de riz toute entière mais uniquement des tiges de la paille de riz. Comme

souligné précédemment, les tiges ont été débarrassées de toute feuille. Ces tiges ont une structure tubulaire avec du parenchyme laissant voir des pores même à l'œil nu. Cette forme anatomique favoriserait une absorption importante d'eau. L'observation microscopique des tiges de paille de riz nous renseignera plus sur l'influence de leur structure anatomique sur l'absorption d'eau. Le coefficient d'absorption de nos tiges de paille de riz est de $312 \pm 12\%$. Cette valeur avoisine celle trouvée par (TUAN, 2018) qui avait mesuré une absorption d'eau d'environ 325% pour les pailles de blé et de lin qu'il étudiait. Les pailles semblent avoir une absorption d'eau plus élevée que la plupart des autres fibres végétales comme le lin, le chanvre, etc... (TUAN, 2018 ; LABOREL-PRENERON et al., 2018).

4.3. Analyse morphologique des fibres

L'analyse morphologique des tiges de paille de riz a été réalisée à deux échelles en utilisant deux microscopes différents. L'échelle la plus grossière est celle du vidéomicroscope où les échantillons de paille ont été observés sans préparation à des grossissements respectifs de x19,9, x153 et x382. Les images obtenues sont présentées sur la figure I.21.

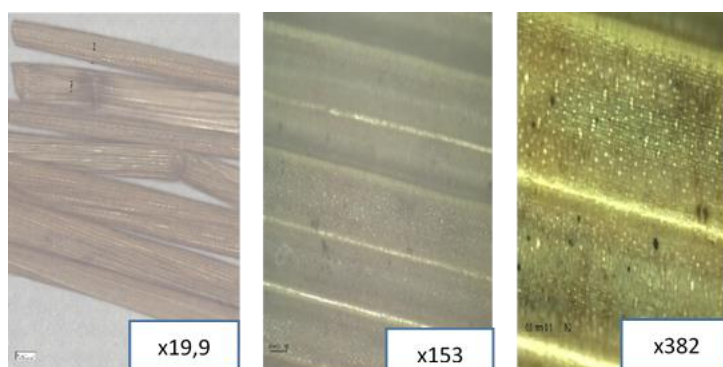


Figure II.21: Images prises au vidéomicroscope des tiges de paille de riz

La figure II.21 montre l'existence de faisceaux regroupant plusieurs dizaines de fibres élémentaires. Des micropores sont également visibles à la surface des tiges de paille de riz. Pour compléter ces observations à plus forts grossissements, nous avons eu recours au Microscope Electronique à Balayage.

Les observations ont été faites sur les tiges à des grossissements différents selon 3 orientations différentes : sur la surface extérieure des tiges, sur leur surface interne ainsi que sur leur section transversale. Les images obtenues sont présentées sur la figure II.22.

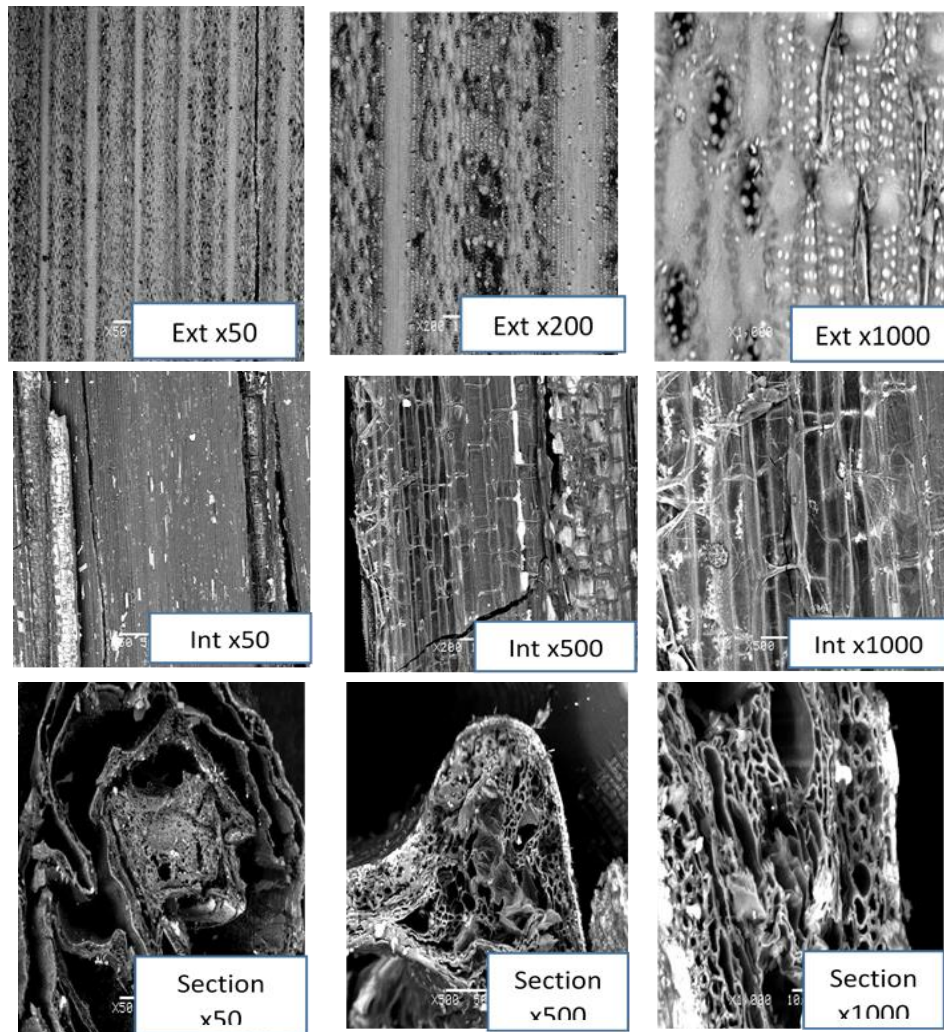


Figure II.22: Images prises au MEB des tiges de paille de riz (surfaces extérieure et intérieure, et section des tiges)

Sur la face extérieure des tiges de paille de riz, on remarque les faisceaux préalablement observés sur les clichés de la vidéomicroscopie. Les grossissements de 200 et 1000 montrent en surface, une couche irrégulière qui lie les fibres les unes aux autres (MAGNIONT, 2010). Les grossissements de 200 et 1000 confirment la présence de micropores sur la surface extérieure des tiges comme observé précédemment au videomicroscope. Cette microporosité de surface pourrait être favorable pour l'utilisation de ces tiges comme renforts de matériau en terre crue car elle augmentera l'adhérence entre la fibre et la matrice. Des observations similaires avaient été faites sur des fibres de kénaf (MILLOGO et al., 2015) et de fonio (OUEDRAOGO et al., 2019). Ces mêmes irrégularités de couches sont observées sur les photos de la face interne des tiges de paille de riz. Sur ces clichés, on remarque aisément les fibres élémentaires au sein des faisceaux. La face interne des tiges montre également les parenchymes qu'elles renferment.

Sur les observations faites sur la section des tiges de pailles de riz, nous remarquons plusieurs microfibrilles de section polygonale imparfaite avec un pore central. Ce pore central que contient chaque microfibrille explique cette grande absorption d'eau des tiges de paille de riz observée précédemment. Les pores des microfibrilles sont de diamètres variables. On remarque également

sur la section transversale des tiges de paille de riz une continuité d'enroulement des faisceaux des fibres.

4.4. Analyse chimique et minéralogique des tiges de paille de riz

La diffraction des rayons X et l'analyse thermogravimétrique ont également été réalisées sur les tiges de paille de riz. Le diagramme de rayons X des tiges de paille de riz est présenté sur la figure II.23.

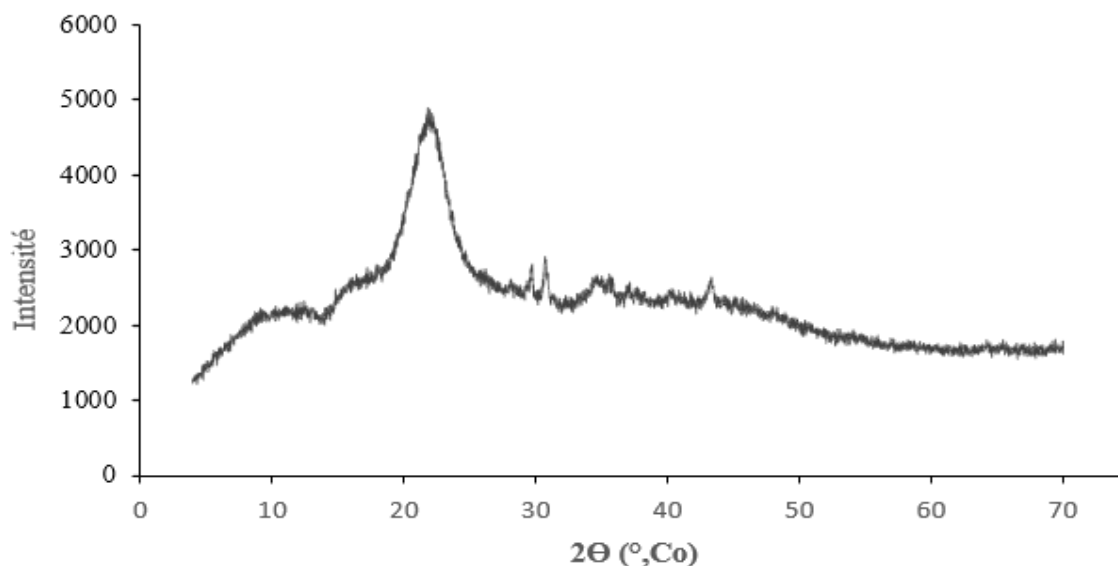


Figure II.23: Diffraction des Rayons X des tiges de paille de riz

Toute biomasse lignocellulosique est composée principalement de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine, de composés extractibles et de minéraux (CAVAGNOL, 2013 ; NGUYEN 2008 ; RADANIELINA, 2018). L'analyse par diffraction de rayons X des tiges de paille de riz révèle un pic majeur situé à $2\theta = 22^\circ$ qui correspond au plan cristallographique (002) de la cellulose II et une large bosse autour de $2\theta = 16^\circ$ représentant les composés amorphes. La large bosse observée autour de $2\theta = 12^\circ$ correspond au plan cristallographique (101) de la cellulose II. La petite bosse située autour de $2\theta = 37^\circ$ correspond au plan cristallographique (040) de la cellulose II (PEREZ, 2002 ; ACHOUR, 2017).

L'analyse par DRX des tiges de la paille de riz ne confirme que la présence de cellulose dans cette paille, l'hémicellulose et la lignine étant amorphes n'étant pas observables avec cette technique.

La figure II.24 présente les courbes thermogravimétriques (TG) et leur différentielle (DTG) de 40°C à 1000°C des tiges de paille de riz.

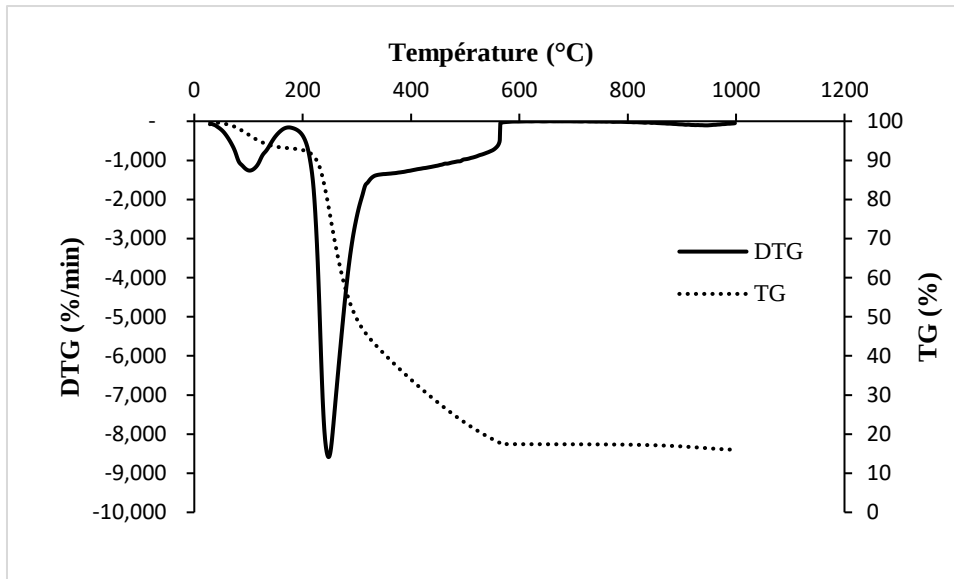


Figure II.24: Analyse thermogravimétrique des tiges de paille de riz

L'analyse thermogravimétrique des fibres montre deux pics :

- Un premier pic se trouvant entre 50° et 150°C avec une perte de masse de 16% qui correspond à l'évaporation de l'humidité ou de l'eau libre dans les fibres (MAGNIONT, 2010, RADANIELINA, 2018),
- Un deuxième pic plus remarquable entre 150° et 560°C avec une perte de masse de 82%. Dans la littérature, cette importante perte de masse observée dans cette plage de température correspond à la décomposition de la cellulose et de l'hémicellulose (MAGNIONT, 2010, RADANIELINA, 2018).

5. CARACTERISTIQUES DES BOIS

5.1. Masse volumique et humidité

Le tableau II.9 présente les mesures des teneurs en eau réalisées sur les échantillons de pin (S1 à S10) et sur les échantillons de rônier (R1 à R10). La masse m_h est la masse de l'échantillon à l'équilibre à 20°C et 65% HR et la masse m_0 est sa masse après séchage dans une étuve à 103°C. La teneur en eau H est calculée comme le rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur sa masse sèche et elle est exprimée en %.

Tableau II.9: Teneur en eau des échantillons de bois à T=20°C et 65% HR

Pin	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
m_h (g)	5,156	4,596	3,812	3,885	3,826	3,242	4,017	3,829	4,112	3,981
m_0 (g)	4,672	4,144	3,455	3,514	3,466	2,932	3,636	3,473	3,731	3,608
H%	10,4	10,9	10,3	10,6	10,4	10,6	10,5	10,3	10,2	10,3
moyenne = 10,4% - écartype = 0,2%										
Rônier	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
m_h (g)	8,627	8,350	8,453	8,348	8,483	8,712	8,332	8,238	8,641	8,258
m_0 (g)	7,748	7,510	7,597	7,507	7,632	7,83	7,488	7,415	7,758	7,43
H%	11,3	11,2	11,3	11,2	11,2	11,3	11,3	11,1	11,4	11,1
moyenne = 11,2% - écartype = 0,1%										

On constate que la dispersion des valeurs de teneur en eau pour une même essence est relativement faible. La teneur en eau du rônier est légèrement supérieure à celle du pin mais les deux valeurs sont dans le même ordre de grandeur.

Le tableau II.10 donne les masses volumiques normalisées (c'est-à-dire pour des échantillons à l'équilibre à 20°C et 65% HR) des deux espèces.

Tableau II.10: Masse volumique des échantillons de bois à T=20°C et 65% HR

Pin	MV S1	MV S2	MV S3	MV S4	MV S5	MV S6	MV S7	MV S8	MV S9	MV S10
M (g)	5,156	4,596	3,812	3,885	3,826	3,242	4,017	3,829	4,112	3,981
L (mm)	42,34	37,39	30,41	29,93	31,46	29,05	31,63	31,51	31,8	30,56
l (mm)	13,98	13,99	13,94	13,94	13,98	14,03	13,94	13,95	13,9	13,9
e (mm)	14,05	14,08	14,03	13,88	13,86	13,89	13,91	13,92	13,86	13,79
Mv (kg/m ³)	620	624	641	671	628	573	655	626	671	680
moyenne = 639 kg/m³ - écartype = 32 kg/m³										
Rônier	MV R1	MV R2	MV R3	MV R4	MV R5	MV R6	MV R7	MV R8	MV R9	MV R10
M (g)	8,627	8,35	8,453	8,348	8,483	8,712	8,332	8,238	8,641	8,258
L (mm)	20,66	20,46	20,35	20,41	20,59	20,38	20,42	20,58	20,38	20,35
l (mm)	20,54	20,52	20,47	20,73	20,51	20,53	20,53	20,58	20,5	20,56
e (mm)	20,6	20,53	20,52	20,55	20,45	20,5	20,52	20,5	20,5	20,47
Mv (kg/m ³)	987	969	989	960	982	1016	969	949	1009	964
moyenne = 979 kg/m³ - écartype = 21 kg/m³										

La dispersion sur les masses volumiques mesurées sur ces deux essences est relativement importante pour des raisons différentes. Dans le cas du pin, nous avons aussi remarqué que cette variabilité pouvait être reliée à la largeur des cernes : plus les cernes sont serrés et plus la masse volumique est élevée. Dans le cas du rônier, cette variabilité s'explique par les difficultés de façonner les échantillons car, au sciage, il y a parfois de gros arrachements et les cubes de 20x20x20 ne sont pas toujours très réguliers ce qui amène des imprécisions importantes de mesure.

Contrairement à la teneur en eau, il y a ici une différence très importante entre les deux échantillons. Le rônier est beaucoup plus dense que le pin ce qui d'ailleurs est observable sans mesure qualitativement quand on a les deux matériaux en main. Si l'on compare ces résultats à aux données issues de la base de données Tropix© 7 du CIRAD, plusieurs remarques peuvent être faites :

- Dans la classification proposée par le CIRAD (tableau II.11), l'échantillon de pin analysé entre dans la catégorie des bois légers et le rônier dans celle des bois très lourds qui est la catégorie la plus élevée.
- A titre de comparaison, des bois connus pour être durs comme le chêne ou l'ébène ont des masses volumiques respectives d'à peine 740 kg/m³ et 900 kg/m³.
- L'échantillon de pin que nous avons analysé a une masse volumique très supérieure à celle classiquement rencontrée (550 kg/m³). Les échantillons que nous avons sont particuliers car ils ont des cernes très serrés.

Tableau II.11: Classes de densité et de dureté

Densité		Dureté	
Classes	Signification	Classes	Signification
D < 0,5	Bois très léger	N < 1,5	Bois très tendre
0,5 < D < 0,65	Bois léger	1,5 < N < 3	Bois tendre
0,65 < D < 0,8	Bois mi- lourd	3 < N < 6	Bois mi-dur
0,8 < D < 0,95	Bois lourd	6 < N < 9	Bois dur
D > 0,95	Bois très lourd	N > 9	Bois très dur

5.2. Dureté

Les résultats des essais de dureté Monnin sont donnés dans le tableau II.12.

On retrouve sur ces résultats de dureté des problèmes d'homogénéité des échantillons de rônier. En effet, la dispersion sur les échantillons de pin est relativement faible et les échantillons ont un aspect homogène. Pour les échantillons de rônier, nous avons utilisé des planches différentes pour découper les échantillons de 14 x 14 mm² de section et ceux de 20 x 20 mm². On observe des différences importantes entre les valeurs de ces échantillons qui pourraient être liées à des planches ayant des propriétés différentes si elles n'ont pas été prélevées au même endroit et notamment plus ou moins proche de la moelle. D'ailleurs, pour des échantillons de même section, la dispersion des résultats pour le rônier est grande ce qui rend difficile les interprétations.

Tableau II.12: Dureté Monnin des échantillons de bois

Pin - 14 x 14 mm ²				Rônier - 14 x 14 mm ²				Rônier - 20 x 20 mm ²			
	a (mm)	t (mm)	N		a (mm)	t (mm)	N		a (mm)	t (mm)	N
DS1	5,05	0,21	4,68	DR1	3,43	0,10	10,14	DR6	4,59	0,18	5,66
DS2	5,52	0,26	3,91	DR2	4,39	0,16	6,18	DR7	4,00	0,13	7,45
DS3	5,17	0,22	4,46	DR3	3,04	0,08	12,99	DR8	4,92	0,20	4,93
DS4	5,33	0,24	4,18	DR4	5,05	0,21	4,68	DR9	5,43	0,25	4,03
DS5	5,45	0,25	4,00	DR5	4,16	0,15	6,89	DR10	3,60	0,11	9,21
DS6	4,94	0,20	4,89	Moyenne : 8,17 Ecart-type : 3,35				Moyenne : 6,26 Ecart-type : 2,07			
DS7	5,55	0,26	3,86								
DS8	5,12	0,22	4,54								
Moyenne : 4,32 Ecart-type : 0,38											

Quoiqu'il en soit, on constate tout de même des différences remarquables une fois de plus entre le pin et le rônier : le rônier est beaucoup plus dur que le pin. Si l'on utilise la classification du CIRAD, le pin serait classé comme un bois mi-dur alors que le rônier serait un bois dur. Comme cela avait été le cas pour la masse volumique, l'échantillon de pin testé est beaucoup plus dur que ce que l'on observe classiquement (la dureté du pin maritime est égale à 2,3 selon la fiche Tropix©). Enfin, malgré la dispersion, les résultats obtenus sur le rônier restent supérieurs à ceux du chêne (entre 3,5 et 5) ou de l'ébène (autour de 7).

5.3. Résistance en compression

Le tableau II.13 présente les résultats obtenus sur des échantillons 14 x 14 x 60 mm³ de pin.

Tableau II.13: Résistance en compression des échantillons de pin

Echantillon	F _{max} (N)	b (mm)	h (mm)	σ _c (MPa)
CS1	11905	14,02	13,86	61,3
CS2	10628	13,93	13,84	55,1
CS3	11449	13,92	14,02	58,7
CS4	11176	13,98	14,00	57,1
CS5	12150	13,83	14,05	62,5
CS6	12701	13,87	14,15	64,7
CS7	11970	13,84	14,05	61,6
CS8	10197	13,83	13,93	52,9
CS9	12309	13,88	14,05	63,1
CS10	11037	13,87	13,93	57,1
Moyenne	11552	13,90	13,99	59,4
Ecart-type	793	0,065	0,097	3,8

La résistance moyenne en compression du pin est de 59,4 MPa avec une dispersion relativement faible. Comme pour les autres caractéristiques, cette valeur est supérieure à celle communément observée pour le pin, les fiches de Tropix© donnant une valeur égale à 39 MPa.

Le tableau II.14 présente les résistances en compression des échantillons de rônier mesurées sur des éprouvettes de deux dimensions : 14 x 14 x 60 mm³ (pour pouvoir comparer au pin) et 20 x 20 x 60 mm³ (qui sont les dimensions normalisées).

Tableau II.14: Résistance en compression des échantillons de rônier

		Fmax (N)	b (mm)	h (mm)	σ_c (Mpa)
14 x 14 mm ²	CR1	19318	14,55	14,63	90,8
	CR2	16589	14,51	14,52	78,7
	CR3	19797	14,5	14,56	93,8
	CR4	19622	14,55	14,46	93,3
	CR5	15083	14,52	14,55	71,4
	Moyenne	18082	14,53	14,54	85,58
	Ecart-type	2125	0,02	0,06	10,01
20 x 20 mm ²	CR6	21778	20,40	20,43	52,3
	CR7	22098	20,41	20,43	53,0
	CR8	30444	20,47	20,43	72,8
	CR9	29069	20,51	20,45	69,3
	CR10	15913	20,24	20,42	38,5
	Moyenne	23860	20,41	20,43	57,17
	Ecart-type	5939	0,10	0,01	13,98

Les résultats du tableau II.14 montrent une grande hétérogénéité dans les valeurs de résistance mesurées. De plus, il semblerait de prime abord que la différence de géométrie joue un rôle important sur la valeur de la résistance ce qui ne devrait normalement pas être le cas. Une explication de ces différences entre les résistances mesurées sur les éprouvettes de section 14x14 mm² et 20x20 mm² est que les échantillons n'ont pas été prélevés dans les mêmes lattes. Comme pour les autres essais, cela souligne la grande hétérogénéité de ce bois à laquelle il faudrait plus prendre garde dans des perspectives d'essais plus précis. Ce problème d'hétérogénéité se retrouve dans les faciès de rupture des éprouvettes. En effet, pour les échantillons CR6, CR7 et CR10 dont les valeurs de résistance sont grisées, la rupture des éprouvettes ne se fait pas de manière classique avec bandes de cisaillement comme pour le pin (figure II.25.a) mais on assiste à une véritable décohésion entre les fibres (figure II.25.b et c). Pour l'éprouvette CR10, nous observons, en plus, de grosses porosités transverses (comme des trous d'insectes) visibles sur la longueur de l'éprouvette qui fragilisent de manière importante l'éprouvette. Ainsi, les valeurs grisées pourraient être écartées de la moyenne des résistances en compression et si l'on faisait alors la moyenne sur toutes les autres valeurs (quel que soit la géométrie de l'éprouvette), on obtiendrait une résistance en compression moyenne de 81,4 MPa avec un écart-type de 10,9 MPa qui demeure néanmoins élevé.

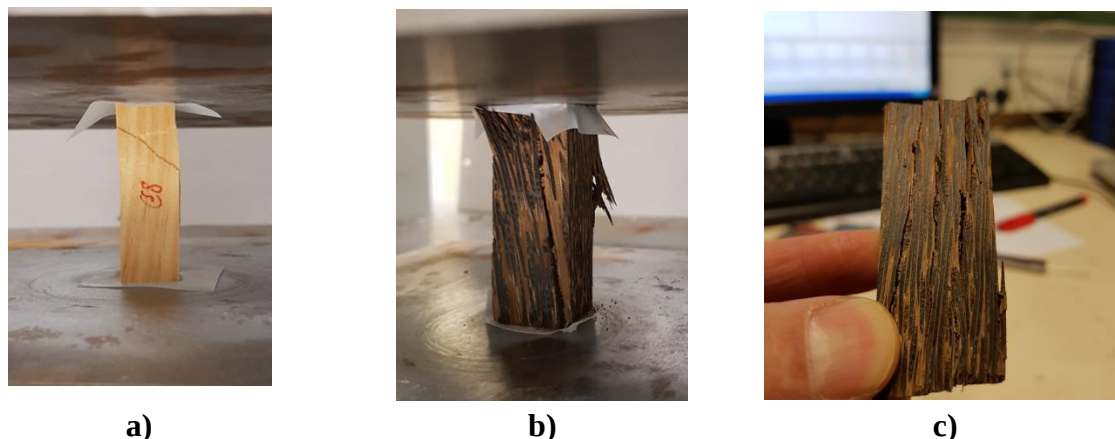


Figure II.26: Faciès de rupture en compression des échantillons de pin (a) et de rônier (b et c)

Par comparaison avec la classification proposée par le CIRAD et présentée dans le tableau II.15, le pin est un bois de résistance moyenne (alors que traditionnellement, il serait plutôt dans la catégorie « résistance faible ») et le rônier est un bois de résistance élevée quand il est prélevé dans sa partie la plus résistante. Comme nous l'avons fait précédemment, nous pouvons apprécier cette résistance très élevée en le comparant à celle du chêne et de l'ébène qui ont la même gamme de résistance en compression (comprise entre 50 et 65 MPa).

Tableau II.15: Classes de résistance en compression axiale (σ_c)

Classes	Signification
$\sigma_c < 450 \text{ kg/cm}^2$ (44,1 MPa)	Résistance faible
450 kg/cm^2 (44,1 MPa) $< \sigma_c < 750 \text{ kg/cm}^2$ (73,5 MPa)	Résistance moyenne
$\sigma_c > 750 \text{ kg/cm}^2$ (73,5 MPa)	Résistance élevée

5.3. Résistance en flexion

Le tableau II.16 présente les résultats obtenus sur des échantillons $14 \times 14 \times 320 \text{ mm}^3$ de pin.

Comme pour les autres caractéristiques, les valeurs de résistance et de module en flexion de l'échantillon de pin étudié sont élevées. Elles sont respectivement égales à 129 MPa et 14780 MPa contre 80 MPa et 8750 MPa pour les fiches de référence de Tropix ©. Comme pour les autres caractéristiques, cette résistance accrue est certainement liée à l'anatomie de ces échantillons relativement spécifiques pour du pin avec des cernes très étroits.

Comme nous l'avons fait pour les autres caractéristiques, la résistance et le module en flexion ont été mesurés pour le rônier sur des éprouvettes de deux dimensions : $14 \times 14 \times 320 \text{ mm}^3$ pour pouvoir comparer les résultats obtenus à ceux du pin avec une géométrie identique et $20 \times 20 \times 320 \text{ mm}^3$ qui sont les dimensions imposées par la norme d'essai. Les résultats sont présentés dans le tableau II.17.

Tableau II.16: Résistance et module en flexion des échantillons de pin

Echantillon	F _{max} (N)	σ_{FH} (MPa)	E _{LH} (MPa)
FS1	1291	114,2	13111
FS2	1408	124,6	13335
FS3	1585	140,2	16752
FS4	1655	146,4	16142
FS5	1405	123,0	14757
FS6	1636	144,7	15533
FS7	1250	110,6	15412
FS8	1462	129,3	16190
FS9	1285	113,7	13364
FS10	1588	140,5	13204
Moyenne	1457	128,7	14780
Ecart-type	153	13,6	1417

Tableau II.17: Résistance et module en flexion des échantillons de rônier

		F _{max} (N)	σ_{FH} (MPa)	E _{LH} (MPa)
14 x 14 mm ²	FR1	848	65,7	10934
	FR2	881	68,2	11176
	FR3	872	67,5	12633
	FR4	1274	98,7	15154
	FR5	678	52,5	11094
	Moyenne	911	70,5	12198
	Ecart-type	219	17,0	1788
20 x 20 mm ²	FR6	4043	113,6	20299
	FR7	3718	104,4	15772
	FR8	4686	131,6	18066
	FR9	3758	105,6	16003
	FR10	4675	131,3	19539
	FR11	3678	103,3	15969
	FR12	3174	89,2	14732
	FR13	5612	157,6	17463
	Moyenne	4168	117,1	17230
	Ecart-type	777	21,8	1963

On constate une fois encore que les résultats sur les échantillons de rônier sont très dispersés et beaucoup plus dispersés que sur le pin ce qui montre une nouvelle fois la grande hétérogénéité de cette essence de bois. De plus, encore plus que pour les autres caractéristiques, les résultats sont très différents en fonction de la géométrie des éprouvettes. Si l'on compare les valeurs du rônier et du pin pour les mêmes sections (14x14mm²), pour la première fois, le pin présente des

résistances plus élevées ce qui va à l'encontre des autres résultats obtenus. Il est possible que, pour cette caractéristique plus que pour les autres, les sections 14x14 mm² soient trop faibles et que le volume élémentaire n'est alors plus représentatif, surtout pour des essences hétérogènes comme le rônier. Il semblerait ainsi plus rigoureux pour le rônier de ne considérer que les valeurs obtenues pour les éprouvettes de section normalisée (20x20 mm²). De plus, avec le rônier, il n'est pas possible d'orienter correctement les cernes par rapport à la charge pour faire l'essai (la norme impose d'orienter la charge perpendiculairement à l'orientation des cernes) car on ne voit pas les cernes du rônier.

Par comparaison avec les classes de résistance en flexion du CIRAD présentées dans le tableau II.18, le pin a une résistance moyenne et un module à la limite moyen/élevé. Le rônier quant à lui qui a toujours été dans les classes les plus élevées pour les autres caractéristiques a une résistance en flexion moyenne et inférieure à celle du pin. Pour le module, le rônier est dans la catégorie des modules les plus élevés, il est donc assez peu déformable.

La résistance en flexion du rônier est voisine de celle du chêne (105 MPa) mais plus faible que celle de l'ébène (130 MPa). Pour les modules de flexion, le rônier est plus rigide que le chêne (13000 MPa) et l'ébène (15500 MPa).

Tableau II.18: Classes de résistance en flexion statique (σ_F) et module d'élasticité longitudinal (E_F)

Classes de résistance en flexion statique (σ_F)		Classes de module d'élasticité longitudinal (E_F)	
Classes	Signification	Classes	Signification
$\sigma_F < 109$ MPa	Résistance faible	$E_F < 9800$ MPa	Module faible
$109 \text{ MPa} < \sigma_F < 176$ MPa	Résistance moyenne	$9800 \text{ MPa} < E_F < 14700$ MPa	Module moyen
$\sigma_F > 176$ MPa	Résistance élevée	$E_F > 14700$ MPa	Module élevé

Pour cet essai de flexion, les faciès de rupture observé sont très différents (figure II.26). La rupture pour le pin (figure II.26.a) est progressive et homogène alors que pour le rônier, on observe une décohésion localisée des fibres qui rappelle le faciès de rupture en compression (figure II.26.b). La figure II.26.c montre l'échantillon de rônier après rupture où l'on peut voir clairement cet aspect très fibreux de ce bois.

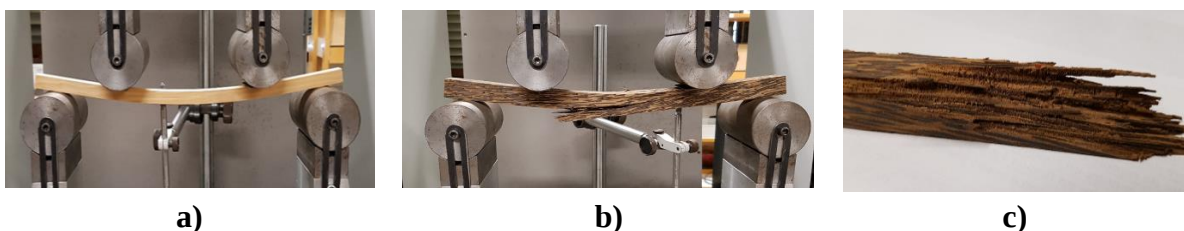


Figure II.27: Faciès de rupture en flexion des échantillons de pin (a) et de rônier (b et c)

6. CONCLUSION

Ce chapitre avait pour objectif de caractériser de manière approfondie les différents matériaux utilisés tout au long de cette thèse. La caractérisation des deux terres utilisées durant ce travail a montré que ces terres avaient des comportements très proches malgré leurs origines très différentes (la terre UAC vient du Bénin alors que la terre de Bouisset du sud-ouest de la France). Ces deux terres sont des terres de type latérite qui contient de la kaolinite comme argile principale. Le fait que ces deux terres aient des caractéristiques comparables est particulièrement utile car cela va nous permettre de les utiliser dans la suite de ce travail de manière indifférenciée : dans le chapitre suivant sur les entrevous, nous utiliserons la terre UAC alors que dans le quatrième chapitre sur les poutres en béton de terre armé, nous utiliserons la terre de Bouisset.

La suite du chapitre a consisté en la caractérisation chimique, physique et minéralogique de la paille de riz. Des caractéristiques importantes pour l'utilisation de la paille de riz dans les matériaux en terre crue ont été mesurées telles que la masse volumique et la conductivité thermique de la paille en vrac ou encore sa capacité d'absorption d'eau. Ces caractéristiques seront très utiles lors de l'incorporation de la paille de riz dans les composites en terre crue pour les entrevous (chapitre 3) ou dans les bétons de terre pour les poutres armées (chapitre 4).

Enfin, deux essences de bois (le pin et le rônier) ont été caractérisées. Le LMDC et l'Université d'Abomey Calavi n'étant pas des spécialistes du bois, nous avons fait appel pour ces essais à un laboratoire spécialisé à Tarbes (l'Institut Clément Ader) avec le Professeur Florent Eyma. Les essais ont porté sur la masse volumique, la teneur en eau, la dureté, la résistance en compression ainsi que la résistance et le module en flexion. Les résultats ont montré que les deux essences de bois avaient des caractéristiques très différentes et que, pour la plupart, le rônier était nettement plus performant que le pin. Cependant, les essais ont aussi permis de conclure que cette essence de bois était très hétérogène et qu'il était important de prendre en compte cette hétérogénéité dans la suite de notre travail. Ces deux essences de bois seront utilisées comme armatures dans des éléments en béton de terre armé dans le chapitre 4.

La suite de cette thèse va porter sur l'utilisation de ces matériaux dans deux éléments de structure en terre : les entrevous (chapitre 3) et les poutres en béton de terre armé (chapitre 4).

7. REFERENCES

- ABAKAR A. Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz. Université de Lorraine, 2018.
- ACHOUR N. Modélisation multi-échelle et analyse expérimentale du comportement de composites à matrice thermoplastique renforcés fibres de verre sous sollicitations dynamiques modérées. Mécanique des matériaux, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2017.
- AMZIANE S., COLLET F., LAWRENCE M., MAGNIONT C., PICANDET V., SONEBI M. et al. Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity. *Materials and Structures* 50, 2017.
- ASTM D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials, 1998.
- AUBERT J.E. Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. Rapport final du projet TERCRUSO, avril 2013.
- AUBERT J.E., MARCOM A., OLIVA P., SEGUI P. Chequered earth construction in southwestern France. *Journal of cultural heritage* 16, 2015, 293-298
- CAGNON H., AUBERT J.E., COUTAND M., MAGNIONT C. Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and buildings* 80, 2014, 208-217.
- CAVAGNOL S. Approche multi échelle de l'emballlement des réactions exothermiques de torréfaction de la biomasse lignocellulosique : de la cinétique chimique au lit de particules. Thèse de doctorat, Ecole centrale des arts et manufactures, Ecole centrale Paris, 2013.
- CHRETIEN M., FABRE R., DENIS A., MARACHEA. Recherche des paramètres d'identification géotechnique optimaux pour une classification des sols sensibles au retrait-gonflement. *Rev. Fr. Géotechnique*, 2007, 91–106.
- CNERTP. Système de stockage décentralisé: Recherche sur les greniers en terre au Bénin. Cotonou, 1993.
- FBT Isolation. Fibres biosourcés et techniques, Fiche produit Panneau PR SD. 2019.
- LABOREL-PRENERON A. Formulation and characterization of unfired clay bricks with plant aggregates. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 2017, p. 260.
- LABOREL-PRENERON A., MAGNIONT C., AUBERT J.-E. Characterisation of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 9 (7), 2018, 1095-1112.
- LAGOUIN M. Caractérisation et optimisation multiphysique d'une paroi bi couche bio et géosourcée. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 2020, p. 278.
- MAGNIONT C. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 2010.

MILLOGO Y., AUBERT J.E., HAMARD E., MOREL J.C. How properties of kenaf fibers from Burkina Faso contribute to the reinforcement of earth blocks. *Materials* 8, 2015, 2332-2345.

NF B 51-005. Bois - Détermination de la masse volumique. AFNOR, 1985.

NF B 51-007. Bois - Essai de compression axiale. AFNOR, 1985.

NF B 51-008. Bois - Essai de flexion statique - Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. AFNOR, 1987.

NF B 51-013. Bois - Détermination de la dureté Monnin. AFNOR, 1985.

NF B 51-016. Bois - Flexion statique - Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut. AFNOR, 1987.

NF P11-300. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Association Française de Normalisation, 1992.

NF P94-041. Reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. Association Française de Normalisation, 1995.

NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg. Association Française de Normalisation, 1993.

NF P94-057. Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation. Association Française de Normalisation, 1992.

NF P94-068. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche. Association Française de Normalisation, 1998.

NGUYEN H.G. Approche micromécanique pour la modélisation du comportement élastoplastiques des composites : application aux mortiers de résine. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2008, p.115.

NOBLE G. La paille de riz de Camargue, la recette pour une isolation réussie ? Rockwool Rockcomble Evolution, 2018.

PEREZ J., MUNOZ-DORADO J., DE LA RUBIA T. et al. Biodégradation et traitements biologiques de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine: un aperçu. *Interantional Microbiology* 5, 2002, 53-63.

OUEDRAOGO M., DAO K., MILLOGO Y., AUBERT J.E., MESSAN A., SEYNOU M., ZERBO L., GOMINA M. Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. *Journal of Building Engineering* 23, 2019, 250-258.

OUEDRAOGO A.K.J. Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 2019, p. 169.

RADANIELINA M.H. Co-valorisation énergie et matière des résidus agricoles par pyro-gazéification. Génie des procédés, Université d'Antananarivo, 2018.

RAJEMISON A.H. Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois : Cas du Palissandre de Madagascar - Application en ameublement. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, 2019, p. 210.

TUAN A.P. Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge. Thèse de doctorat de Normandie Université, 2018.

VERDEYEN J., ROISIN V., NUYENS J. Mécanique des Sols. Paris Dunod Ed., 1968, p. 243.

XP P13-901. Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Association Française de Normalisation, 2001.

YOUSSEF I., LAWANI M. Les sols béninois : classification dans la base de référence mondiale. Rapport de la quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Abomey, Bénin, 9-13 octobre 2000.

Chapitre 3 : ETUDE DES ENTREVOUS EN COMPOSITE TERRE - PAILLE DE RIZ

SOMMAIRE

1.	COMPOSITE TERRE – PAILLE DE RIZ	99
1.1.	Matériaux et procédures	99
1.2.	Résultats et discussions	103
2.	ETUDE DES ENTREVOUS FABRIQUES EN COMPOSITE TERRE - PAILLE	111
2.1.	Présentation des différents types d'entrevous	111
2.2.	Fabrication des entrevous à base de composite terre-paille de riz	113
2.3.	Procédures d'essais sur les entrevous	116
2.4.	Résultats et discussions	121
3.	CONCLUSION	124
4.	REFERENCES	125

Ce chapitre concerne le premier élément structurant du système de plancher en terre crue que nous souhaitons développer à savoir les entrevous en terre crue. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons étudier un matériau composite à base de terre crue, de paille de riz et de décoction de néré. Nous allons faire varier la proportion de chacun des paramètres afin d'optimiser le mélange. Les mélanges seront formulés en utilisant les paramètres optimums de l'essai Proctor et, après séchage, nous mesurerons les propriétés suivantes : résistance en compression, résistance à l'abrasion, résistance à l'érosion et conductivité thermique. Le mélange le plus performant sera ensuite utilisé pour fabriquer deux types d'entrevous qui seront caractérisés conformément aux normes en vigueur : les propriétés mesurées sur ces entrevous seront la résistance de poinçonnement-flexion et la résistance de compression longitudinale.

1. COMPOSITE TERRE – PAILLE DE RIZ

1.1. Matériaux et procédures

1.1.1. Compositions des mélanges étudiés

La figure III.1 présente les différents mélanges étudiés. Il s'agit de mélanger de la terre (ici la terre UAC du Bénin sélectionnée dans le chapitre précédent), des tiges de paille de riz et de la décoction de Néré. Quatre dosages de tiges de paille de riz sont envisagés : 0% (échantillons de terre témoin), 1%, 2% et 4%. Pour la décoction de néré, 4 dosages seront étudiés : 0%, 3%, 6% et 12%. Cela donne lieu à la nomenclature des mélanges suivante : « dosage en paille – dosage en décoction ». Par exemple, le mélange « 2-6 » contient 2% de paille et 6% de décoction.

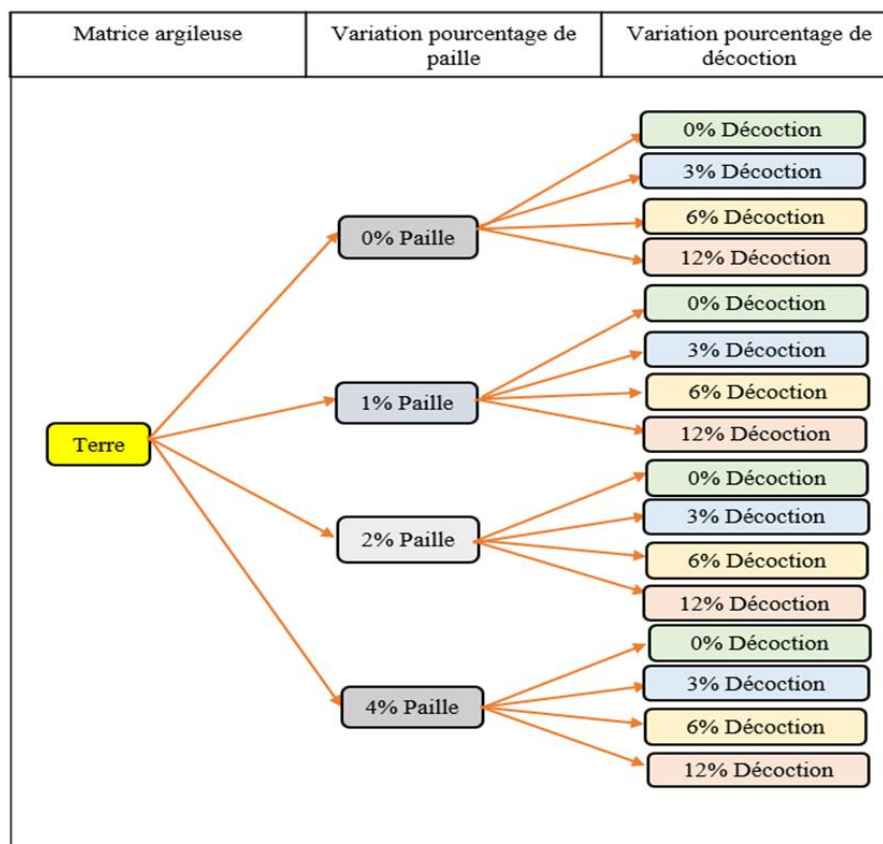


Figure III.1: Compositions des mélanges étudiées

1.1.2. Procédures

Essais Proctor normal sur mélanges à l'état frais

L'essai Proctor permet de déterminer la masse volumique sèche apparente maximale (ρ_{dOPN}) obtenue pour une teneur en eau optimale (w_{OPN}). Il est déterminé selon la norme (NF P 94-093, 2014). La masse volumique sèche apparente finale d'un sol dépend de la nature de celui-ci, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance.

Dans cette étude, l'essai a été réalisé sur les terres seules ainsi que sur les matériaux composites composés de terres et de tiges de paille de riz pour la fabrication des entrevous. Les cinq à six points de la courbe Proctor ont été déterminés sur le même échantillon qui a été progressivement humidifié et mélangé avant chaque cycle de compactage. Quatre compositions de 3 kg de sol avec de la paille de riz dans des proportions de 0%, 1%, 2% et 4% ont été testées. Pour chaque composition, le mélange est préparé avec une teneur en eau d'environ 10% et humidifié puis stocké dans un sac hermétiquement fermé 24 h avant l'essai. Au moment de l'essai, on ajoute à la composition de la veille environ 2% d'eau qu'on mélange à la main et au malaxeur. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes de 2% en 2%.

A partir de plusieurs mesures de masse volumique sèche effectuées sur les mélanges présentant différentes teneurs en eau, la courbe $\rho_d = f(w)$ est tracée. Elle présente un maximum, l'optimum Proctor normal, qui correspond à la teneur et à la masse volumique sèche optimales notées (w_{OPN} ; ρ_{dOPN}).

Fabrication des éprouvettes

Deux types d'éprouvettes ont été fabriqués : des éprouvettes cylindriques pour les essais mécaniques et des éprouvettes prismatiques pour les essais de durabilité et de conductivité thermique.

Les éprouvettes cylindriques ont été confectionnées suivant la norme (EN 13286-53, 2005) avec un diamètre de 50 mm et une hauteur de 50 mm. Chaque formulation est préparée la veille puis stockée pendant 24 heures dans un sac plastique scellé afin de s'assurer qu'elle absorbe suffisamment d'eau avant la fabrication des éprouvettes. La quantité appropriée du matériau humide est placée dans un moule cylindrique et compressée pour obtenir l'échantillon cylindrique (voir figure III.2 a). Toutes les éprouvettes cylindriques ont été confectionnées avec une pression de compactage de 3 MPa. Les éprouvettes cylindriques ont été confectionnées suivant les 16 formulations définies plus haut.

Des échantillons parallélépipédiques de dimensions 150 x 150 x 50 mm³ ont également été préparés pour trois mélanges différents : le mélange avec de la terre seule (0-0), le mélange avec 2% de paille sans décoction (2-0) et le mélange avec 2% de paille et 6% de décoction de néré (2-6). Cette forme d'éprouvette a été utilisée pour l'étude de la durabilité et de la conductivité thermique du matériau composite. Le matériau humide inséré dans le moule est recouvert d'une plaque de bois pour assurer la répartition de la compression. Le bois à son tour est protégé par une plaque métallique sur laquelle on applique une compression statique uniaxiale à l'aide d'un piston afin d'obtenir une éprouvette de 50 mm d'épaisseur (figure III.2.b).



Figure III.2: Fabrication des éprouvettes cylindriques (a) et prismatiques (b)

Après compactage, les éprouvettes ont été immédiatement séchées dans une pièce climatisée avec une humidité relative de 50 % et une température de 20 °C. Le séchage était considéré comme terminé lorsque le poids de l'échantillon varie de moins de 0,1% sur 24 h.

Résistance en compression

Les éprouvettes cylindriques après séchage jusqu'à masse constante ont été soumises à l'essai de compression simple. L'essai a été réalisé avec une presse hydraulique IGM équipée d'un capteur de force de 50 kN, à une vitesse de 0,2 kN/s. L'éprouvette cylindrique de diamètre $\varnothing=5$ cm et de hauteur $h=5$ cm est placée entre deux plateaux perpendiculairement à son axe principal (figure III.3). Il est nécessaire de préciser que l'essai de compression a été réalisé sans utilisation d'un système antifretage et sans la mesure des déformations des éprouvettes.



Figure III.3: Essai de compression sur les éprouvettes cylindriques

Résistance à l'abrasion

Ce test, réalisé suivant la norme (XP 13-901, 2001), consiste à brosser à raison d'un aller-retour par seconde pendant une minute, la surface de la brique à l'aide d'une brosse métallique en acier chargée d'une masse de 3 kg (figure III.4). Le brossage se fait sur toute la longueur du bloc sans appliquer de force verticale sur la brosse. Pendant toute la durée de l'essai, au moins

la moitié de la surface de la brosse doit rester en permanence en contact avec la surface du bloc. La largeur de la surface brossée ne doit pas excéder la largeur de la brosse de plus de 2 mm. Le bloc est nettoyé des éléments qui s'en sont détachés puis repesé après le brossage et le coefficient d'abrasion est calculé suivant la formule suivante : $C_a = \frac{S}{m_0 - m_1}$ avec S : la surface brossée en cm², m_0 : la masse avant brossage du bloc de terre en g et m_1 : la masse après brossage du bloc de terre en g.

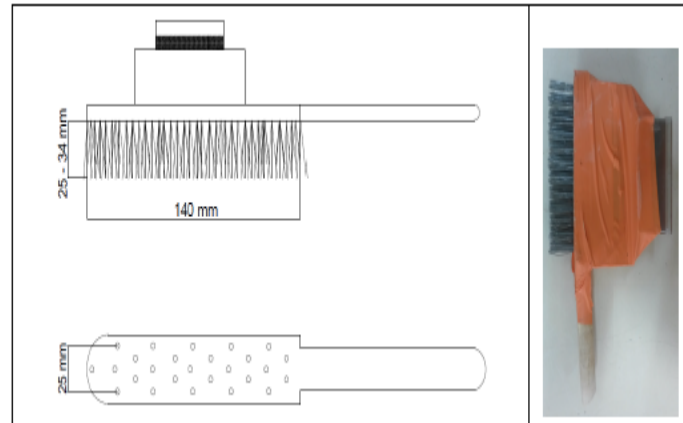


Figure III.4: Description de la brosse pour l'essai d'abrasion

Résistance à l'érosion

Ce test appelé "droptest" est basé sur la méthode Geelong. Réalisé selon la norme néo-zélandaise (NZS 4298, 1998), il simule l'impact des gouttes de pluie sur un mur. Cette norme est utilisée pour les adobes non stabilisés et les blocs comprimés. Le test permet de faire goutter 100 ml d'eau, d'une hauteur de 400 mm sur une brique inclinée à 27° (figure III.5). La durée du test est de 20 à 60 minutes (conforme à celle prévue par la norme).



Figure III.5: Essai d'érosion sur le composite terre-paille de riz

Un indice d'érodabilité est mesuré à partir du trou formé en se référant au tableau III.1.

Tableau III.1: Indice d'érodabilité selon la profondeur du trou formé (NZS 4298, 1998)

Profondeur du trou (D en mm)	Indice d'érodabilité	Observations
$5 \leq D < 10$	3	
$10 \leq D < 15$	4	
$D \geq 15$	5	Echec

Conductivité thermique

La conductivité thermique des composites a été mesurée sur des échantillons parallélépipédiques de dimensions 150 x 150 x 50 mm³ en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée avec le λ -Meter EP-500 déjà décrit dans la section 2.3 du chapitre 2.

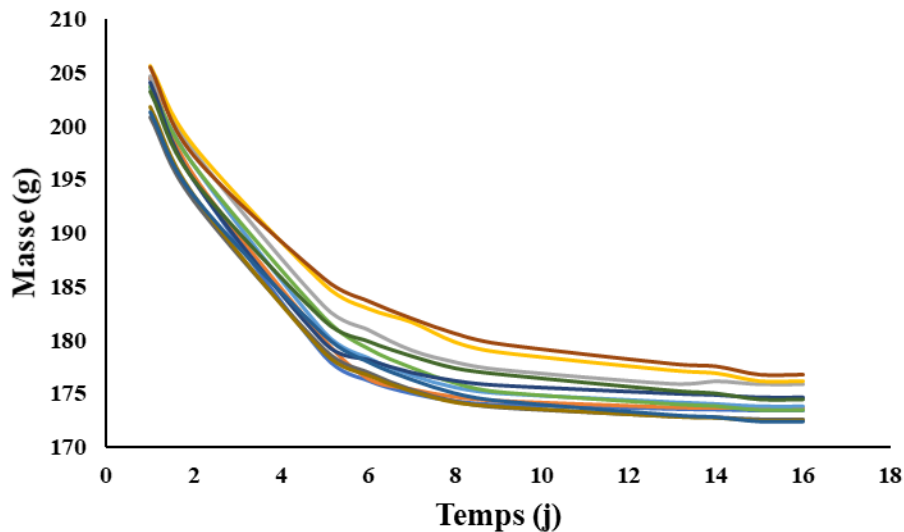
1.2. Résultats et discussions**1.2.1. Essais Proctor et compositions des mélanges étudiés**

L'essai Proctor normal a été réalisé pour déterminer la teneur en eau optimale (w_{OPN}) et la densité sèche optimale (γ_d) des composites à base de terre et de paille de riz (0%, 1%, 2% et 4%). Pour les mélanges contenant de la décoction de néré, nous n'avons pas pu faire les essais Proctor car ces essais consomment une quantité très importante de matériaux et nous n'avons pas assez de décoction de néré à notre disposition. Aussi, pour déterminer la teneur en eau « optimale » pour les mélanges à base de décoction de néré, nous avons utilisé l'essai de la méthode de Casagrande (essai à la coupelle) qui sert à mesurer la limite de liquidité des sols argileux (limite d'Atterberg). Nous avons utilisé cet essai pour quantifier la diminution de la teneur en eau liée à l'ajout de décoction de néré à consistance constante. Nous n'avons fait les essais que pour un ajout de 6% de décoction de néré. Ainsi, pour un mélange de terre avec de l'eau seule, nous obtenons une limite de liquidité w_l de 43% alors qu'avec un ajout de 6% de décoction de néré au mélange, nous obtenons une limite de liquidité de 38%. Nous avons considéré que la diminution de la teneur en eau évoluait de façon linéaire avec la quantité de décoction ajoutée et nous avons ainsi déduit la teneur en eau des mélanges avec décoction par le calcul. Cette manière de faire est très approximative et il conviendrait de vérifier que ces teneurs en eau correspondent effectivement aux teneurs en eau pour avoir un compactage optimal mais cela nécessiterait des quantités de décoction très importantes. De plus, pour la densité sèche des mélanges contenant de la décoction, nous l'avons déduite de la fabrication des éprouvettes $\phi 5h5$ en utilisant la masse volumique obtenue avec une pression de compactage constante égale à 3 MPa. Le tableau III.2 présente la composition des 16 formulations étudiées à savoir leurs teneurs en paille de riz et en décoction de néré ainsi que leur teneur en eau et leur masse volumique sèche de fabrication.

Tableau III.2 : Composition des différentes formulations

	Constituant (%)		ω (%)	γ_d (g/cm ³)		Constituant (%)		ω (%)	γ_d (g/cm ³)
Mélange	Paille	Néré			Mélange	Paille	Néré		
0-0	0	0	18,12	2,25	2-0	2	0	19,00	1,83
0-3		3	17,07	2,15	2-3		3	17,90	1,82
0-6		6	16,01	2,09	2-6		6	16,79	1,87
0-12		12	13,90	2,01	2-12		12	14,58	1,89
1-0	1	0	19,70	1,86	4-0	4	0	18,70	1,85
1-3		3	18,56	1,82	4-3		3	17,62	1,84
1-6		6	17,41	1,85	4-6		6	16,53	1,81
1-12		12	15,12	1,88	4-12		12	14,36	1,83

Après compactage, les éprouvettes ont toutes été séchées dans les mêmes conditions (conservation dans une salle climatisée à 20°C et 50% HR). Les courbes de séchage des éprouvettes en fonction du temps sont présentées sur la figure III.6. Comme l'allure de toutes les courbes est la même et qu'il ne semble pas qu'il y ait de différence entre les mélanges, nous avons mis toutes les courbes sur la même figure afin de commenter la cinétique de séchage globale, sans chercher à analyser d'éventuelles différences entre les compositions.

**Figure III.6: Courbes de séchage des éprouvettes cylindriques de composite**

On constate sur la figure III.6 que le séchage est rapide durant les 5 premiers jours. Au-delà, la pente de la perte de masse diminue une première fois durant 3-4 jours puis elle se stabilise par la suite. Pour l'ensemble des éprouvettes cylindriques, il a fallu attendre une quinzaine de jours pour que le séchage soit complet.

1.2.2. Résistances en compression

Le tableau III.3 présente les résistances en compression des éprouvettes cylindriques. La teneur en eau et densité de compactage des éprouvettes sont aussi rappelées.

Tableau III.3: Résistance en compression des différentes formulations

Teneur (%)		ω (%)	ρ_d (g/cm ³)	σ_c (MPa)	Teneur (%)		ω (%)	ρ_d (g/cm ³)	σ_c (MPa)
Paille	Néré				Paille	Néré			
0	0	18,1	2,25	1,87±0,13	2	0	19,0	1,83	4,15±0,10
	3	17,7	2,15	1,48±0,01		3	17,9	1,82	3,34±0,35
	6	17,3	2,09	0,96±0,18		6	17,1	1,87	4,70±0,44
	12	17,1	2,01	0,64±0,10		12	16,3	1,89	5,31±0,35
1	0	19,7	1,86	2,64±0,04	4	0	18,7	1,85	6,02±0,55
	3	18,1	1,82	1,96±0,49		3	17,1	1,84	4,70±1,30
	6	17,8	1,85	2,89±0,16		6	16,9	1,81	6,28±0,14
	12	15,6	1,88	3,06±0,57		12	15,6	1,83	6,68±0,62

Influence des tiges de paille de riz sur la résistance en compression

La figure III.7 présente la résistance en compression du composite en fonction du pourcentage de paille de riz ajouté pour des mélanges ne contenant pas de décoction de néré.

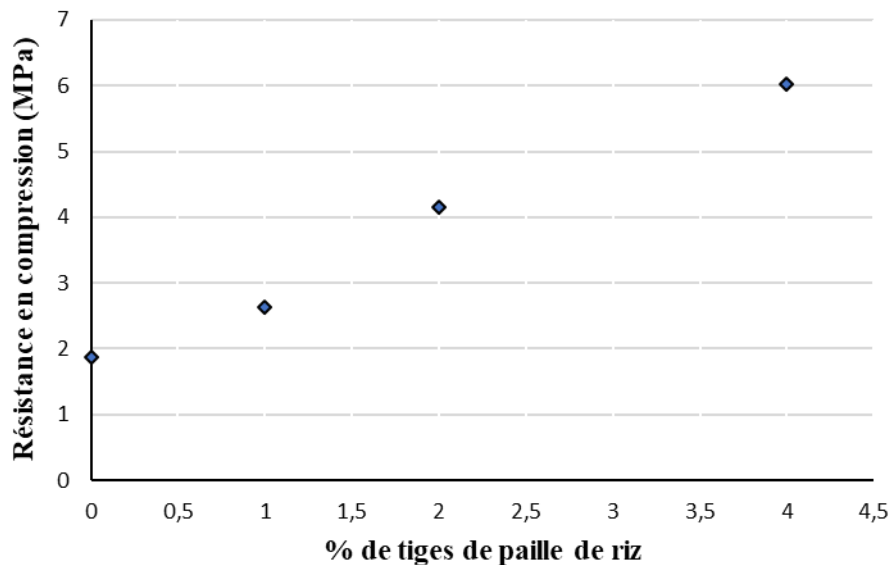


Figure III.7: Résistance en compression du composite (sans décoction) en fonction du pourcentage de paille

La figure III.7 montre qu'en l'absence de décoction de néré, la résistance en compression s'améliore avec l'augmentation du pourcentage de paille de riz. Cette amélioration de la résistance serait principalement due à la forme des pailles de riz utilisées dans cette étude. Le fait que les pailles soient préalablement débarrassées de leurs feuilles non résistantes pour n'utiliser que des tiges de 3 cm de long, rend les composites plus résistants. Cette augmentation de la résistance en compression a déjà été observée pour d'autres fibres végétales dans la

littérature (MILLOGO et al., 2014 ; BABATOUNDE, 2017 ; LABOREL-PRENERON et al., 2017).

L'incorporation de 3 cm de longueur de fibres favoriserait également cette amélioration de la résistance. En effet, cette longueur serait suffisante pour empêcher la propagation des fissures dans le composite en raison de la bonne adhérence des fibres avec la matrice argileuse (MILLOGO et al., 2015 ; BABATOUNDE, 2017).

Influence de la décoction de néré sur la résistance en compression

La figure III.8 présente les résultats obtenus pour les mélanges ne contenant pas de paille de riz en fonction du dosage en décoction.

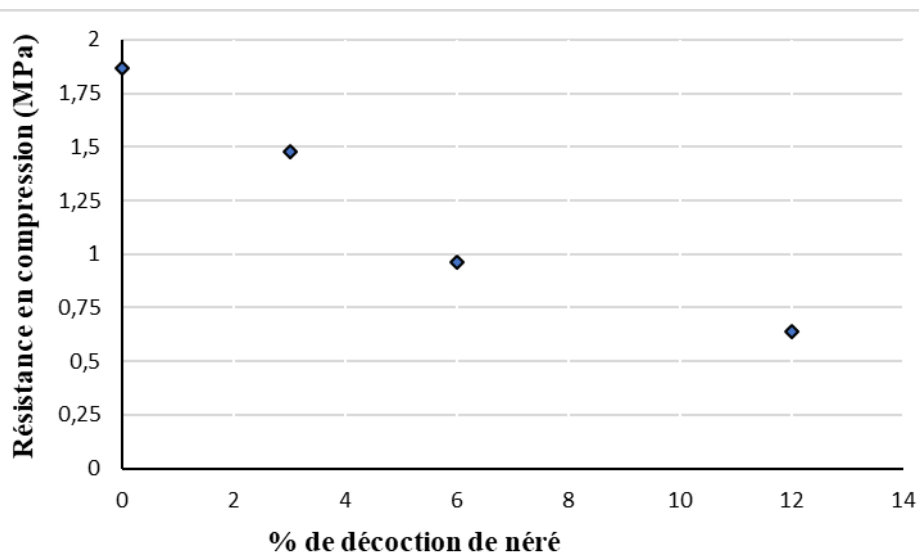


Figure III.8: Résistance en compression du composite (sans paille) en fonction du dosage en décoction

La décoction de néré à elle seule n'améliore pas la résistance à la compression de la terre. Ce phénomène pourrait être dû à la nature visqueuse de la décoction de néré pouvant conduire à des difficultés de compactage de l'éprouvette pendant la confection. En effet, nous observons qu'avec la même pression de compactage (3MPa), la masse volumique des éprouvettes diminue avec l'ajout de décoction de néré de manière quasi linéaire comme les résistances en compression présentées sur la figure III.8. Ainsi, l'ajout de décoction de néré améliore la consistance des mélanges à base de terre mais ne permet pas d'augmenter à lui seul la résistance des composites.

Influence de la combinaison des tiges de paille de riz et de la décoction de néré sur la résistance en compression

A partir de 6 % de décoction, on note une amélioration significative de la résistance pour les mélanges avec fibre végétale. Ces résultats justifient le choix des populations du Nord-Ouest du Bénin de 6% de décoction de néré pour des mélanges fibreux dans la construction de greniers de stockage de céréales (AMBARKA, 2010).

La surface rugueuse des tiges de paille de riz, comme le montre les observations au MEB (figure II.13, favorise leur adhérence à la matrice argileuse. La présence en grande quantité de cellulose

dans les pailles de riz (figures II.14 et II.15) serait à l'origine de cette amélioration de la résistance à la compression du composite.

L'aspect visqueux de la décoction permet un bon enrobage des tiges de paille de riz dans la matrice argileuse. La cohésion des trois constituants devient alors plus forte d'où des résistances plus élevées pour le composite. La décoction de néré contient du tanin qui, en présence de l'argile, forme des complexes chimiques de tanin, d'argile et d'hydroxydes de fer qui améliorent les performances mécaniques du matériau (SORGHO et al., 2016). L'action combinée des tiges de paille de riz et de la décoction de néré permet donc un gain significatif de la résistance en compression.

Les mélanges présentant les meilleures résistances en compression sont ceux contenant à la fois le plus de décoction (6 et 12%) et le plus de paille de riz (4%). Cependant, des mesures isolées de déformation des éprouvettes (résultats non présentés dans ce manuscrit) ont montré que, plus la teneur en paille était élevée, plus la déformation à la rupture était importante ce qui avait aussi été observé dans les travaux de LABOREL-PRENERON et al. (2017). Aussi, nous avons décidé, pour la suite de nos travaux, de conserver le mélange à 2% de paille de riz et 6% de décoction qui présente une bonne résistance en compression $4,70 \pm 0,44$ MPa et qui est comparable aux formules de banco utilisées dans la construction traditionnelle des tatas somba et des greniers de stockage des céréales dans le nord du Bénin (LABINTAN, 2018).

1.2.3. Essais de durabilité : abrasion et érosion

L'étude de la durabilité a été faite sur les trois compositions 0-0, 2-0 et 2-6. La figure III.9 présente les résultats de l'essai d'abrasion réalisé sur ces trois mélanges.

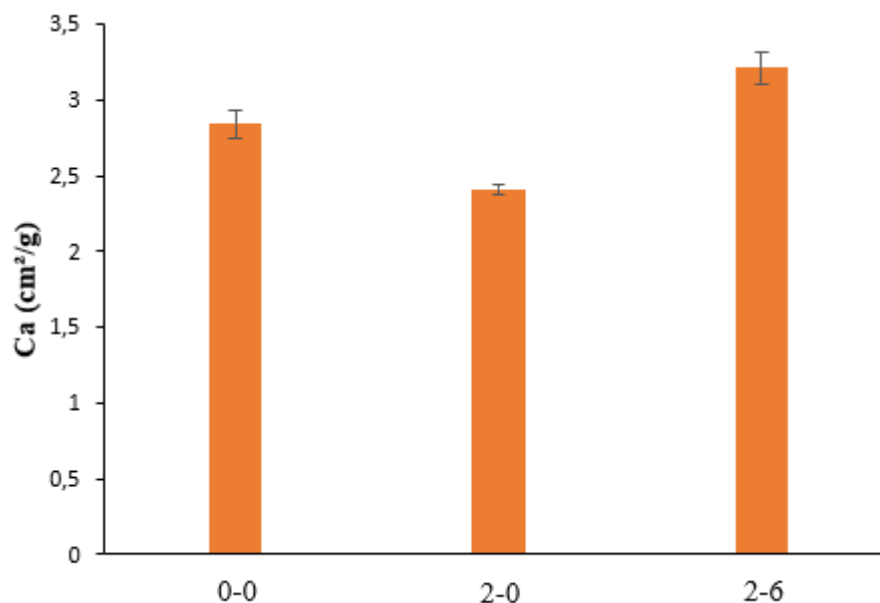


Figure III.9 : Coefficient de résistance à l'abrasion des composites

L'éprouvette 2-0 composée de terre et de paille de riz à 2% a le plus petit coefficient d'abrasion égal à 2,4, tandis que le mélange 2-6 composé de terre, de la paille de riz à 2% et de la décoction de néré à 6% a le plus grand coefficient d'abrasion égal à 3,2. La faible valeur du coefficient

d'abrasion du mélange 2-0 signifie qu'il y a plus de perte de matériau lors du brossage. Vu que la valeur enregistrée pour l'éprouvette témoin de terre uniquement est supérieure à celle obtenue pour le 2-0, le matériau a donc perdu un peu de sa cohésion avec l'introduction de la paille de riz. La valeur du coefficient d'abrasion obtenue avec le mélange 2-6 indique l'amélioration de la cohésion du matériau grâce à la décoction de néré. Cette amélioration est certainement due à la texture visqueuse de la décoction et au tanin qu'elle contient.

La figure III.10 présente la profondeur érodée des différentes éprouvettes soumises au test de Geelong. Cette figure présente en plus des profondeurs de trou, les classes d'érodabilité suivant la norme.

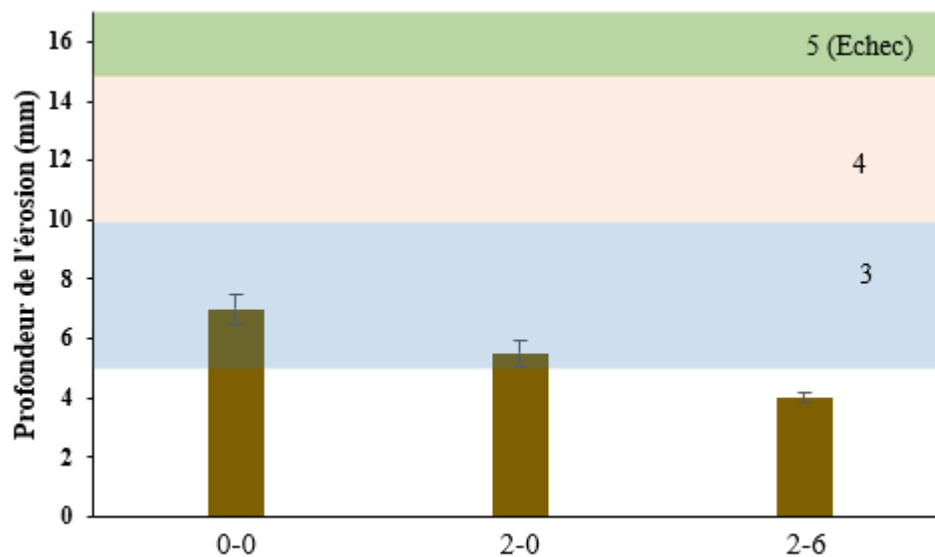


Figure III.10 : Profondeur érodée des composites après le droptest

Aucun des mélanges n'est dans la classe 5 qui représente un échec pour ce test. Les mélanges 0-0 et 2-0 sont de la classe 3 avec des profondeurs de trou respectivement égales à 7 et 5,5 mm. La profondeur de trou du bloc 2-0 est plus petite par rapport à celle du bloc 0-0. Ce dernier étant composé de terre et de 2% de paille de riz, on note que la paille de riz améliore la résistance à l'érosion ce qui a déjà été observé dans la littérature lors de l'introduction de matériaux bisourcés dans la terre crue (MANGO-ITULAMYA, 2019; LABOREL-PRENERON et al., 2021 ; ASHOUR et WU, 2010). En effet, les pailles de riz formant dans la matrice argileuse des panneaux de particules fait ruisseler l'eau l'empêchant ainsi de pénétrer directement dans le composite.

La plus petite valeur de profondeur de trou de 4 mm a été enregistrée par le bloc 2-6. Ce dernier est composé de la terre, de 2% de paille et de 6% de décoction de néré, un mélange qui représente le matériau utilisé pour la construction des greniers de stockage de céréales dans le Nord-Ouest du Bénin. Ceci montre que la décoction de néré augmente la résistance de l'érosion des blocs de terre. Cette amélioration peut s'expliquer par l'existence des tanins dans la décoction de néré (SORGHO et al., 2016). Les tanins contenus dans la décoction de néré forment des complexes de tannate de fer qui libèrent en solution des ions multivalents de fer. Ces ions métalliques possèdent une densité de charge si élevée qu'ils collent fortement les plaquettes d'argile entre elles rendant ainsi la terre moins sensible à l'eau (VISSAC et al., 2017). Selon la classification de WEISZ et al. (1995) cité par (MANGO-ITULAMYA, 2019), pour une profondeur de trou comprise entre 0 et 10 mm, le bloc est dit non érodable. Ces résultats

permettent de dire que les trois blocs formulés peuvent servir de matériau dans les constructions en terre et confirment scientifiquement l'excellente longévité des greniers en banco au Bénin.

1.2.4. Conductivité thermique

Les éprouvettes prismatiques de dimension $150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$ ont été soumises à la mesure de la conductivité thermique. Cette dernière a été faite par la méthode de plaque chaude gardée sur les trois mélanges 0-0, 2-0 et 2-6. Les résultats sont présentés sur la figure III.11.

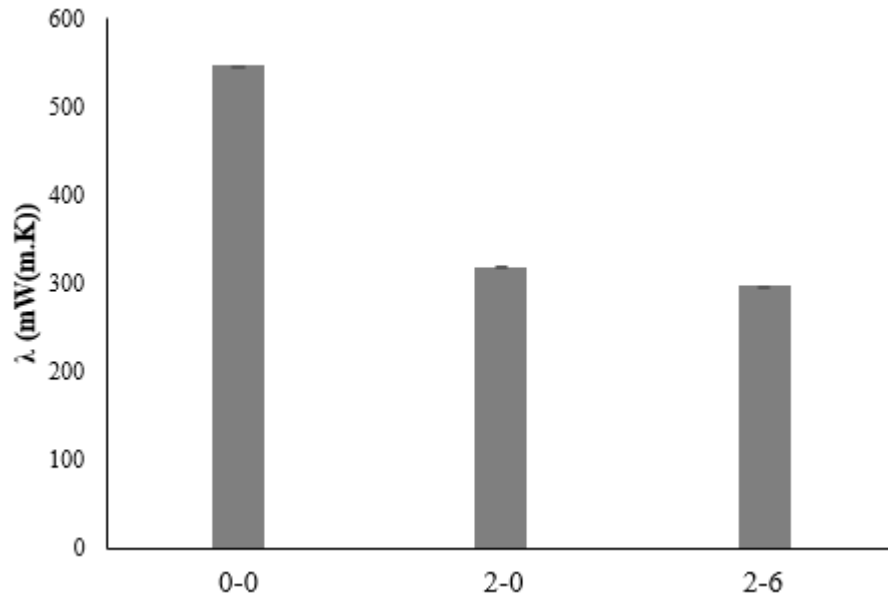


Figure III.11: Conductivité thermique des composites

Les conductivités thermiques mesurées sur les trois compositions 0-0, 2-0 et 2-6 sont respectivement égales à 547, 318 et 297 mW/(m.K). Le mélange de référence a la plus grande valeur de conductivité thermique. Le mélange 2-6 composé de terre, de 2% de paille de riz et 6% de décoction de néré enregistre la plus faible valeur de conductivité thermique. Cette valeur se rapproche de celle mesurée pour le mélange 2-0. Cette faible différence peut se justifier par les masses volumiques sèches des deux mélanges qui sont également proches. En effet, plusieurs travaux dans la littérature ont montré que la conductivité thermique dépend de la masse volumique sèche du matériau (LABOREL-PRENERON et al., 2018 ; PHUNG, 2018).

La conductivité thermique diminue avec l'ajout de paille de riz ce qui est dû à la faible densité des tiges de paille de riz (52 kg/m^3) d'une part et à leur faible conductivité thermique (57 mW/(m.K)) d'autre part. En effet, l'introduction des pailles de riz favorise un volume de porosité intergranulaire plus important induisant ainsi une conductivité thermique plus faible. Les travaux de LABOREL-PRENERON et al. (2018) portant sur l'effet de l'ajout de granulats biosourcés sur les propriétés hygrothermiques des briques de terre ont montré une diminution de la conductivité thermique avec l'ajout des granulats végétaux dans la terre argileuse.

Par ailleurs, la diminution de la conductivité thermique observée avec l'ajout de la décoction de néré en plus de la paille pourrait se justifier par la réduction de la teneur en eau du matériau qu'induit l'introduction de la décoction de néré. Le tableau III.4 présentant les paramètres physiques des mélanges étudiés le montre aisément. En effet, cette diminution de la

conductivité thermique observée avec la décoction de néré pourrait se justifier par l'évaporation de l'eau qui est ensuite remplacée par de l'air, l'air ayant une conductivité thermique (0,025 W/(m.K)) beaucoup plus faible que l'eau (0,6 W/(m.k)) (HIBOUCHE, 2013 ; TANG, 2005). Les travaux de (PHUNG, 2018) portant sur la stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux a mesuré la conductivité thermique à différente teneur en eau. Ces résultats ont également montré que la diminution des teneurs en eau engendre une diminution de la conductivité thermique du matériau.

Tableau III.4 : Paramètres physiques des mélanges

Compositions	ρ_d (g/cm ³)	λ (mW/(m.K))
0-0	1984	547 ± 23
2-0	1846	318 ± 17
2-6	1826	297 ± 16

En considérant l'ensemble des résultats obtenus durant cette première partie, nous avons décidé de retenir le mélange 2-6 (2% de paille de riz et 6% de décoction de néré) pour la fabrication des entrevous qui feront l'objet de la deuxième partie de ce chapitre.

2. ETUDE DES ENTREVOUS FABRIQUES EN COMPOSITE TERRE - PAILLE

2.1. Présentation des différents types d'entrevous

On désigne par entrevous, le bloc creux ou le matériau isolant disposé entre les poutrelles préfabriquées lors de la réalisation de planchers semi préfabriqués. Il constitue un coffrage perdu de la dalle de compression pouvant contribuer à l'isolation thermique.

La norme NF EN 15037-3+A1 (2011) désigne les entrevous comme des éléments intercalaires aux poutrelles sur lesquels ils s'appuient sans intervention de dispositif extérieur. Les entrevous sont généralement en béton, en terre cuite, en polystyrène ou autres matériaux. Dans les anciennes constructions, l'espace situé entre deux solives d'un plancher en bois est aussi appelé entrevous (IDRISSOU AFFO, 1997).

Selon les dénominations françaises, il existe quatre catégories d'entrevous: les entrevous de coffrage simples, les entrevous de coffrage résistants, les entrevous porteurs simples et les entrevous porteurs à table de compression incorporée. De plus, selon la dénomination de la norme NF EN 15037-3+A1 (2011), il existe des entrevous non résistants (LNR), les entrevous faiblement résistants (NR), les entrevous semi-résistants (SR) et les entrevous résistants (RR). Ces différents types d'entrevous sont présentés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Les différents types d'entrevous

		Dénominations selon la NF EN 15037-3+A1			
		Entrevous non résistant (LNR)	Entrevous faiblement résistant (NR)	Entrevous semi-résistant (SR)	Entrevous résistant (RR)
Dénominations françaises	Entrevous de coffrage simple	x	x		
	Entrevous de coffrage résistant			x	
	Entrevous porteur simple				x
	Entrevous porteur à table de compression incorporée				x

Selon la norme EN 15037-3+A1 (2011), une résistance minimale au poinçonnement-flexion est exigée pour chaque type d'entrevous. Les valeurs de ces résistances minimales sont données dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Résistances minimales des entrevous au poinçonnement-flexion

Type d'entrevous	Résistance minimale au poinçonnement-flexion (daN)
LNR	70
NR	150
SR	200
RR	250

Suivant leur résistance, on distingue les différents types d'entrevous suivants.

Entrevous de coffrages simple:

Ces types d'entrevous sont généralement utilisés sur vide sanitaire ou pour des locaux non habités. Ils ne peuvent pas être utilisés entre deux niveaux de logement et encore moins entre deux logements différents. Leur matière et leur mise en œuvre ne permettent pas de poser de sous plafond et ils ne répondent pas aux normes en matière d'isolation acoustique et de sécurité incendie. Ces entrevous n'assurent pas de fonction mécanique dans le système de plancher fini, ils font juste office de coffrage pendant la construction du système de plancher. Dans cette catégorie d'entrevous, on retrouve les entrevous en matériaux de synthèse, les entrevous en bois moulés et les entrevous en polystyrène.

Entrevous de coffrage résistants:

Les entrevous de coffrage sont dits résistants s'ils sont en béton ou en terre cuite et s'ils répondent aux spécifications les concernant définies dans la norme EN 15037-3+A1 (2011). Ces entrevous peuvent être pris en compte dans certaines vérifications (moments fléchissants, efforts tranchants, etc...).

Entrevous porteurs simples:

Ce sont des entrevous généralement utilisés pour des locaux habités et qui participent au transfert de charges vers les poutrelles. Ces entrevous sont en matériaux divers généralement légers (polystyrène expansé, particules ou fibres de bois agglomérées et moulées ou découpées, par exemple) ou en béton de masse volumique assez faible (béton cellulaire ou béton de granulats légers, par exemple). Ces entrevous peuvent contribuer à la résistance définitive avec le béton coulé en place mais leur paroi supérieure seule ne peut agir comme une dalle de compression dans le système de plancher fini.

Entrevous porteurs à table de compression incorporée:

Ce sont des entrevous qui permettent par leur forme et leurs caractéristiques mécaniques de reporter la totalité des charges d'exploitation sur les poutrelles et de résister aux actions locales. Il s'agit également des entrevous porteurs dont la paroi supérieure, obligatoirement jointoyée, est prise en compte dans la table de compression du plancher.

Il existe en général deux formes d'entrevous:

- Les entrevous traditionnels à base plate fonctionnant par adhérence à la dalle de compression et aux poutrelles (figure III.12). Cette forme est utilisée dans la réalisation des planchers à corps creux et à poutrelles.

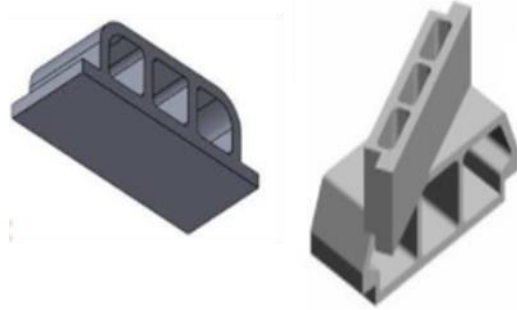


Figure III.12: Entrevous traditionnels

- Les entrevous à becquet ou à crochet dont le système de fonctionnement est par accrochage aux poutrelles et par adhérence à la dalle de compression (figure III.13). Il existe, dans cette famille, les entrevous à languettes qui passent sous la poutrelle pour l'isoler.



Figure III.13: Entrevous à becquet (a) ou à languette (b)

2.2. Fabrication des entrevous à base de composite terre-paille de riz

Deux types d'entrevous ont été fabriqués dans cette étude. La figure III.14 montre leur géométrie et leurs dimensions. Leurs dimensions sont de $15 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ et $15 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$. Les deux types d'entrevous ont la même hauteur (15 cm) et la même largeur (20 cm) mais des longueurs et des nombres de réservation différents : 2 réservations pour l'entrevous de longueur 40 cm et 3 pour celui de longueur 50 cm.

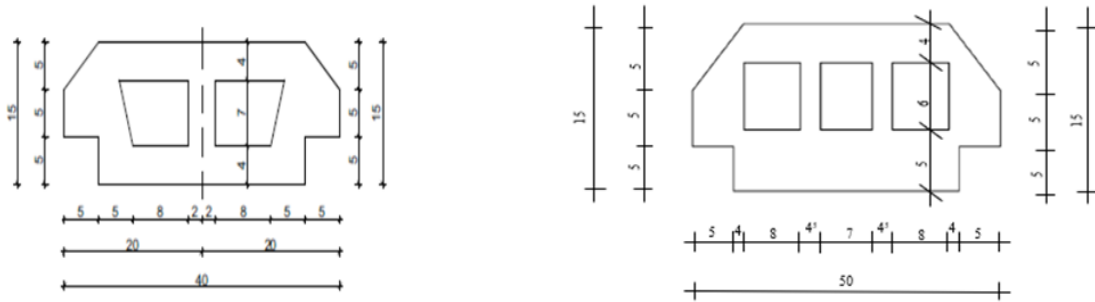


Figure III.14 : Les entrevous mis au point

Les entrevous ont été confectionnés suivant la formulation 2-6 développée dans le paragraphe précédent avec une teneur en eau $w = 17,1\%$ et $\gamma_d = 1.87 \text{ g/cm}^3$ pour 2% de tiges de paille de riz et 6% de décoction de néré.

Les quantités des constituants pour la confection des entrevous ont été déterminées suivant les équations suivantes :

$$M_{th} = \frac{V_{moule}(100+w)\gamma_d}{100}$$

$$M_{te} = \frac{\gamma_d * V_{moule}(100+w)}{100} - \gamma_d * V_{moule}$$

$$M_{th} = M_s + M_{déc} + M_p + M_{eau}$$

$$M_{te} = M_{déc} + M_{eau}$$

Avec M_{th} : masse totale humide de matériaux, M_{te} : masse totale d'eau, M_s : masse de sol argileux, $M_{déc}$: masse de décoction de néré, M_p : masse de tiges de paille de riz et M_{eau} : masse d'eau.

Les quantités de matériaux utilisés pour les deux types d'entrevous sont données dans le tableau III.7.

Tableau III.7: Quantités de matériaux utilisées pour les entrevous

Matériaux	15*20*50 cm ³	15*20*40 cm ³
Masse de sol argileux (g)	15125	14667
Masse de décoction de néré (g)	908	880
Masse de tiges de paille de riz (g)	303	293
Masse de l'eau (g)	1731	16781

Les entrevous ont été confectionnés à l'Université d'Abomey Calavi au Bénin. Le mélange est préparé avec la quantité totale d'eau et de décoction de néré, 24h avant le jour de la confection et stocké dans du sac plastique hermétiquement fermé. Les différentes étapes de fabrication de ces entrevous sont décrites dans ce qui suit.

❖ Le moulage

Le moule est au préalable préparé en enroulant les alvéoles des moules de sacs plastiques et en humidifiant l'intérieur du moule. En effet, le démoulage du matériau argileux sans un système mécanique est quasi impossible et la présence du sac plastique facilite le démoulage. Le moule est rempli en trois fois avec le mélange préparé la veille. Le moule avec le matériau est soulevé à une hauteur d'environ 50 cm et laissé tomber en chute libre pour tasser le mélange. Le matériau est ensuite compacté à l'aide d'une tige en bois à raison de 25 coups par couche. A la fin, on fait le surfacage comme montré sur la figure III.15.



Figure III.15: Le moulage des entrevous

❖ Le démoulage

Le moule est renversé et le corps du moule est retiré en appuyant délicatement sur la plaque des alvéoles (figure III.16). Les alvéoles sont ensuite retirées puis en dernier les sacs plastiques. Les mêmes opérations ont été faites pour la confection de neuf entrevous pour chacune des deux dimensions d'entrevous. Cette opération a duré 2 jours.



Figure III.16: Le démoulage des entrevous

❖ Le séchage

Une fois démoulés, les entrevous ont été séchés naturellement à une température ambiante d'environ 30°C jusqu'à masse constante (figure III.17). Les faces ont été périodiquement retournées pour optimiser le séchage.



Figure III.17: Le séchage des entrevous

2.3. Procédures d'essais sur les entrevous

2.3.1. Mesures des dimensions des entrevous

La validation d'un entrevous mis au point passe par la mesure de leurs dimensions conformément à la norme EN 15037-3+A1 (2011). Pour chaque type d'entrevous, la largeur, la longueur et la hauteur sont mesurées sur 6 entrevous d'un lot d'entrevous.

La mesure de chaque dimension est prise deux fois sur le même entrevous suivant la procédure décrite sur la figure III.18.

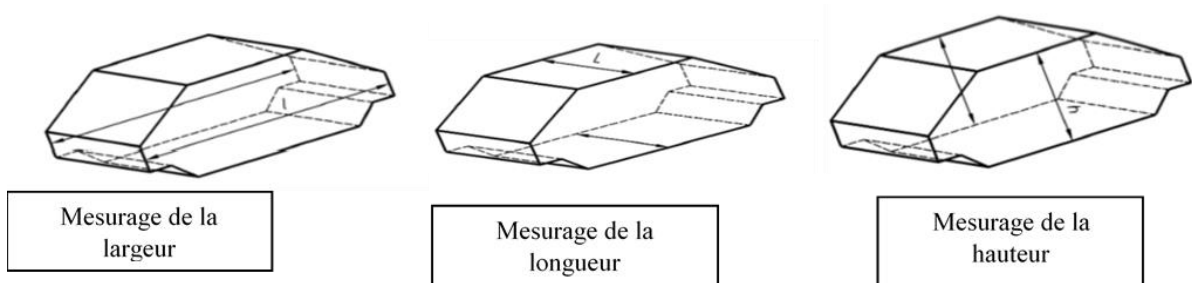


Figure III.18: Mesurage des dimensions

En dehors de ces dimensions, la largeur de la feuillure d'appui, l'épaisseur du becquet et l'épaisseur de la paroi supérieure des entrevous sont également mesurées.

Les mesurages réalisés sont comparés aux tolérances dimensionnelles des entrevous suivant la norme NF EN 15037-3+A1 (2011) données dans le tableau III.8.

Tableau III.8: Tolérances dimensionnelles des entrevous (NF EN 15037-3+A1, 2011)

Dimensions	Tolérance
Largeur de l'entrevous l et l_b	± 5 mm
Hauteur de l'entrevous h	$[-3$ mm ; $+7$ mm]
Hauteur au dessus du talon de la poutrelle h_t	± 5 mm
Longueur de l'entrevous L	$\pm \max [0.6 \% ; 5 \text{ mm}] \leq 12$ mm
Largeur du chanfrein I_c	± 10 mm
Hauteur de chanfrein h_c	± 5 mm
Largeur du becquet d'appui en partie supérieure I_n	± 3 mm
Hauteur du becquet d'appui h_n	$[-2$ mm ; $+4$ mm]
Largeur de la feuillure l_r	± 3 mm
Hauteur de la feuillure h_r	± 3 mm
Largeur de la languette l_t	± 5 mm
Hauteur (épaisseur) de la languette h_t	$[-3$ mm ; $+7$ mm]
Note Le fabricant peut déclarer des tolérances plus faibles.	

2.3.2. Essai de poinçonnement-flexion sur les entrevous

La résistance au poinçonnement-flexion déterminée suivant la norme NF EN 15037-3+A1 (2011) permet de classer les entrevous en fonction de la charge de rupture caractéristique obtenue lors de l'essai (tableau III.6). L'essai est réalisé sur 3 entrevous de chaque type.

Description du dispositif d'essai

L'essai de poinçonnement-flexion est réalisé par le biais du dispositif d'essai gravitaire présenté sur la figure III.18 suivant la norme (NF EN 15037-3+A1, 2011). Ces essais ont été réalisés à l'Université d'Abomey Calavi.

Le dispositif de poinçonnement-flexion sur entrevous permet d'appliquer, par l'intermédiaire d'une articulation, une charge ponctuelle sur une semelle disposée sur la partie supérieure du corps d'épreuve (figure III.19). La charge est assurée par une masse de chargement gravitaire disposée sur le corps d'épreuve et pouvant se déplacer librement dans le plan horizontal. La masse de chargement augmente de manière constante par alimentation régulière de matière (billes de plomb ou eau comme dans notre cas) jusqu'à la rupture du corps d'épreuve. Un cadre de charge permet de transmettre la charge sur la semelle. Un capteur de force en traction disposé entre la masse de chargement et le cadre de charge permet de mesurer la force gravitaire appliquée sur le corps d'épreuve.

Le cadre de charge est fabriqué en matériau léger et rigide afin de limiter la précharge de l'entrevous. Muni d'une tige, il permet d'appliquer la charge sur l'entrevous. La tige de chargement peut accueillir une bille de 20 mm de diamètre centrée à sa base. La rotation de cette bille est libre autour de cet axe comme autour de la semelle.

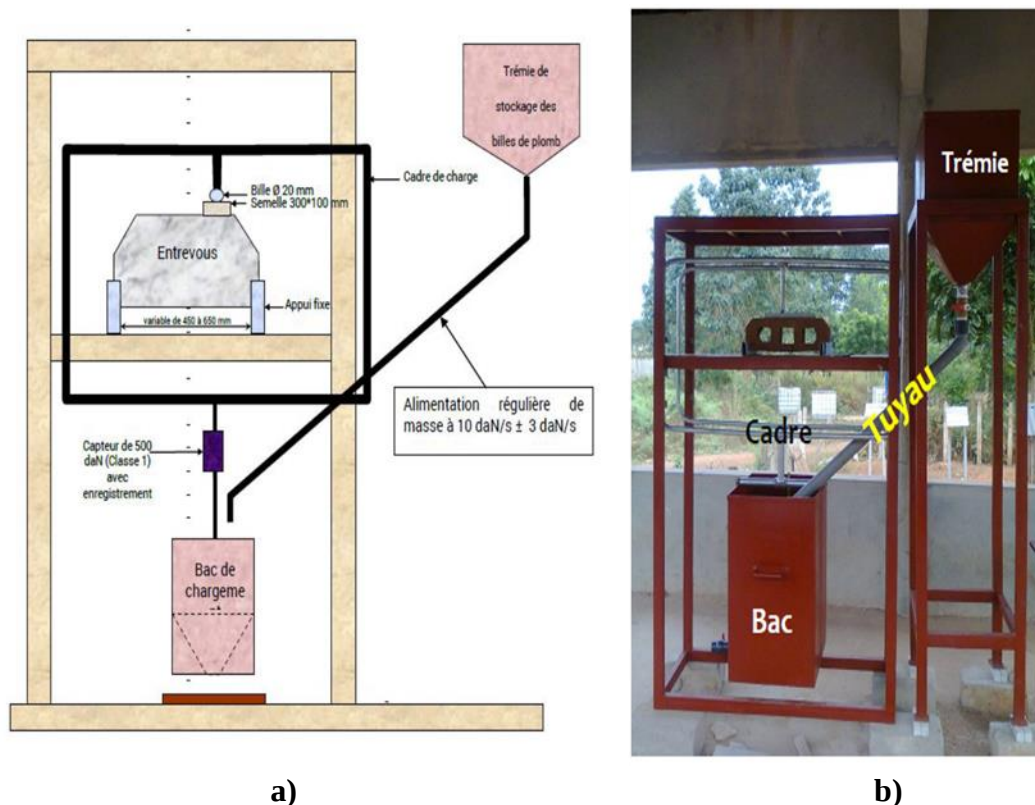


Figure III.19: (a) Schéma de face du dispositif d'essai (b) Photo du dispositif d'essai mis au point

Le bac de chargement rigide de capacité égale à 200 dm^3 pour une section de $5 \times 5 \text{ dm}^2$ est muni à sa base d'un cône de hauteur 20 cm permettant la vidange complète après essai. L'eau s'écoule dans le bac de chargement à partir d'une trémie de stockage.

Le tuyau d'alimentation d'eau permet le remplissage du bac par écoulement gravitaire, depuis la trémie de stockage, dans un tuyau de diamètre 63 mm incliné à 45° . A son ouverture, une vanne pointeau (sur raccord à 45°) permet d'actionner l'alimentation en eau dans le bac. La vitesse de chargement doit être de $10 \pm 3 \text{ daN/S}$ soit un débit d'eau de $10 \pm 3 \text{ l/s}$ quand il s'agit de l'eau comme c'est le cas pour cet essai.

La semelle plate permettant de charger l'entrevous est une plaque rectangulaire de dimensions $30 \times 10 \text{ cm}^2$ et de 25 mm d'épaisseur en bois dur ou métallique (figure III.20). Elle est munie d'une entaille conique à l'endroit de laquelle l'on applique la charge. Elle est posée sur l'entrevous et permet de simuler les pieds d'un ouvrier sur chantier.

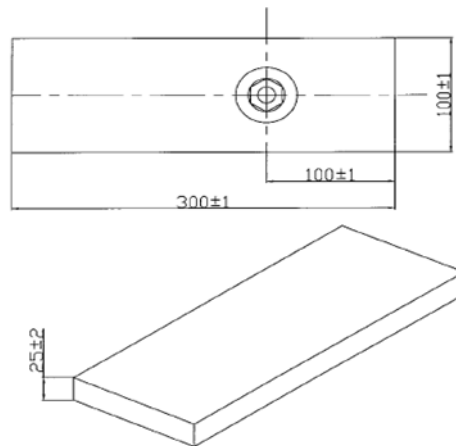


Figure III.20: Semelle plate de chargement de l'entrevous

La charge est appliquée sur l'entrevous à travers la semelle dont la position est donnée par la figure suivante figure III.21 (a). Cette position est définie comme étant la plus défavorable. Dans le sens longitudinal, l'axe du point d'application ne se situera pas à une distance inférieure à $l_1=18$ cm de la rive de l'entrevous. Tandis que dans le sens transversal, la semelle est centrée sur l'entrevous.

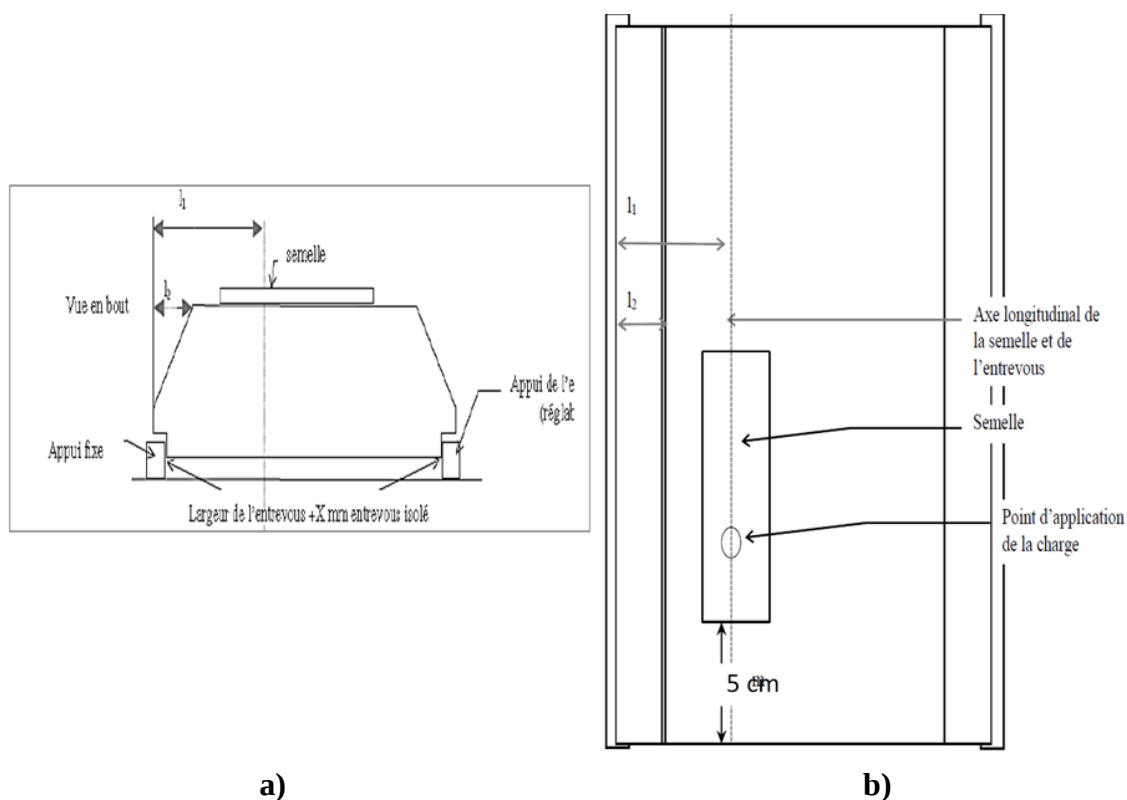


Figure III.21: (a) Positionnement longitudinal de la semelle (b) Positionnement transversal de la semelle

La trémie de stockage est remplie d'eau en maintenant la vanne dans la position fermée. Après avoir positionné l'entrevous sur le plateau, on positionne la semelle plate et le cadre de charge sur l'entrevous. L'application de la charge se fait ensuite par l'ouverture de la vanne et le remplissage du bac de chargement. A la rupture de l'éprouvette, la vanne est automatiquement

fermée et la lecture du niveau d'eau est faite sur la règle graduée située dans le bac de chargement.

La charge effective à la rupture est égale à la masse d'eau plus la précharge constituée par le bac de chargement et le cadre de charge. Le bac de chargement est complètement vidé à la fin de l'essai.

Expression des résultats

La résistance caractéristique au poinçonnement-flexion effective P_c pour chaque type d'entrevous est définie comme étant la moyenne des trois valeurs obtenues à la rupture de l'éprouvette lors de l'essai. Cette valeur calculée P_c est comparée à la valeur P_{RK} déclarée sur la base du tableau III.6. Il est à noter que les résultats individuels mesurés sur chaque entrevous lors de l'essai de poinçonnement-flexion doivent satisfaire à la condition suivante pour raison de sécurité : $P_i \geq 0.8 P_{RK}$.

2.3.3. Essai de compression longitudinale

La résistance en compression longitudinale est déterminée sur les entrevous résistants ou semi-résistants obtenus après l'essai de poinçonnement-flexion suivant la norme (NF EN 15037-3+A1, 2011) ou sur un corps d'épreuve découpés dans ces entrevous d'une hauteur $H \geq 170$ mm et d'une largeur $l \geq 200$ mm comme indiqué sur la figure III.22.

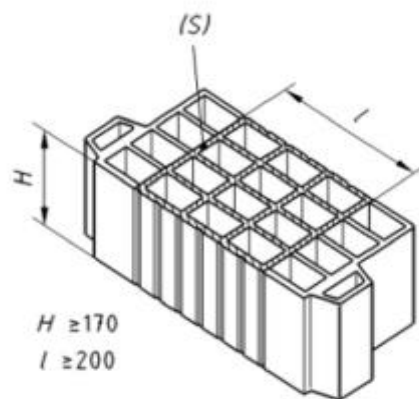


Figure III.22: Corps d'épreuve de l'essai de compression longitudinale

Dans le cas de nos entrevous, nous ne les avons pas découpés mais nous avons appliqué une charge uniformément répartie en plaçant une plaque rigide de répartition de dimensions $H = 17$ cm et $l = 20$ cm. La charge Q est appliquée comme représenté sur la figure III.23 à l'aide d'une presse IGM avec une vitesse de chargement égale à 0,2 MPa/s.



Figure III.23: Essai de compression longitudinale sur entrevous

La contrainte caractéristique à la compression longitudinale f_{bk} est déterminée en divisant la charge de rupture, Q_R , par l'aire nominale de la surface chargée et elle est exprimée à 0.1 MPa près selon la formule : $f_{bk} = \frac{Q_R}{S}$ avec $S = 200 \times 170 \text{ mm}^2$.

2.4. Résultats et discussions

2.4.1. Dimensions des entrevous

Le tableau III.9 récapitule les mesurages effectués sur les entrevous.

Tableau III.9: Dimensions des entrevous

Dimensions	150x200x400 mm	150x200x500 mm
Largeur de l'entrevous	391 ± 3	492 ± 2
Longueur de l'entrevous	193 ± 2	194 ± 3
Hauteur de l'entrevous	147 ± 3	147 ± 3
Largeur de la feuillure d'appui	45 ± 3	46 ± 2
Epaisseur du becquet	45 ± 3	44 ± 2
Epaisseur de la paroi supérieure de l'entrevous	35 ± 3	34 ± 3

Les dimensions mesurées sur les lots d'entrevous ne sont pas trop écartées. Ce premier contrôle dimensionnel sur des entrevous pris au hasard dans les familles d'entrevous se conforme aux tolérances et spécifications recommandées par la norme NF EN 15037-3+A1 (2011) présentées dans le tableau III.8. La conformité des entrevous dans le lot d'entrevous est importante pour une bonne organisation du système de plancher car elle intervient dans le monolithisme du plancher en maintenant l'ensemble entrevous et poutrelles en un seul bloc. Ceci s'avère impossible si les dimensions des entrevous sont trop dispersées.

2.4.2. Résistance au poinçonnement-flexion

L'essai de poinçonnement-flexion est le premier essai mécanique recommandé pour justifier du type d'entrevous mis au point. La figure III.24 présente la résistance au poinçonnement-flexion de chaque famille d'entrevous.

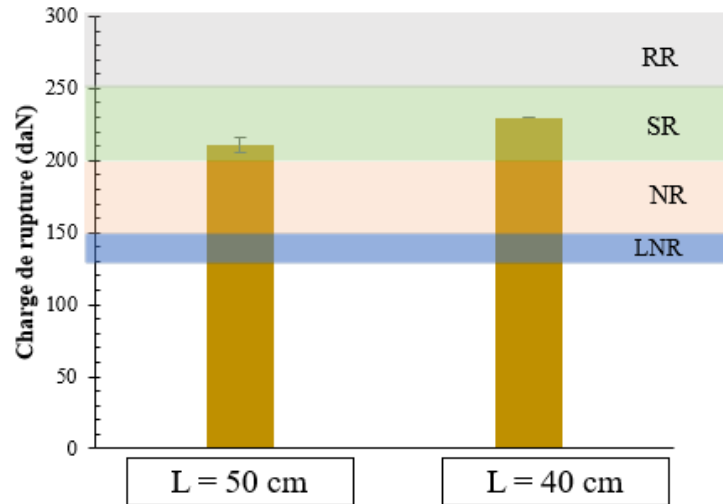


Figure III.24 : Résistance au poinçonnement-flexion des entrevous

La charge à la rupture moyenne est égale à $230 \text{ daN} \pm 5 \text{ daN}$ pour les entrevous de dimensions $15 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ contre $211 \pm 1 \text{ daN}$ pour ceux de dimensions $15 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$. La charge de rupture des entrevous de 40 cm est supérieure à celle de 50 cm. On peut, de plus, noter que la dispersion des résultats est relativement faible. Les deux familles d'entrevous présentent des résistances supérieures à 200 daN ce qui permet de les classer dans la famille des entrevous semi-résistants selon la norme NF EN 15037-3+A1 (2011). Avec de telles performances, ces entrevous pourront non seulement servir d'entrevous de coffrage mais ils pourront également reporter la totalité des charges d'exploitation sur les poutrelles et de résister aux actions locales.

2.4.3. Résistance en compression longitudinale

Les résistances en compression longitudinale des deux types d'entrevous sont présentées dans le tableau III.10.

Tableau III.10 : Résistance en compression longitudinale des entrevous

	Charge de rupture (N)	Résistance en compression longitudinale (MPa)
15*20*50	8605	0,25
	9810	0,29
	8180	0,24
15*20*40	10110	0,30
	11101	0,33
	10080	0,30

Comme c'était déjà le cas pour la résistance au poinçonnement-flexion, les résultats obtenus sont relativement peu dispersés. De plus, on nota à nouveau que les charges de rupture des entrevous de longueur 40 cm sont supérieures à celles des entrevous de longueur 50 cm. Cette amélioration est certainement due à la géométrie des entrevous et au nombre d'alvéoles car la paroi supérieure des deux types d'entrevous a la même épaisseur égale à 5 cm. Contrairement à la résistance au poinçonnement-flexion, il n'y a pas d'exigence particulière de la norme sur ces valeurs de résistances en compression longitudinale. Il s'agit juste d'une caractéristique mécanique que devra déclarer le fabricant.

3. CONCLUSION

La première partie de ce chapitre a porté sur la caractérisation du composite à base de terre, de paille de riz et de décoction destiné à être utilisé par la suite pour fabriquer des entrevous. L'origine de ce composite vient des formules de banco utilisées dans la construction traditionnelle des tatas somba et des greniers de stockage des céréales dans le nord du Bénin. Dans ces pratiques ancestrales, la décoction de néré est ajoutée pour améliorer la consistance des mélanges. Cet effet fluidifiant de la décoction a été observé durant des mesures d'indice de liquidité. Les mélanges confectionnés ont montré que l'ajout de tige de paille de riz et de décoction de néré permettait d'améliorer significativement les résistances en compression des mélanges. Pour la suite des essais, nous avons retenu des mélanges à 2% de paille de riz. Les essais de durabilité ont montré que l'ajout de paille de riz permet d'améliorer la résistance à l'abrasion et à l'érosion des mélanges ce qui va dans le sens de l'excellente longévité des greniers en banco dont certains ont plus de 50 ans. De plus, cet ajout de paille de riz diminue la masse volumique du composite ce qui le rend ainsi plus isolant. Ceci est un point positif car cela permettra d'obtenir des entrevous présentant une meilleure isolation thermique. L'ensemble des résultats obtenus durant cette première partie nous a conduit à retenir le mélange 2-6 (2% de paille de riz et 6% de décoction de néré) pour la fabrication des entrevous qui ont été étudiés dans la deuxième partie de ce chapitre.

Deux types d'entrevous ont été fabriqués à l'Université d'Abomey Calavi avec des géométries différentes : des entrevous de $15 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ ayant 2 alvéoles et des entrevous de $15 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$ ayant 3 alvéoles. Les dimensions des entrevous fabriqués entrent dans les tolérances recommandées par la norme. Deux caractéristiques mécaniques des entrevous ont été mesurées : la résistance à la compression longitudinale et la résistance au poinçonnement-flexion. Pour la première résistance, une simple presse suffit mais, pour la seconde, une presse spécifique a dû être fabriquée à l'UAC pour mesurer cette caractéristique qui est à la base de la caractérisation des entrevous. Les résultats obtenus ont montré que nous avons réussi à obtenir des entrevous semi-résistants ce qui est très encourageant. Le chapitre suivant va porter sur la conception, la fabrication et la caractérisation du second élément structurel de ce plancher à savoir les poutres en béton de terre armé de bois.

4. REFERENCES

- AMBARKA I. Caractéristiques physico-mécaniques du matériau banco et vérification de la résistance portante mécanique des greniers en terre dans le nord du Bénin. Mémoire d'ingénieur de conception en Génie Civil / Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Burkina Faso, 2010, p. 94.
- ASHOUR T., WU W. The influence of natural reinforcement fibers on erosion properties of earth plaster materials for straw bale buildings. *Journal of Building Appraisal* 5(4), 2010, 329-340.
- BABATOUNDE L. Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. Normandie Université, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2017.
- HIBOUCHE A. Sol traités aux liants : performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques : application en BTP. Thèse de doctorat de l'Université du Havre, 2013, p390.
- IDRISSOU AFFO A.R. Contribution à une meilleure utilisation des matériaux locaux dans l'habitation. Mémoire de fin de formation pour le D.I.T., Université Nationale du Bénin (UNB), College Polytechnique Universitaire (CPU), 1997, p.113.
- LABOREL-PRENERON A., AUBERT J.E., MAGNIONT C., MAILLARD P., POIRIER C. Effect of plant aggregates on the mechanical properties of earth bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29(12), 2017.
- LABOREL-PRENERON A., MAGNIONT C., AUBERT J.E. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy and buildings* 178 (2018) 265-278.
- LABOREL-PRENERON A., FARIA P., AUBERT J.E., MAGNIONT C. Assessment of durability of compressed earth-bioaggregate composites. *Recent Progress in Materials* 3(2), 2021.
- MANGO-ITULAMYA L.A. Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de doctorat, Université de Liège, 2019, p157.
- MILLOGO Y., MOREL J.C., AUBERT J.E., GHAVAMI K. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 2014, 71–78.
- MILLOGO Y., AUBERT J.E., HAMARD E., MOREL J.C. How properties of kenaf fibers from Burkina Faso contribute to the reinforcement of earth blocks. *Materials* 8, 2015, 2332-2345.
- NF EN 13286-53. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques. Association Française de Normalisation, 2005.

NF EN 15037-3+A1, Produits préfabriqués en béton - Systèmes de planchers à poutrelles et entrevous - Partie 3 : entrevous en terre cuite. Association Française de Normalisation, 2011.

NF P94-093. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation, 2014.

NZS 4298. Materials and workmanship for earth buildings. Building Code Compliance Document E2(AS2), 1998.

PHUNG T.A. Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge. Thèse de doctorat de Normandie Université, 2018.

TANG A.M. Temperature effect on the behaviour of engineered clay barriers. Sciences of the Universe, Ecole des Ponts ParisTech, 2005.

SORGHO B., BRESSOLLIER P., GUEL B., ZERBO L., OUEDRAOGO R., GOMINA M., BLANCHART P. Etude des propriétés mécaniques des géomatériaux argileux associant la décoction de *Parkia Biglobosa* (néré). Comptes Rendus Chimie 19, 2016, 895-901.

VISSAC A., BOURGES A., GANDREAU D., ANGER R., FONTAINE L. Argiles & biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre. 2017.

WEISZ A., KOBE A., Mc MANUS A.M., NATAATMADJA A. Durability of Mudbrick – Comparison of Three Test methods. In 4th Australasian Masonry Conference, Sydney, 1995, pp 249-258.

XP P13-901. Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Association Française de Normalisation, 2001.

Chapitre 4 : ETUDE DES POUTRES EN BETON DE TERRE ARME DE BOIS

SOMMAIRE

1.	MATERIAUX ET PROCEDURES.....	129
1.1.	Les matériaux	129
1.2.	Les procédures.....	133
2.	CARACTERISATION DES BETONS DE TERRE A L'ETAT FRAIS ET DURCI.....	139
2.1.	Caractéristique à l'état frais.....	139
2.2	Caractéristique à l'état durci.....	140
3.	ADHERENCE BOIS/BETON DE TERRE	143
4.	FLEXION 4 POINTS DES POUTRES DE BETON DE TERRE ARME DE BOIS.....	145
4.1.	Comportement théorique de poutres en béton armé sollicitées en flexion 4 points.....	145
4.2.	Modes de rupture des poutres de béton de terre armé testées.....	147
4.3.	Courbes effort flèche des poutres étudiées.....	150
5.	CONCLUSION.....	156
6.	REFERENCES.....	158

Le procédé original que nous proposons d'étudier dans cette thèse est composé d'entrevous que nous venons de caractériser dans le chapitre précédent et de poutrelles en béton armé. Ces poutrelles sont tout à fait innovantes car elles vont être fabriquées à partir de béton de terre et armées par des armatures en bois. Cette étude d'éléments en béton de terre armé d'armatures en bois est tout à fait originale et n'a jamais été réalisée auparavant d'après nos recherches bibliographiques. A ce titre, les recherches effectuées dans cette partie, que ce soit pour la formulation des bétons ou pour l'étude en flexion des poutrelles armées, sont essentiellement exploratoires et doivent surtout permettre de faire la démonstration d'une preuve de concept.

Ce chapitre est divisé en quatre grandes parties.

Dans la première partie, nous présenterons les matériaux et les procédures utilisés pour les essais relatifs à ce chapitre. Nous verrons que des problèmes d'approvisionnement de matériaux en provenance du Bénin nous ont obligés à nous adapter autrement en utilisant des matériaux alternatifs à ceux prévus initialement.

La seconde partie portera sur l'étude des caractéristiques des bétons formulés. Pour la formule de base des bétons, nous avons décidé de poursuivre avec un matériau similaire au composite utilisé dans le chapitre précédent par souci de cohérence (à savoir un mélange de terre et de paille de riz), seul un nouveau fluidifiant a dû être utilisé pour pallier les problèmes de livraison des graines de néré.

Les troisième et quatrième parties seront dédiées à l'étude des propriétés mécaniques d'éléments en béton de terre armé de bois. Dans la troisième partie, nous travaillerons sur des matériaux modèles constitués d'une seule armature de bois noyée dans un cube de béton de terre et nous étudierons les propriétés d'adhérence entre le béton et l'armature. Dans la quatrième partie, nous étudierons des modèles réduits de poutrelles de béton de terre armé d'armatures longitudinales en bois. Ces poutrelles auront des dimensions réduites permettant de les étudier « facilement » en laboratoire (15 x 15 x 60 cm³).

1. MATERIAUX ET PROCEDURES

1.1. Les matériaux

1.1.1. Les constituants du béton de terre et les armatures en bois

Pour cette partie de l'étude, la terre Bouisset a été utilisée à la place de la terre de barre du Bénin initialement prévue. En effet, cette partie de l'étude nécessite des quantités importantes de terre et il nous a été impossible de faire venir autant de terre du Bénin comme nous l'avions fait pour la première partie de cette étude. La caractérisation des deux terres réalisée dans le chapitre 2 de cette thèse a montré que ces deux terres étaient très proches du point de vue des propriétés qui ont été comparées.

Pour certaines formulations de béton de terre, nous avons ajouté des granulats à béton (sable 0/4 et gravier 4/10) à la terre de Bouisset. Ces granulats sont des granulats siliceux roulés alluvionnaires provenant du lit de la Garonne et utilisés au LMDC pour les séances de Travaux Pratiques de « ciments et bétons » et pour la confection de bétons classiques pour des activités de recherche. Les courbes granulométriques de ces deux granulats sont présentées sur la figure IV.1. Les masses volumiques réelles du sable et du gravier sont égales respectivement à 2,65 t/m³ et 2,66 t/m³. Ces données (granulaires et de masse volumique réelle) ont été données par le fournisseur dans la fiche technique de ces granulats.

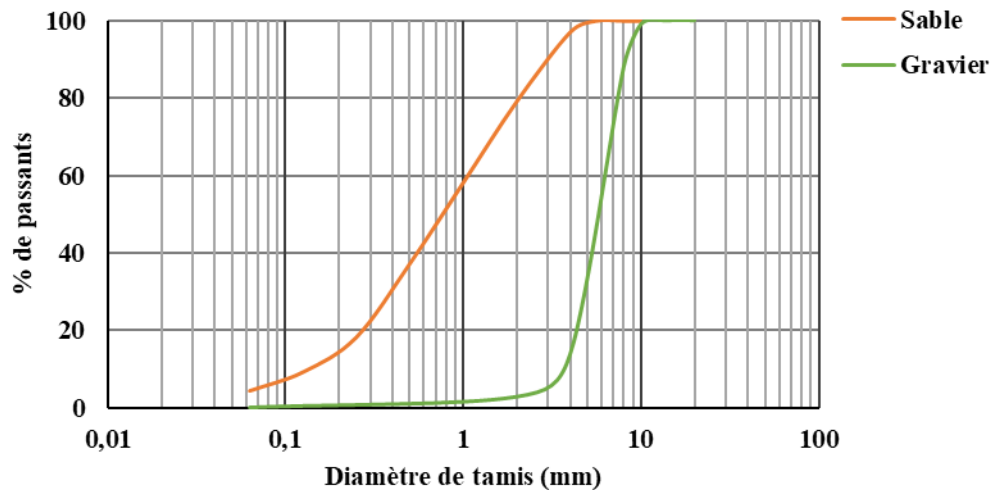


Figure IV.1 : Courbes granulométriques du sable 0/4 et du gravier 4/10 de Garonne

Pour permettre d'améliorer la consistance des bétons sans ajouter trop d'eau, nous avons ajouté pour certains mélanges de l'hexamétophosphate (HMP) de sodium en remplacement de la décoction de néré utilisée dans la première partie de l'étude. Comme mentionné plus haut, il nous fallait aussi les graines de néré en quantité importante et à cause de problème d'acheminement des matériaux en provenance du Bénin, nous avons jugé bon d'utiliser l'HMP en lieu et place de la décoction de néré pour réduire la quantité d'eau à ajouter et améliorer la maniabilité du béton de terre comme le fait la décoction de néré.

Pour les armatures en bois, nous avons eu les mêmes problèmes d'approvisionnement et nous avons décidé de remplacer le rônier initialement prévu pour cette étude par du pin acheté dans un magasin de bricolage en France en barres de 14 x 14 x 2400 mm³. Il est difficile d'avoir des informations techniques détaillées sur ce genre de produit et c'est la raison pour laquelle nous avons caractérisé en laboratoire ce matériau pourtant bien connu (voir chapitre 2). Ces barres ont été sciées aux longueurs nécessaires en fonction de l'essai envisagé et nous avons cherché à modifier leur aspect de surface pour les rendre plus rugueuses. Deux traitements ont été appliqués :

- des « crénelures » qui ont été faites avec un ciseau à bois et qui consistent en des rayures de 2-3 mm de profondeur faites environ tous les centimètres,
- des « trous » faits avec une perceuse sur colonne d'environ 3 mm de profondeur, de 5 mm de diamètre séparés les uns des autres d'une distance de 3 mm environ.

Les crénelures et les trous ont été faits sur les quatre côtés de l'armature (voir figure IV.2).

A la fin de la thèse, nous avons pu nous faire envoyer quelques morceaux de rônier pour pouvoir établir des premières comparaisons avec le pin. Le rônier a été caractérisé (voir chapitre 2) et des armatures ont été préparées. Le rônier est arrivé en France sous forme de lattes de dimensions 3 x 10 x 60 cm. Ces lattes ont été ensuite sciées pour avoir des armatures de section carrée de 14 x 14 mm pour une longueur de 60 cm. Par contre, par manque de temps (fortement lié au début de la crise sanitaire) et de matériau, nous n'avons pu étudier que le rônier lisse et nous n'avons pas pu tester des échantillons « crénelés » ou « troués » sur cette essence de bois.

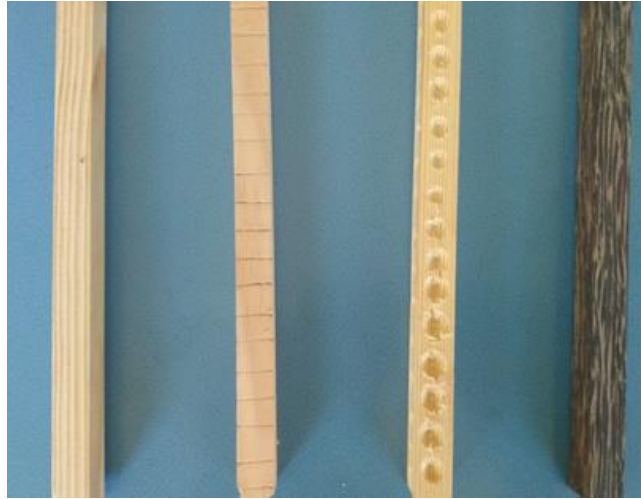


Figure IV.2 : Les différents types d'armatures en bois utilisées : pin lisse, pin crénelé, pin troué et rônier lisse (de gauche à droite)

1.1.2. Formulation des bétons de terre

Dans cette partie de notre travail, nous avons manqué de temps notamment à cause des problèmes d'approvisionnement en matériaux auxquels nous avons dû faire face puis, quelques mois plus tard, à cause du début de la crise sanitaire. Nous avons dû faire preuve de pragmatisme et nous n'avons pas pu tester autant de formulations de béton que nous aurions voulu. Nous n'avons pas du tout optimisé les formules, l'objectif étant de démontrer avant tout la faisabilité de fabriquer des éléments en béton de terre armé de bois. Le béton de terre à formuler doit être suffisamment fluide pour pouvoir correctement remplir un moule avec des armatures en bois. Pour l'ensemble des bétons que nous avons testés, nous avons cherché à obtenir un béton de consistance S2 c'est-à-dire ayant un affaissement au cône d'Abrams compris entre 5 et 9 cm. En effet, les poutrelles et la dalle de compression du système constructif considéré dans la présente étude sont des éléments structuraux de faibles dimensions transversales avec une plus ou moins grande densité d'armatures.

En parallèle de ce critère de consistance, le béton ne doit pas subir un retrait trop important et il doit avoir une résistance en compression suffisante. Ces deux critères auront des conséquences sur la quantité d'eau ajoutée ainsi que sur la teneur en argile du béton. Plus on ajoutera d'eau, plus le retrait sera important. Plus la quantité d'argile sera importante et plus les résistances en compression seront importantes mais plus le retrait risque d'être élevé. Nous avons donc cherché à obtenir un bon équilibre entre ces différentes contraintes sachant que nous n'avons pas pu optimiser la formule.

Ainsi, cinq formulations ont été testées :

- La composition C1 ne contient que de la terre et de l'eau. Nous avons testé cette formule afin de voir s'il était possible de faire un béton de terre avec la terre de Bouisset seule.
- La composition C2 est la même composition que C1 dans laquelle nous avons ajouté 1% de paille de riz notamment pour chercher à réduire le retrait important de cette formule.
- La composition C3 a été calculée pour se rapprocher au mieux de la courbe granulométrique « idéale » d'un pisé (figure IV.3) partant du principe que ces deux matériaux, s'ils ont des mises en place différentes, devraient avoir des caractéristiques

mécaniques comparables avec un squelette granulaire équivalent. Un mélange contenant 50% de terre, 30% de gravier 4/10 et 20% de sable 0/4 entre dans ce fuseau.

- La composition C4 est la même composition que C2 dans laquelle nous avons ajouté 1% d'HMP ce qui a permis de diminuer la quantité d'eau. Le dosage en HMP n'a pas été du tout optimisé et la quantité ajoutée est relativement importante en comparaison avec d'autres études récentes sur l'utilisation de ce fluidifiant dans les matériaux en terre (GUIHENEUF, 2020). Il serait sans doute possible de réduire la quantité d'HMP ajoutée au béton de terre dans un travail ultérieur d'optimisation.
- La composition C5 est la même que la composition C3 dans laquelle nous avons ajoutée 1% d'HMP afin de réduire la quantité d'eau ajoutée à cette formule.

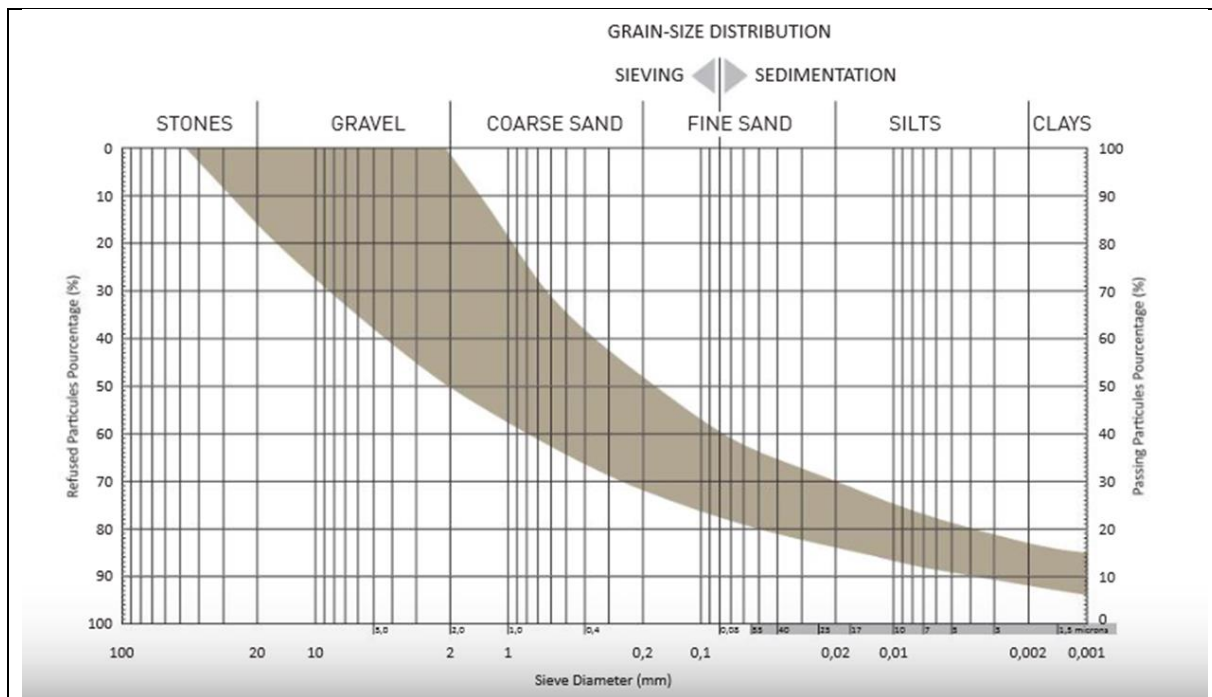


Figure IV.3: Fuseau granulométrique recommandé pour un pisé (HOUBEN et GUILLAUD, 2006)

Le tableau IV.1 présente les quantités de matériaux utilisés pour les cinq compositions.

Tableau IV.1: Compositions des bétons de terre étudiés

Désignation	Terre (g)	Sable (g)	Gravier (g)	Eau (g)	HMP (g)	Paille (g)
C1	1596	0	0	604	0	0
C2	1542	0	0	638	0	15
C3	859	344	516	511	0	0
C4	1566	0	0	352	16	16
C5	922	369	554	330	18	18

1.1.2. Présentation des différents éléments de béton de terre armé de bois testés

Les résultats obtenus sur les 5 compositions de béton vont conduire à ne retenir qu'une seule formule de béton pour la suite de l'étude. Deux types d'éléments en béton de terre armé de bois vont être étudiés :

- des poutres ($15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$) avec deux armatures longitudinales en bois qui seront testées en flexion 4 points,
- des cubes ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) dans lesquels sera noyée au centre de l'éprouvette une armature en bois pour des mesures d'adhérence.

Le tableau IV.2 présente les différents systèmes étudiés avec leur nomenclature.

Tableau IV.2 : Présentation des différents éléments de béton de terre armé de bois testés

Béton	Armatures	Blocage	Poutres	Cubes « adhérence »
Sans HMP	Sans armatures	Sans blocage	P-NAshmp	
			P-NAahmp	
Avec HMP	Pin lisse		P-PL	C-PL
	Pin crénelé		P-PC	C-PC
	Pin troué		P-PT	C-PT
	Rônier lisse		P-RL	C-RL
	Pin lisse	Avec blocage	P-PLB	
	Rônier lisse		P-RLB	

1.2. Les procédures

1.2.1. Malaxage, préparation des éprouvettes et essais sur béton de terre à l'état frais

Pour chaque formulation de béton, la quantité d'eau est ajoutée en deux fois. La moitié de l'eau est ajoutée la veille de chaque coulage aux matériaux secs qui sont malaxés puis le mélange humide est conservé dans un sac étanche jusqu'au lendemain (environ 12 heures de temps de conservation). Cette moitié d'eau de gâchage contient la totalité de l'HMP ajouté quand il en est fait usage. Le jour du coulage, les constituants humides et le restant d'eau sont malaxés dans un malaxeur de type PH Digy de 12 L (voir figure IV.4). Le malaxage se fait pendant 5 minutes de la première à la quatrième vitesse du batteur. Après les 5 minutes de malaxage, les essais d'affaissement au cône sont effectués (figure IV.5). Le béton est ensuite placé dans les moules en deux couches (cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ pour les essais de compression et d'adhérence ou $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$ pour les poutres) et il est vibré sur une table vibrante.



Figure IV.4: Malaxeur PH Digy



Figure IV.5: Essai d'affaissement

L'affaissement au cône d'Abrams du béton a été mesuré suivant la norme NF EN 12 350-2 (2012) (figure IV.2). Le cône d'Abrams, une fois fixé sur la plaque, est rempli avec du béton de terre en trois fois. Chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige. Le cône est ensuite arasé et levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler. L'affaissement du béton frais est alors mesuré. L'affaissement du béton de terre visé doit être compris entre 5 et 9 cm, pour les raisons, évoquées ci-dessus. Selon la classification de la norme NF EN 206 (2014), il s'agit d'un béton plastique pouvant être utilisé pour un béton armé normal placé avec vibration.

La masse volumique du béton frais a également été mesurée suivant la norme NF EN 12 350-6 (2019). La face interne du récipient utilisé pour la mesure d'air occlus (8 L) est légèrement humidifiée puis le récipient est pesé et rempli du béton frais. Le béton est vibré en deux couches en utilisant une table vibrante. Le bord de la face externe du pot est nettoyé après avoir lissé la surface avec une truelle et arasé le béton au niveau du bord supérieur du pot à l'aide d'une règle métallique. La masse du béton frais est alors déterminée par pesée.

Après le coulage, les bétons sont mis à l'étuve à 50°C et ils sont démoulés 2 jours après en dévissant le moule. Les éprouvettes sont ensuite remises à l'étuve à 50°C jusqu'à ce qu'elles soient sèches. En fonction de la dimension des éprouvettes, la cure dure une quinzaine de jours. A titre d'exemple, la courbe de séchage des poutres et des éprouvettes cubiques du béton de compositions C4 (terre + 1% HMP + 1% paille) sont présentées sur la figure IV.6. Après leur séchage à 50°C, les éprouvettes sont ensuite conservées dans une salle de conservation à une température de 20°C et une humidité relative de 50% jusqu'à masse constante avant de réaliser les essais mécaniques.

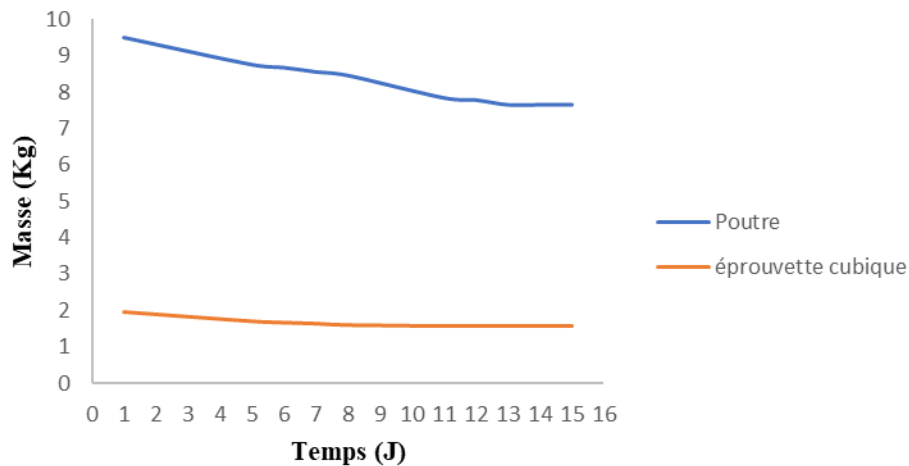


Figure IV.6 : Exemple d'une courbe de séchage pour la composition C4 (Terre + 1% HMP + 1% paille)

1.2.2. Préparation et coulage des éléments de béton de terre armé de bois

Epreuves cubiques pour essais d'adhérence

Deux types d'essais ont été réalisés pour mesurer l'adhérence des armatures en bois dans le béton de terre :

- des éprouvettes cubiques de 10 cm avec une armature de 15 cm noyée au centre de l'éprouvette sont fabriquées. L'essai d'adhérence consiste à appliquer une force de compression sur l'armature (schéma de droite de la figure IV.7),
- des éprouvettes cubiques de 10 cm avec une armature de 30 cm noyée au centre de l'éprouvette sont fabriquées. L'essai d'adhérence consiste à suspendre des poids à l'armature pour appliquer un effort de traction (schéma de gauche de la figure IV.7).

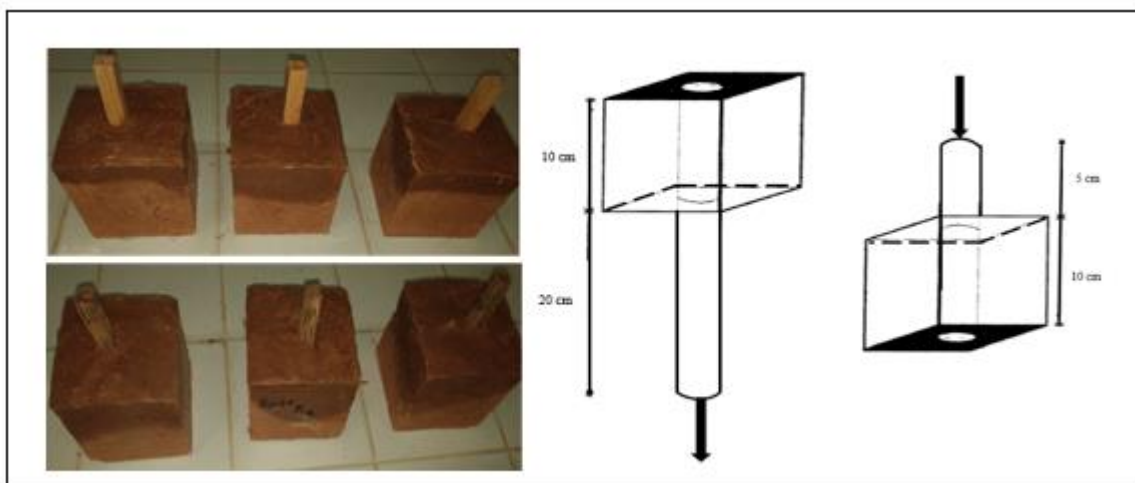


Figure IV.7 : Principes des essais d'adhérence sur éprouvettes cubiques

Poutres

Les poutres fabriquées sont longues de 60 cm, avec une section de 15 cm de largeur et de 15 cm de hauteur (figure IV.8). La portée de l'essai de flexion 4 points est de 45 cm. En dehors de la poutre témoin qui est sans armatures, toutes les poutres ont été armées au bois pin ou rônier.

Ainsi, afin d'étudier l'influence des taux de renforcement des armatures tendues sur l'efficacité du béton de terre, deux armatures longitudinales en bois, ayant chacune une section de $14 \times 14 \text{ mm}^2$ sont disposées en partie tendue de la poutre. Aucune armature n'a été mise dans la zone comprimée. Les armatures sont fixées longitudinalement dans le moule avec un enrobage de 3 cm.

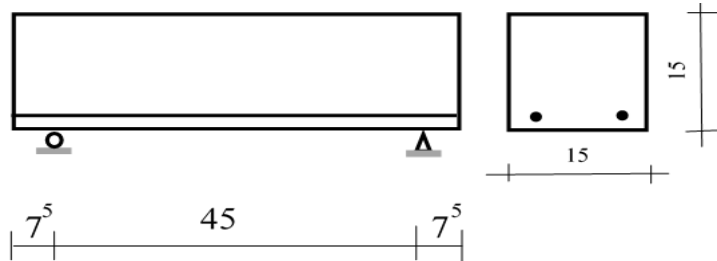


Figure IV.8 : Dimensions des poutres et positionnement des armatures en bois

La figure IV.9 présente des photographies des moules en bois utilisés pour le coulage.



Figure IV.9: Préparation des moules des poutres en béton de terre armé de bois

Certains essais ont été réalisés avec des extrémités bloquées (tableau IV.2). Pour cela, les armatures en bois sont vissées dans une plaque en bois (qui sert aussi de coffrage) et qui n'est pas retirée durant le séchage et l'essai de flexion 4 points (figure IV.10).



Figure IV.10: Poutres aux extrémités libres et aux extrémités bloquées

1.2.3. Essai de compression sur les bétons de terre

Les éprouvettes cubiques après séchage jusqu'à masse constante ont été soumises à l'essai de compression simple. L'essai a été réalisé avec une presse hydraulique IGM équipée d'un capteur de force de 50 kN et d'un capteur de déplacement, à une vitesse de 0,2 kN/s. La face latérale de l'éprouvette cubique de dimension 10 x10 cm est placée entre deux plateaux sans un système spécifique d'antifretage.

1.2.4. Essais d'adhérence bois/béton de terre

L'évaluation de l'adhérence a été faite suivant deux méthodes.

La première consiste à appliquer un effort de compression sur l'armature située au centre de l'éprouvette cubique. Pour permettre à l'armature de glisser, l'éprouvette cubique est positionnée sur deux supports laisser sortir l'armature par le bas sous la sollicitation de compression (photographie de droite de la figure IV.11). L'effort de compression exercé entraîne l'arrachement de l'armature du béton de terre et l'effort d'adhérence est ainsi évalué. L'essai a été conduit avec un capteur de force d'une capacité de 50 kN à une vitesse de chargement de 0,2 kN/s.

La seconde méthode consiste à exercer un effort de traction directement sur l'armature noyée dans une éprouvette cubique de 10 cm. Cette méthode s'apparente aux travaux de FOUDJET et FOMO (1995) sur l'étude de l'adhérence entre une armature en matière végétale et le béton de nodules latéritiques. L'effort de traction est appliqué en suspendant progressivement des poids à l'armature (photographie de gauche de la figure IV.11).



Figure IV.11 : Essais d'adhérence en compression (droite) ou en traction (gauche)

1.2.5. Essai de flexion 4 points sur poutres de béton de terre armé de bois

L'incorporation des fibres végétales dans la terre permet l'amélioration de la résistance (GHAVAMI et al., 1999 ; BOUCHICHA et al., 2005 ; BINICI et al., 2005) et/ou l'amélioration de sa ductilité et de sa ténacité (SAADI et BELOUETTAR, 2011). Ces deux aspects résultent du comportement des matériaux en flexion. Il y a deux types de flexion : la flexion 3 points et la flexion 4 points. Dans notre étude, nous avons retenu l'essai de flexion 4 points. En effet, elle permet d'avoir un moment constant entre les deux appuis supérieurs et, dans ce cas, le volume de l'échantillon testé est plus grand.

La résistance en flexion a été déterminée sur des éprouvettes de dimensions $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$. Les essais ont été réalisés sur une presse flexion MTS 100 kN selon la norme NF 12390-5 (2012). Pour cet essai, les valeurs de la force et de la flèche ont été enregistrées simultanément et une vitesse de $5 \mu\text{m/s}$ a été utilisée. L'éprouvette repose sur deux appuis simples distants l'un de l'autre de 45 cm (l). La charge F est appliquée en deux points distants de 15 cm (d) symétriques par rapport au centre de la travée. La section des poutres est de $15 \times 15 \text{ cm}$. Il s'agit de poutres profondes dont $1 \leq a/d < 2,5$ (figre IV.12).

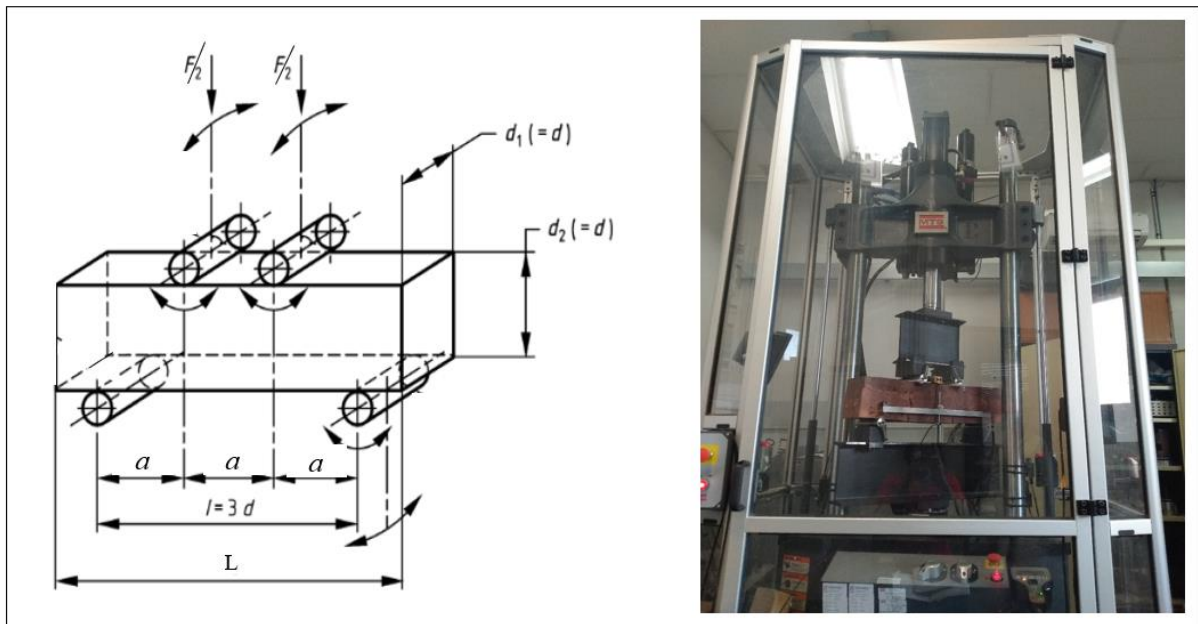


Figure IV.12: Essai de flexion 4 points

2. CARACTERISATION DES BETONS DE TERRE A L'ETAT FRAIS ET DURCI

2.1. Caractéristique à l'état frais

Le tableau IV.3 donne les caractéristiques des 5 compositions de béton étudiées à l'état frais à savoir la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams et la masse volumique du béton à l'état frais.

Tableau IV.3: Caractéristiques des bétons étudiés à l'état frais

	Terre (g)	Sable (g)	Gravier (g)	Eau (g)	HMP (g)	Paille (g)	Affaissement (cm)	Masse volumique (Kg/m ³)
C1	1596	0	0	604	0	0	6	2200
C2	1542	0	0	638	0	15	5,5	1860
C3	859	344	516	511	0	0	6	2350
C4	1566	0	0	352	16	16	5,5	1850
C5	922	369	554	330	18	18	6	2300

On constate que les 5 compositions atteignent la consistance visée (entre 5 et 9 cm). Pour les bétons sans HMP avec 1% paille, la teneur en eau est égale à 41% et l'ajout d'1% d'HMP permet de réduire considérablement cette teneur en eau qui passe à 22,5% pour la même consistance. On constate que l'ajout de 1% de paille réduit de manière marquée la consistance à l'état frais et qu'à l'inverse, le remplacement d'une partie de la terre par du sable et du gravier conduit à l'obtention de masses volumiques plus élevées.

Lors du séchage des éprouvettes de béton coulées, les compositions sans HMP (donc avec des teneurs en eau élevées) ont présenté des retraits trop importants qui sont allés jusqu'à la rupture parfois de certaines éprouvettes comme le montre la figure IV.13.

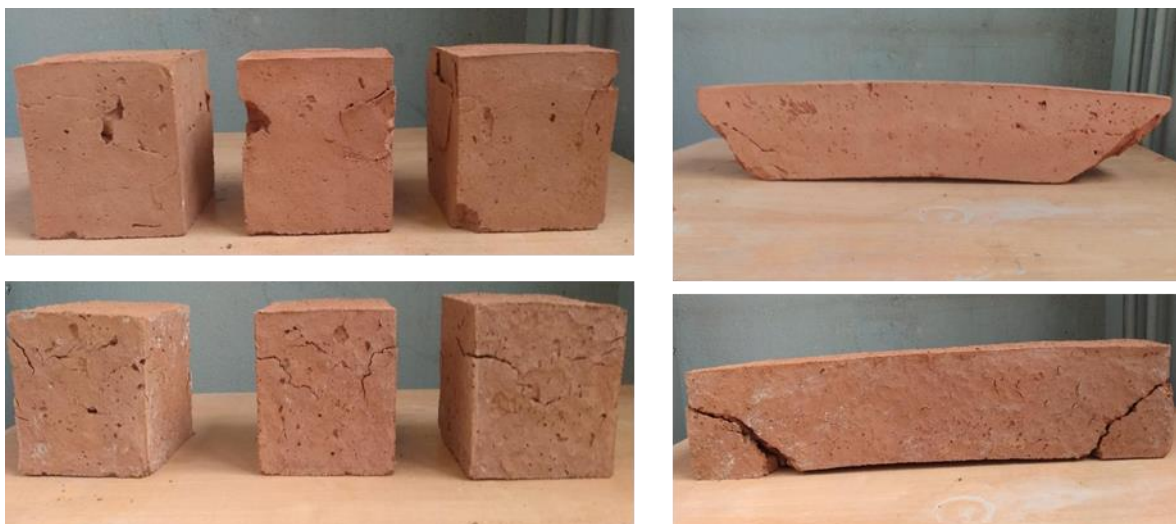


Figure IV.13 : Illustrations des retraits des éprouvettes de bétons C1, C2 et C3

Nous avons donc décidé de ne pas poursuivre la caractérisation de ces compositions et nous n'avons mesuré les caractéristiques à l'état durci que sur les deux compositions C4 et C5.

2.2 Caractéristiques à l'état durci

Lors des essais de compression réalisés sur la composition de béton C4, nous avons mesuré le déplacement de la traverse ce qui nous a permis de calculer la déformation et donc de tracer, pour ces bétons, les courbes contrainte-déformation présentées sur la figure IV.14.

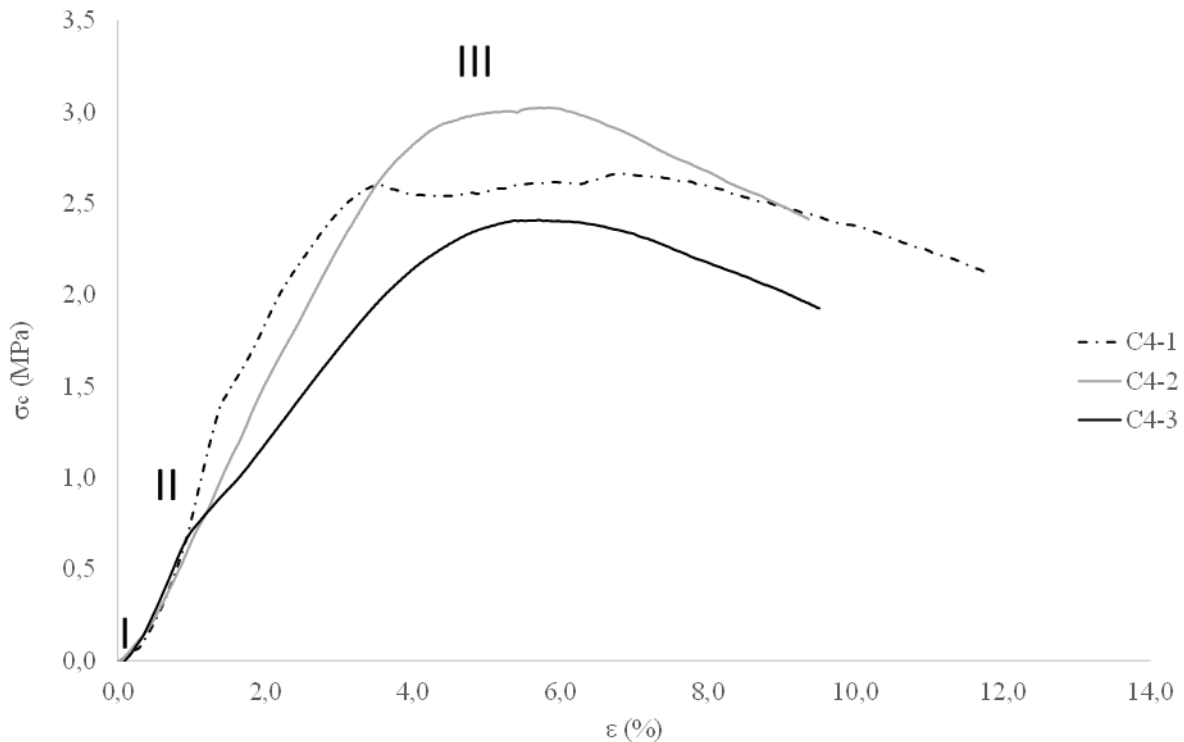


Figure IV.14: Courbe contrainte-déformation d'un échantillon cubique (composition C4)

Les trois éprouvettes cubiques de la composition C4 soumises à l'essai de compression suivent globalement la même évolution.

On observe une première phase située au voisinage de l'origine ayant une forme concave que l'on retrouve aussi chez les matériaux poreux (zone I). Cette première zone de la courbe correspond à la fermeture des microfissures naturellement présentes dans l'échantillon et à la stabilisation du contact entre l'éprouvette et le dispositif de chargement.

Dans la deuxième zone (zone II), l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation est quasi linéaire. Dans cette partie de la courbe, il est possible de mesurer la pente de la courbe pour en déduire le module de déformation. Cette manière de mesurer le module de déformation n'est pas très précise mais elle présente l'avantage de donner facilement un ordre de grandeur. La mesure de module de déformation est normalement réalisée en utilisant des cycles de chargement-déchargement incrémentaux et en mesurant la déformation au milieu de l'éprouvette par des capteurs ou des jauges de déformation. Dans notre travail, nous n'avons pas pu réaliser ces mesures fines mais nous avons tout de même estimé le module d'élasticité pour connaître son ordre de grandeur. De plus, on remarque, dans cette seconde partie linéaire de la courbe contrainte-déformation, un changement de pente pour les éprouvettes C4-1 (autour de 1,5 MPa) et C4-3 (autour de 0,7 MPa). Ce changement de pente correspond à l'apparition de fissures dans l'éprouvette.

Enfin, une troisième zone (zone III) apparaît proche de la rupture où le comportement devient élastoplastique avec une courbe de contrainte-déformation qui s'adoucit continuellement

jusqu'à atteindre la valeur maximale de la résistance en compression de l'éprouvette. La rupture se fait de manière ductile (surtout marquée pour C4.1) montrant ainsi l'effet des fibres de paille de riz qui conservent une certaine cohésion post-rupture.

Le tableau IV.3 présente la résistance en compression des éprouvettes des compositions C4 et C5. Nous n'avons fait les mesures de déplacement que pour les éprouvettes de la composition C4. Ces mesures nous ont permis de déterminer la déformation atteinte pour la contrainte maxi ($\epsilon_{\text{pour } \sigma_{\text{max}}}$) ainsi que la contrainte pour une déformation de 1,5% ($\sigma_{\text{c1.5\%}}$). Cette valeur est souvent utilisée pour les matériaux très déformables à base de fibres végétales (LABOREL-PRENERON et al., 2017).

Tableau IV.4: Résultats des essais en compression des compositions C4 et C5

Eprouvette	Masse (g)	σ_{cmax} (MPa)	$\sigma_{\text{c1.5\%}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{pour } \sigma_{\text{max}}}$ (%)	E (MPa)
C4-1	1610	2,62	1,16	6,9	134
C4-2	1610	3,02	1,09	5,8	86
C4-3	1600	2,44	0,96	5,6	95
Moyenne	1607	2,69	1,16	6,1	105
C5-1	1890	1,96	n.m.	n.m.	n.m.
C5-1	1880	2,95	n.m.	n.m.	n.m.
C5-1	1877	1,95	n.m.	n.m.	n.m.
Moyenne	1886	1,99	/	/	/

La mesure de la déformation sur les éprouvettes de la composition C4 montre que les bétons contenant 2% de paille de riz sont très déformables puisque la déformation à la rupture est en moyenne égale à 6,1% ce qui est très élevé. Ce résultat est classique lorsque l'on ajoute des matériaux biosourcés à la terre. LABOREL-PRENERON et al. (2017) ont trouvé des résultats comparables lors de leur étude sur des échantillons de terre compactés contenant 3% de paille d'orge, 3% de chènevotte ou 3% de rafle de maïs. Pour leurs matériaux, ils trouvent des allongements à la rupture égaux respectivement à 7,8%, 4,8% et 2,4%. Pour ces matériaux déformables, il est alors recommandé de travailler avec les contraintes à 1,5% de déformation. Cette manière de travailler provient notamment des études sur les bétons de chanvre qui présentent eux aussi de grandes déformations. Toujours dans l'étude de LABOREL-PRENERON et al. (2017), pour les mêmes mélanges, les contraintes à 1,5% de déformation sont égales respectivement à 0,7 MPa, 0,7MPa et 2,1 MPa avec des modules de déformation de 62 MPa, 75 MPa et 217 MPa. En dehors du mélange de terre avec 3% de rafle de maïs qui est plus rigide et plus résistant que les autres, les valeurs que nous obtenons pour la formule C4 sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues pour la paille d'orge et la chènevotte.

Enfin, les résultats du tableau IV.3 sur la résistance maximale des bétons montrent que la formule C4, qui ne contient que de la terre, a des résistances en compression plus élevées que la formule dans laquelle on a ajouté du sable et du gravier et ce malgré une masse volumique beaucoup plus faible (1607 kg/m³ contre 1886 kg/m³). Pour notre étude et avec la terre que nous utilisons, il ne semble donc pas opportun de chercher à optimiser la courbe granulaire en ajoutant du sable et du gravier. En plus, cela rend plus compliquée la fabrication des bétons. Nous avons donc décidé de réaliser la suite de l'étude sur les poutres avec une seule et même formule, la formule C4.

3. ADHERENCE BOIS/BETON DE TERRE

Le tableau IV.4 présente les résultats obtenus pour les essais d'adhérence en utilisant deux méthodes :

- en appliquant un effort de compression sur l'armature par l'intermédiaire d'une presse,
- en appliquant un effort de traction en suspendant des poids à l'armature par l'intermédiaire d'un câble passé dans un trou fait à l'extrémité de l'armature.

Avec la première méthode, la presse donne directement la valeur de la force en kN, pour la seconde méthode, il suffit de transformer les masses en force. Nous rappelons que les armatures de 14x14 mm² sont ancrées sur toute la hauteur du cube soit 10 cm. Il est alors possible de calculer la contrainte d'adhérence en divisant la force par la surface latérale soit 4x(14x100) mm².

Tableau IV.5: Résultats des essais d'adhérence

Type de méthode	Type d'éprouvette	Masse de l'éprouvette (kg)	F _{adhérence} (kN)	σ _{adhérence} moy (kPa)
Compression	Pin lisse	1,56	0,15	27,4
		1,56	0,16	
		1,58	0,15	
	Pin troué	1,56	1,33	280,4
		1,56	1,51	
		1,58	1,87	
	Rônier lisse	1,57	0,49	81,5
		1,61	0,43	
		1,61	0,45	
Traction	Pin lisse	1,59	0,10	18,5
		1,58	0,11	
		1,56	0,10	
	Pin troué	1,61	*	287,5
		1,58	*	
		1,58	1,61	
	Rônier lisse	1,59	0,44	75,0
		1,56	0,46	
		1,58	0,36	

Les résultats du tableau IV.4 montre que les résultats obtenus avec les deux méthodes sont relativement proches et que la dispersion est assez faible quel que soit la technique employée. Par contre, la mesure de l'adhérence par suspension n'a pas correctement fonctionné pour les échantillons de pin troué car les efforts appliqués étaient trop importants (environ 160 kg) et dans deux cas sur trois, c'est l'extrémité de l'armature en pin où on avait fait le trou pour passer le câble qui s'est fendue (figure IV.15).



1Figure IV.15: Extrémité de l'armature en pin fendu durant l'essai d'adhérence

Influence de la nature du bois sur la contrainte d'adhérence

La contrainte d'adhérence mesurée sur le rônier « lisse » est 3 fois plus élevée que sur le pin lisse. Cette meilleure adhérence du rônier est certainement due à sa structure anatomique constituée de fibres et de parenchymes toutes deux visibles à l'œil nu comme le montre la figure IV.16 contrairement au pin qui est extrêmement lisse en surface. Les parenchymes du rônier étant plus mous que les tissus fibreux, elles se laisseraient facilement pénétrer par la matrice argileuse et amélioreraient ainsi l'adhérence terre/bois.

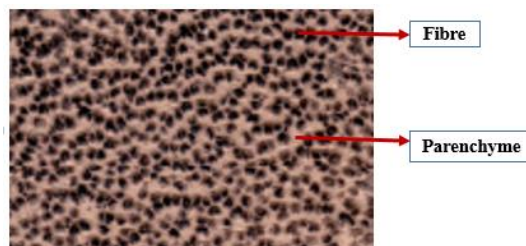


Figure IV.16 : Coupe transversale du rônier

Influence du traitement de la surface du bois sur la contrainte d'adhérence

Pour l'échantillon de pin, qui est malheureusement le seul que nous ayons eu le temps de tester, la contrainte d'adhérence est multipliée par 10 lorsque des trous sont faits à la surface du pin. Ces trous laissent la matrice argileuse se loger dans le pin et renforcent très nettement l'adhérence entre le bois et la terre. Ce résultat est très intéressant et montre que la technique « artisanale » que nous avons utilisée pour augmenter la rugosité du pin s'est révélée fructueuse. Nous allons pouvoir voir dans la suite du chapitre quel est l'effet de l'amélioration de cette adhérence sur le comportement à la flexion 4 points des poutres de béton de terre armé de bois.

4. FLEXION 4 POINTS DES POUTRES DE BETON DE TERRE ARME DE BOIS

4.1. Comportement théorique de poutres en béton armé sollicitées en flexion 4 points

4.1.1 Sollicitations dans les poutres en flexion 4 points

Selon la théorie des poutres, en flexion 4 points, la zone de la poutre située entre les deux charges subit un moment fléchissant constant et un effort tranchant nul. L'effort tranchant est constant entre les appuis et les points d'application des charges (figure IV.17). Conformément à la théorie, pour cette configuration, la section sollicitée en flexion (pure) est soumise à une contrainte de traction maximale au niveau de la fibre inférieure et une contrainte de compression maximale à la membrure supérieure de la poutre.

Lors d'un essai sur une poutre en béton armé d'armatures en acier sous chargement monotone et en supposant un comportement élastique des matériaux, une fissure, dite de flexion, s'initie lorsque la résistance à la traction du béton est atteinte. Le moment fléchissant correspondant à cette situation est dit moment de fissuration.

Avec l'augmentation de la charge appliquée, la zone où le moment fléchissant dépasse le moment de fissuration s'élargit ; ceci provoque par conséquent la formation d'autres fissures verticales de flexion. Ensuite, entre l'appui et le point d'application de la force, sous l'effet des contraintes de cisaillement, des fissures inclinées s'initient dans la hauteur de la poutre et rejoignent les fissures verticales due à la flexion.

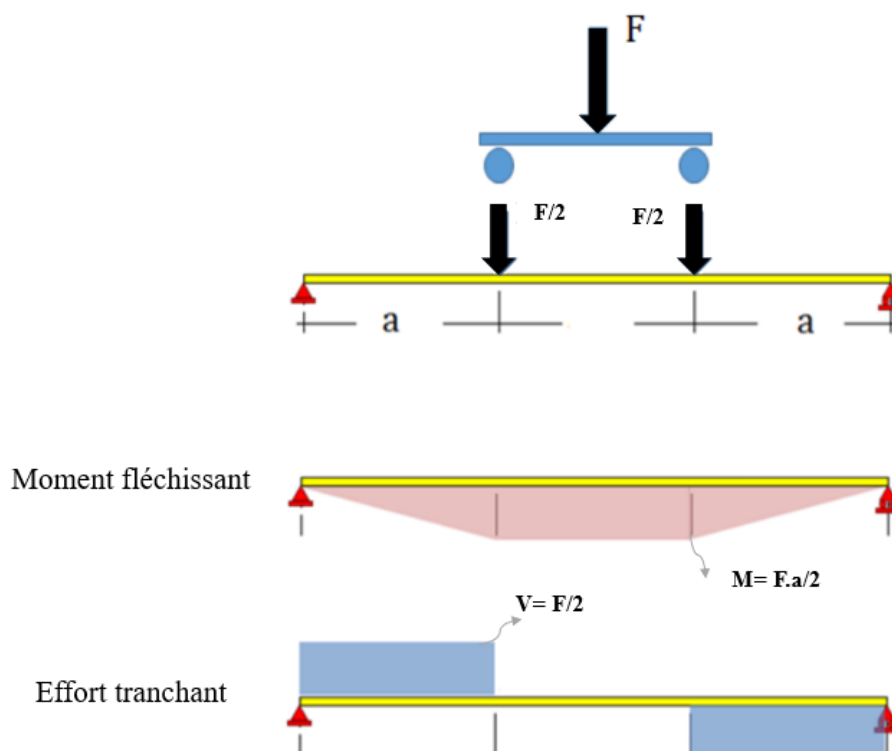


Figure IV.17: Diagrammes du moment fléchissant M et de l'effort tranchant d'une poutre soumise à la flexion 4 points

4.1.2. Modes de rupture des poutres sollicitées en flexion 4 points

La rupture d'une poutre en béton armé est atteinte lorsque les charges qui la sollicitent excèdent sa résistance. Le mode de rupture dépend de plusieurs paramètres :

- Le type de chargement
- Les dimensions de la poutre, notamment son élancement
- Les propriétés mécaniques des matériaux et leurs sections (taux de renforcement longitudinal et transversal en armatures)
- Le mode constructif (agencement poteau-poutre).

Il existe globalement trois modes de rupture (figure IV.18) d'une poutre sollicitée en flexion 4 points.

La rupture par flexion

Cette rupture est considérée si la quasi-majorité des fissures sont quasiment verticales et positionnées dans le tiers central de la longueur libre entre les appuis. Le début de l'endommagement commence avec la fissuration du béton. Des fissures verticales, souvent très fines, sont donc observées au milieu de la poutre. Ensuite, avec l'augmentation du chargement, de nouvelles fissures se développent dans cette même zone centrale alors que les anciennes fissures s'ouvrent et s'étendent en hauteur avec une fissure majeure située au milieu de la poutre (figure IV.18). Le mécanisme de rupture au moment fléchissant est dit « ductile » en raison de la plastification de l'armature métallique qui est soumise à la traction. Lors du dimensionnement d'une poutre, il est recommandé de prévoir sa rupture au moment fléchissant car ce mode de rupture permet l'observation d'une dégradation significative de la poutre avant sa ruine (surdimensionnement à l'effort tranchant).

La rupture par écrasement du béton

Ce mode de rupture en flexion est dû à la plastification de l'armature tendue et à la ruine du béton comprimé. Ce mécanisme de rupture se produit plus brutalement que le mécanisme précédent lorsque les poutres sont fortement armées.

La rupture par effort tranchant

La rupture due à l'effort tranchant est une rupture fragile qui se produit si la résistance du béton au cisaillement est insuffisante. Quelques fissures inclinées (généralement selon un angle avoisinant les 45°) se propagent le long de la zone sollicitée par l'effort tranchant maximum, induites par la contrainte principale de traction le long de la bielle de compression. L'effort de traction le long de ces bielles est alors remonté par les armatures transversales. Il s'agit en fait des fissures inclinées apparaissant près des appuis vers le point d'application de la charge (figure IV.18). Puis, si la section de cadres est insuffisante, ces derniers plastifient engendrant l'ouverture de l'une des fissures inclinées pour former une macro-fissure orientée vers le point de chargement, puis la ruine de la poutre. De plus, si les armatures longitudinales inférieures n'ont pas plastifié, cet endommagement engendre la ruine instantanée de la poutre pour une flèche potentiellement très faible.

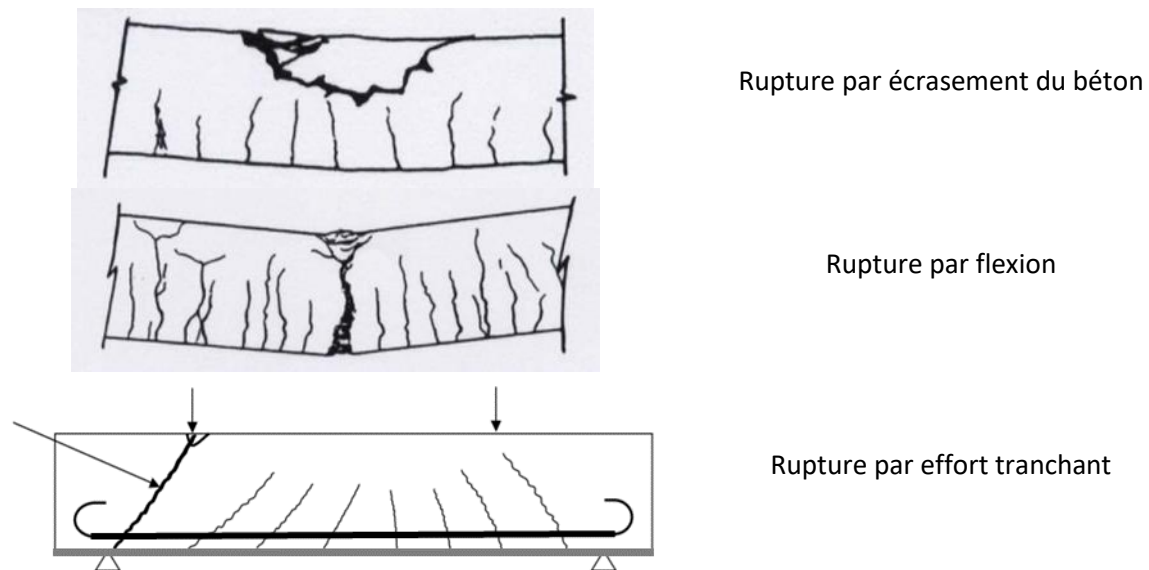


Figure IV.18: Modes de rupture d'une poutre soumise à la flexion

4.2. Modes de rupture des poutres de béton de terre armé testées

4.2.1. Poutres non armées

La figure IV.19 présente le mode de rupture des poutres non armées lorsqu'elles contiennent ou non de l'hexamétaphosphate de sodium.

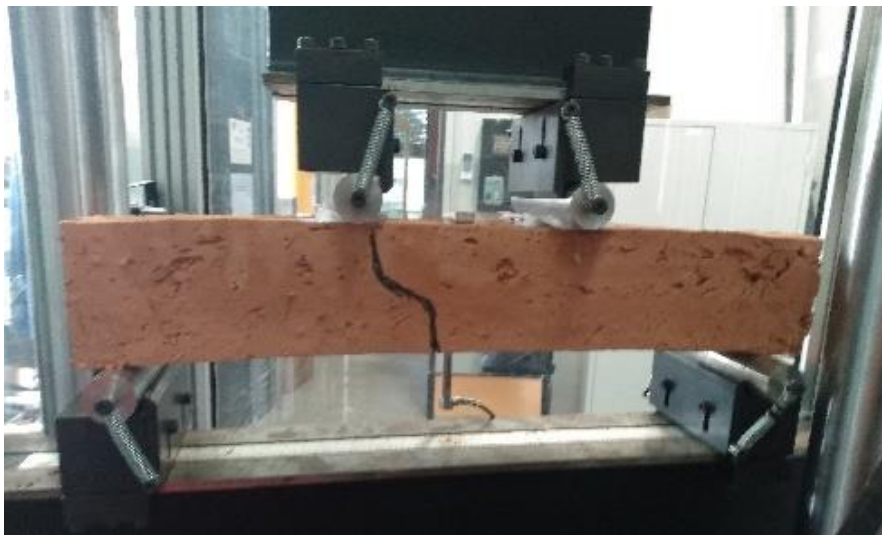


Figure IV.19: Mode de rupture des poutres de béton de terre non armée

Dans ce cas, le faciès de rupture est particulier : une fissure principale, que l'on voit très clairement sur la figure IV.19, apparaît et se propage rapidement. Cette fissure apparaît entre les deux points d'application de la charge et la rupture est soudaine et fragile. Il s'agit d'une rupture par flexion.

4.2.2. Poutres avec armatures lisses et libres aux extrémités

Dans un second temps, nous avons mené des essais sur des poutres renforcées avec des armatures lisses (pin ou rônier) et libres aux extrémités (sans ancrage). La figure IV.20 présente le mode de rupture de ces poutres de béton de terre.

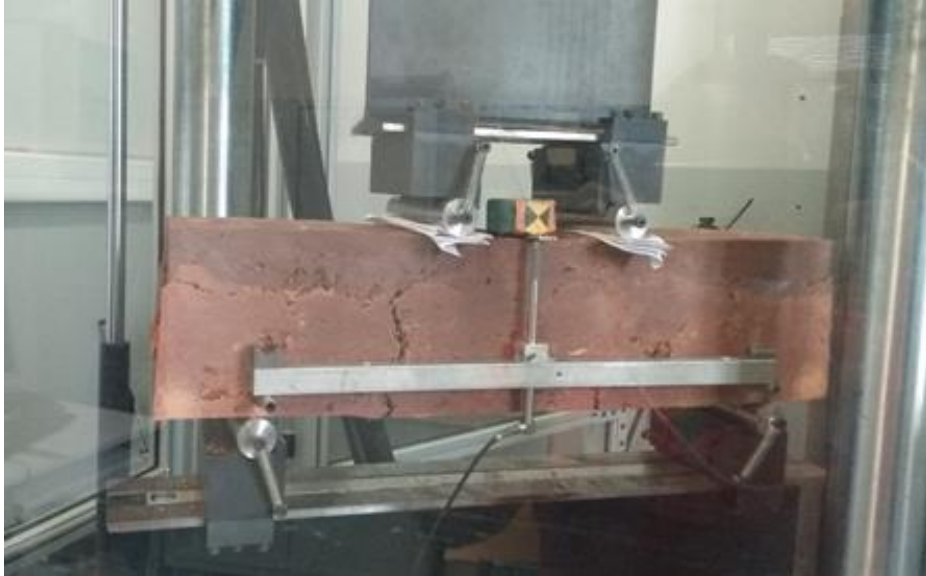


Figure IV.20: Mode de rupture des poutres de béton de terre avec armatures lisses et libres aux extrémités

Pour ces poutres avec armatures lisses sans blocage aux extrémités, une fissure de 5 mm environ apparaît entre $l/3$ et $2l/3$. Cette fissure, comme dans le cas précédent, apparaît entre les deux points d'application de la charge. Comme précédemment, nous sommes en présence d'une rupture par flexion.

La particularité de cette rupture est un glissement important des armatures observables sur la figure IV.21.



Figure IV.21: Glissement des armatures

4.2.3. Poutres avec armatures crénelées ou perforées et libres aux extrémités

Les essais réalisés avec les armatures en pin crénelées donnent exactement le même faciès de rupture que dans le cas des armatures en pin lisses. Nous observons le même mode de rupture par propagation d'une fissure entre les points d'application de la charge et un glissement important des armatures. Ceci peut s'expliquer par le fait que les entailles réalisées au couteau

à bois ne sont pas assez profondes et pas assez larges pour vraiment modifier l'adhérence du pin. D'ailleurs, dans le chapitre IV.3 sur la mesure de la contrainte d'adhérence, nous n'avons pas jugé utile de mesurer l'adhérence pour ces armatures en pin crenelées.

Par contre, avec les armatures en pin trouées, des différences de comportement sont observables. La figure IV.22 présente le mode de rupture de la poutre avec armatures en pin trouées.



Figure IV.22: Modes de rupture des poutres de béton de terre avec armatures trouées et libres aux extrémités

Dans ce cas, le mode de rupture est identique aux précédents : il s'agit d'un mode de rupture par flexion avec apparition et propagation d'une fissure entre les points d'application de la charge. Par contre, la différence flagrante avec les armatures lisses ou crenelées, c'est que dans ce cas là, il n'y a aucun glissement des armatures au cours de l'essai comme le montre la photographie de droite de la figure IV.22. Comme nous l'avons conclu dans la section IV.3 à propos de la contrainte d'adhérence bois/terre, les trous réalisés dans le pin ont été efficaces pour améliorer l'adhérence entre le béton de terre et l'armature.

4.2.4. Poutres avec armatures lisses et bloquées aux extrémités

Lorsque nous avons obtenu nos premiers résultats concernant les poutres armées avec le pin lisse, nous avons compris que le glissement très important des armatures réduisait considérablement l'action des armatures en bois et, par conséquent, la tenue mécanique des poutres. Nous avons voulu voir ce qui se produirait si l'on bloquait ces armatures en bois aux extrémités de la poutre en les laissant vissées dans les plaques en bois du coffrage. Le dispositif ainsi étudié fait penser à la configuration des poutres en béton précontraint par post-tension dans lesquelles le béton durci aux extrémités jouerait le rôle des plaques en bois dans notre dispositif. La figure IV.23 présente le mode de rupture de la poutre avec armatures en pin lisses bloquées aux extrémités.



Figure IV.23: Mode de rupture des poutres de béton de terre avec armatures en pin lisses bloquées aux extrémités

Nous constatons tout d'abord que la rupture s'est produite dans la poutre et non au niveau de la liaison entre l'armature et les plaques en bois aux extrémités. De plus, le mode de rupture est parfaitement similaires aux autres modes de rupture par flexion observés sur les poutres précédentes : une fissure de 5 mm apparaît entre les points d'application de la charge et se propage de bas en haut de la poutre jusqu'à sa rupture. Nous verrons lors de l'analyse des courbes effort-flèche dans le paragraphe suivant si ce blocage a eu un effet sur la résistance de la poutre.

L'ensemble des poutres armées d'armatures en bois ont subi une rupture par flexion et il est important de signaler que, dans aucun des cas étudiés, les armatures n'ont été rompues. La rupture semble apparaître par un excès de compression dans le béton en fibre supérieure.

4.3. Courbes effort flèche des poutres étudiées

4.3.1. Analyse qualitative globale des courbes effort-déformation

La figure IV.24 présente la courbe effort-flèche de la poutre P-PT2 qui donne l'allure générale de toutes les courbes que nous étudierons séparément dans la suite du chapitre.

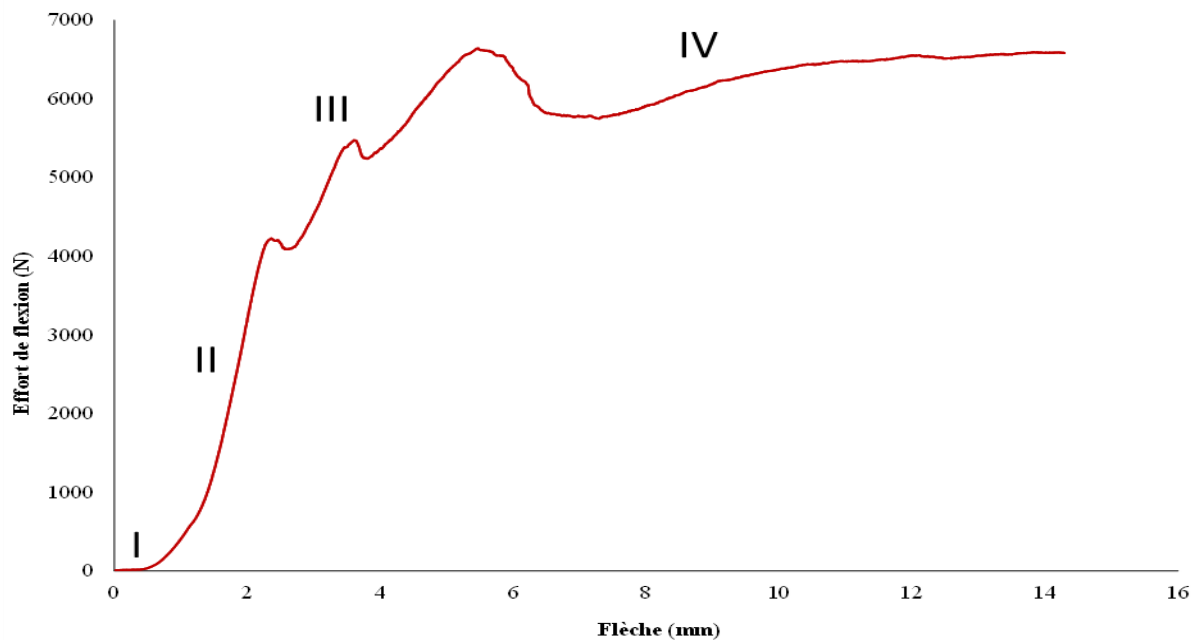


Figure IV.24: Courbe effort-flèche de la poutre

Pour les courbes effort-flèche obtenues pour les différentes poutres testées qui ont globalement la même allure que celle de la figure IV.24, quatre phases sont observables jusqu'à la rupture des poutres :

- Une première phase très courte qui correspond à la stabilisation de l'éprouvette avec le dispositif de chargement (phase I),
- Dans la deuxième phase, les matériaux travaillent dans le domaine élastique linéaire non fissuré (phase II). De la traction se développe progressivement au niveau de la fibre inférieure tandis que la fibre supérieure travaille en compression. Tant que la contrainte de traction reste inférieure à la résistance en traction du béton, il n'y a pas de fissures. Toute l'inertie du béton participe à la rigidité flexionnelle de la poutre et à sa résistance.
- Au cours de la troisième phase, la contrainte au niveau de la fibre inférieure devient supérieure à la résistance en traction du béton. Il y a apparition de fissures en premier lieu à l'endroit où le moment est maximal c'est-à-dire entre $l/3$ et $2l/3$. On entre dans un comportement élastique fissuré avec une pente qui change (phase III). Dans l'exemple de la poutre P-PT2 de la figure IV.24, il y a deux « accidents » qui semblent correspondre à de la fissuration. Dans de nombreuses courbes que nous étudierons ci-après, il ne semble pas y avoir ces « accidents » correspondants à de la fissuration.
- Enfin, durant la quatrième phase, on entre franchement dans le domaine plastique des grandes déformations. La déformation en fibre supérieure devient trop importante et le béton casse alors en compression, on atteint la rupture. Le reste de la section cède alors rapidement : la section de béton ne reprend plus aucun effort, c'est la ruine de la poutre, seules les armatures en bois reprennent les charges et maintiennent le béton en place.

Pour chaque type de poutres, nous avons testé 2 poutres afin de vérifier que les résultats sont reproductibles. Ainsi, le nombre de courbes à analyser est très important et nous proposons de découpler cette analyse de manière suivante :

- Poutres non armées (P-NAshmp et P-NAahmp),

- Poutres avec des armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées aux extrémités (P-PL, P-PC et P-PT),
- Poutres avec des armatures en pin lisses et en ronier lisses non bloquées aux extrémités (P-PL et P-RL),
- Poutres avec des armatures en pin lisses et en ronier lisses bloquées aux extrémités (P-PLB et P-RLB).

4.3.2. Poutres non armées

La figure IV.25 présente les courbes effort-flèche des deux poutres non armées sans HMP (P-NAshmp) et des deux poutres non armées avec HMP (P-NAahmp). Il est important de faire remarquer ici que ces poutres ont été confectionnées avant les autres poutres armées dans des moules différents qui n'avaient pas les mêmes dimensions. Ces poutres ont des dimensions de $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ alors que les poutres en béton de terre armée d'armatures en bois ont des dimensions de $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$. Il n'est donc pas possible de comparer les efforts obtenus pour les poutres non armées et armées qui n'ont pas la même section.

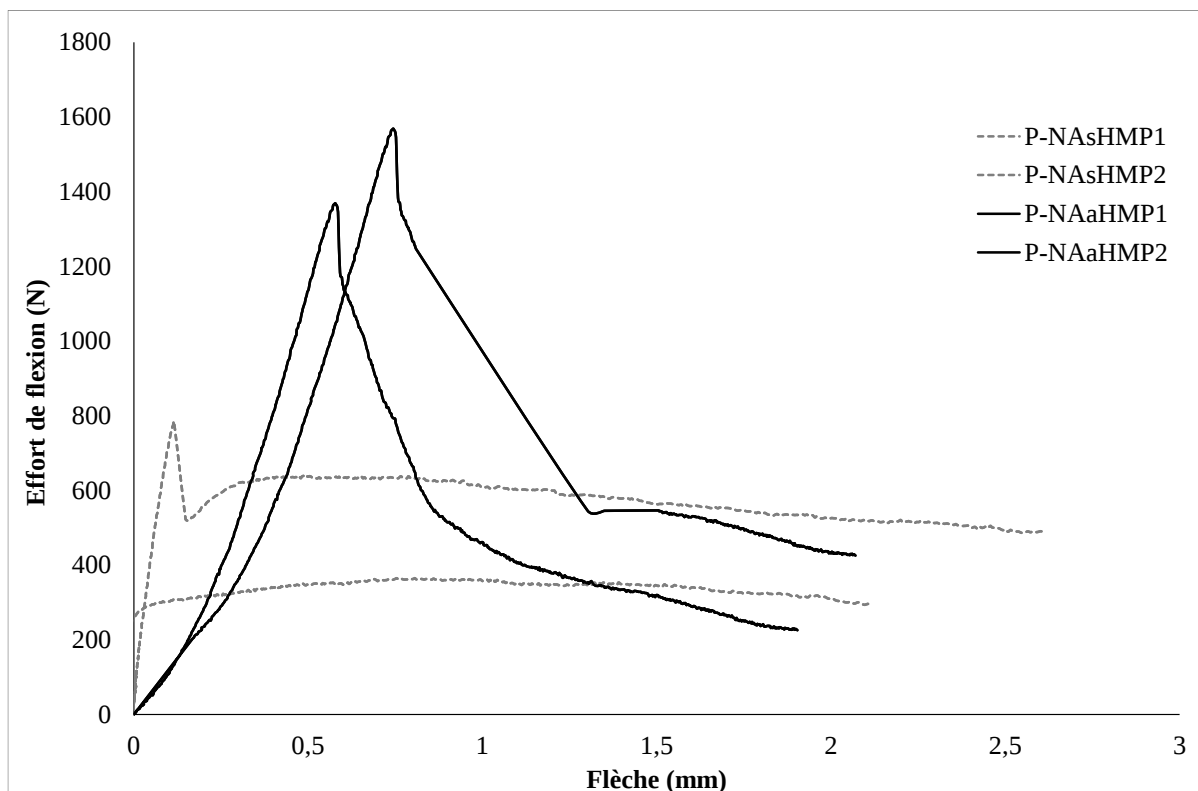


Figure IV.25: Courbes effort-flèche des poutres non armées sans et avec HMP

L'analyse des courbes de la figure IV.25 montre que l'ajout de HMP a permis d'obtenir des poutres plus résistantes. Les charges maximales atteintes pour les deux poutres avec HMP sont de 1370 N et 1570 N contre 370 N et 780 N pour les deux poutres sans HMP. L'effet positif de l'ajout de HMP sur les résistances des matériaux en terre crue a déjà été observé dans d'autres travaux (MOEVUS et al., 2016). L'hexamétaphosphate de sodium est un dispersant dont l'utilisation permet de réduire l'eau de gâchage dans le béton de terre lors de son coulage tout en ayant une bonne fluidité. La réduction de l'eau se traduit par un gain de densité sèche du matériau. Aussi, l'incorporation de l'HMP dans le béton permet de déstructurer les agrégats formés par les argiles et permet donc aux plaquettes d'argile de s'empiler faces contre faces.

Cette organisation des argiles entre elles renforce davantage la cohésion du liant argileux. Ces deux facteurs favorisent l'augmentation de la capacité portante des poutres.

De plus, pour ces deux types de poutre, on peut constater qu'il y a un comportement post-pic très important malgré l'absence d'armatures ce qui est vraisemblablement dû à la présence de tiges de paille de riz dans les bétons. Cependant, ce dernier commentaire est à relativiser car les amplitudes des flèches mesurées sont faibles comparativement aux autres courbes (notamment celle de la figure IV.24).

Enfin, il est possible d'utiliser ces résultats pour calculer la résistance à la traction par flexion du béton de composition C4. En effet, la contrainte en fibre inférieure est égale à $\sigma_f = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$ avec $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$ et $M = \frac{F \cdot a}{2}$ (voir figure IV.12). Il est alors possible de calculer σ_f moyen qui vaut, dans le cas de la poutre P-NAahmp (béton C4), 0,66 MPa. Dans la suite de ce chapitre, les poutres de béton C4 étudiées sont armées d'armatures en pin ou en rônier. Aussi, avant que le béton ne fissure en fibre inférieure, la poutre est homogène et il est possible de calculer la charge de fissuration en considérant les nouvelles dimensions des poutres armées (15x15x60 cm³). Ainsi, la charge de première fissuration pour l'ensemble des poutres testées devrait théoriquement être égale à 4960 N.

4.3.3. Poutres avec armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées

La figure IV.26 présente les courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées (deux poutres sont testées par type d'armature).

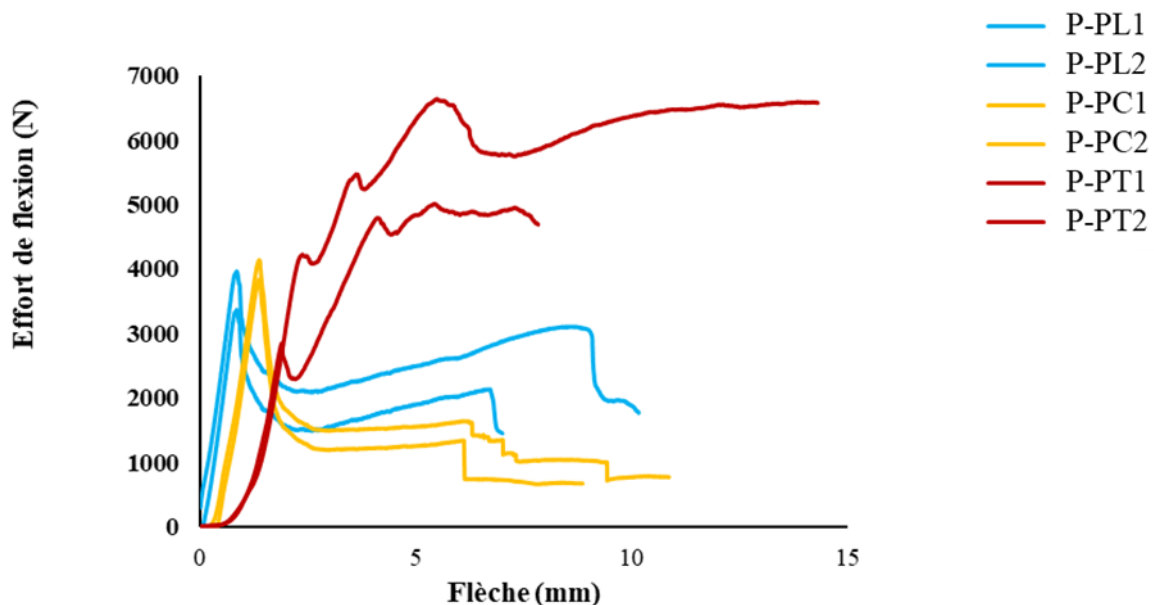


Figure IV.26: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin (lisses, crénelées et trouées) non bloquées

Le premier commentaire des courbes de la figure IV.26 porte sur la bonne reproductibilité des résultats entre les deux poutres testées par type d'armature. On peut conclure que les comportements sont assez reproductibles pour que les observations faites ne soient pas dues à des aléas expérimentaux. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de différence de comportement entre les armatures lisses et les armatures crénelées ce qui confirme l'inefficacité

de ces crénelures pour améliorer l'adhérence des armatures en pin comme cela a déjà été commenté lors des essais d'adhérence et de l'étude des faciès de rupture de ces poutres.

De plus, pour ces quatre poutres, nous n'observons pas de décrochage des courbes dans la partie « élastique » qui reste parfaitement linéaire jusqu'à atteindre un effort maximal plus faible de que la charge de première fissuration calculée précédemment (4960 N). Si l'on compare les résultats obtenus avec les armatures en pin lisses ou crénelées aux résultats des poutres non armées, on peut conclure que l'ajout d'armature réduirait légèrement la capacité portante des poutres qui aurait dû, en toute rigueur, atteindre la charge de première fissuration du béton. On peut penser que le fait d'introduire une "armature" non adhérente crée une hétérogénéité dans le matériau qui le fragilise et permet ainsi d'expliquer cette diminution de la charge calculée théoriquement.

Dans le cas des armatures en pin trouées, l'allure des courbes et les amplitudes des efforts et des flèches atteintes sont radicalement différentes. Comme nous l'avons vu lors de l'analyse qualitative de l'allure des courbes, pour les poutres avec armatures en pin trouées, nous observons des décrochages avec changement de pente dans la partie « élastique » qui sembleraient correspondre à de la fissuration bien qu'ils interviennent pour des charges différentes de la charge de fissuration théorique : 4200 N pour la poutre P-PT1 et 2800 N pour la poutre P-PT2 contre 4960 N en théorie.

Par ailleurs, l'amélioration de l'adhérence bois/terre permise par les trous a un effet très important sur la charge maximale atteinte (5010 et 6640 N pour les deux poutres étudiées) ce qui est en moyenne 1,5 fois plus élevé que pour les poutres avec armatures en pin « non adhérentes ».

4.3.4. Poutres avec armatures en pin lisses et de rônier lisses non bloquées

La figure IV.27 montre les courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses non bloquées (deux poutres sont testées par type d'armature).

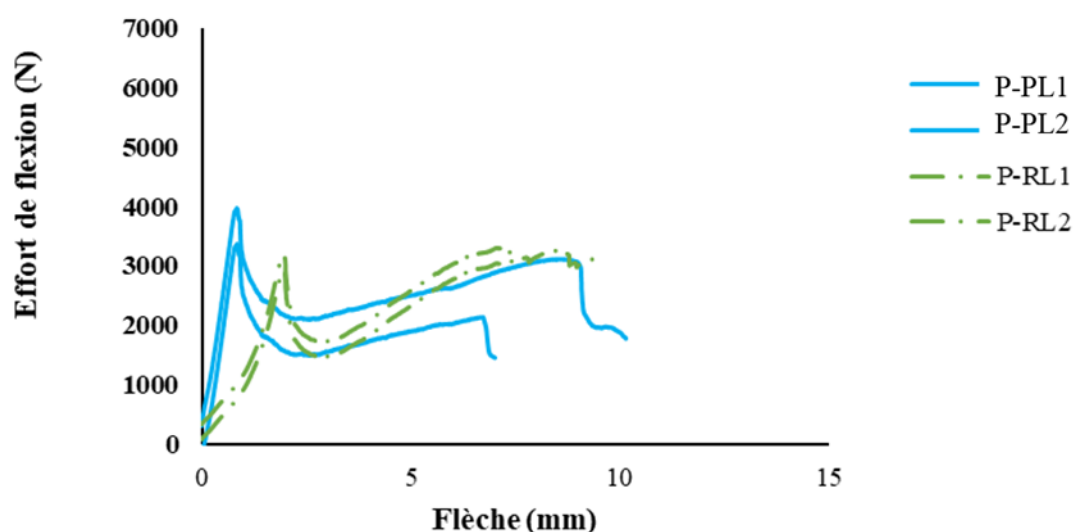


Figure IV.27: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses non bloquées

Encore une fois, on peut souligner la très bonne reproductibilité des résultats obtenus sur les deux courbes faites avec les armatures en rônier lisses. Si l'on compare les résultats obtenus pour les deux espèces de bois, on peut constater que les courbes sont tout à fait similaires ce qui confirme les résultats des essais de résistance en flexion (chapitre 2 de la thèse) qui avaient montré que les résistances et les modules des deux essences étaient proches. Par contre, les essais d'adhérence ont montré qu'il y avait une meilleure adhérence avec le rônier qu'avec le pin ce qui ne se retrouve pas ici. Il est probable que l'augmentation d'adhérence limitée entre le rônier et le pin ne soit pas suffisante pour changer radicalement le comportement des poutres contrairement à ce que nous avons pu observer avec les armatures en pin trouées.

4.3.5. Poutres avec des armatures en pin lisses et en rônier lisses bloquées aux extrémités

La figure IV.28 montre les courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses bloquées aux extrémités (deux poutres sont testées par type d'armature).

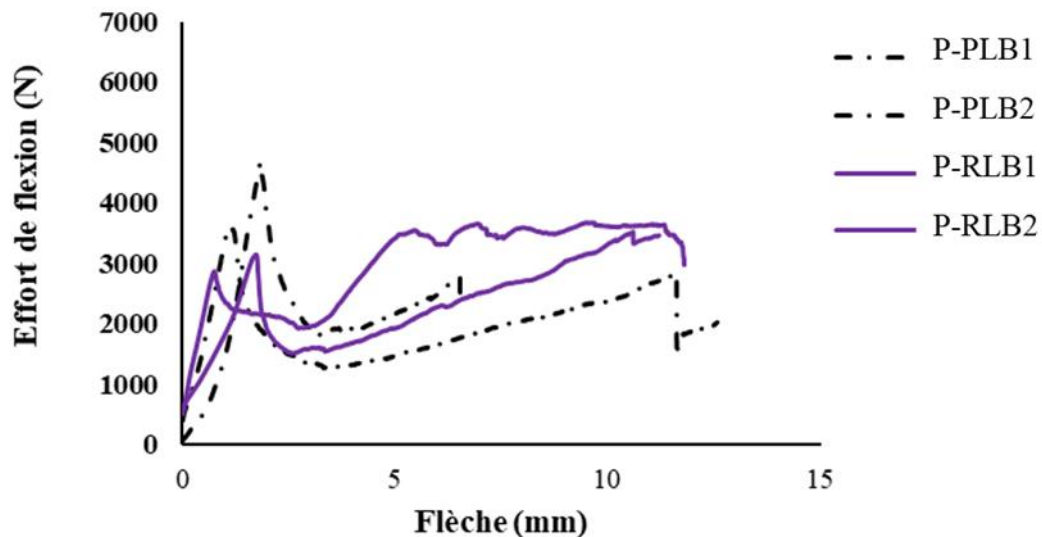


Figure IV.28: Courbes effort-flèche des poutres avec armatures en pin lisses et en rônier lisses bloquées aux extrémités

Les résultats obtenus sur les poutres avec armatures en bois lisses bloquées aux extrémités sont globalement identiques pour les deux essences de bois. Les résultats des essais de caractérisation du chapitre 2 réalisés sur les deux espèces de bois ont pourtant montré que le rônier était plus résistant que le pin mais, comme précédemment avec les armatures lisses libres, il ne semble pas que ces différences influent le comportement mécanique des poutres en flexion. De plus, si l'on compare les résultats des poutres avec armatures bloquées par rapports aux armatures libres, on ne constate pas non plus de grandes différences, la charge maximale atteinte se situant autour de 3000-4000 N. Ce résultat est décevant car nous pensions que la non adhérence des armatures et, par voie de conséquence leur glissement important, pénalisaient fortement le comportement mécanique des poutres mais le fait d'ancrer ces armatures aux extrémités ne changent apparemment rien.

Le fonctionnement mécanique de ces poutres de béton de terre fibrés avec armatures en bois est particulièrement complexe et les hypothèses relatives aux calculs du Béton Armé traditionnel ne sont pas applicables ce qui rend difficile toute extrapolation théorique des

résultats expérimentaux obtenus. Ce commentaire est encore d'autant plus vrai pour le cas de figure où les armatures sont bloquées aux extrémités car le fonctionnement mécanique de ce système est difficile à appréhender. En effet, les efforts de traction dans les armatures en bois devraient se reporter sur les plaques de bois aux extrémités et appliquer une contrainte de compression dans le béton (phénomène comparable à de la précontrainte par post-tension), ce qui aurait dû avoir pour conséquence d'augmenter les charges maximales atteintes ce qui n'est visiblement pas le cas. A l'heure où nous rédigeons ce manuscrit, nous ne sommes pas en mesure d'expliquer ces résultats qui devront faire l'objet d'études ultérieures plus approfondies afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces poutres.

5. CONCLUSION

Ce dernier chapitre a porté sur l'étude de poutrelles de béton de terre armé d'armatures en bois. La première partie de ce chapitre a consisté à formuler un béton de terre qui soit le plus performant possible. Pour confectionner ce béton, nous avons conservé la base du composite étudié dans le chapitre 3 pour la fabrication des entrevous à savoir un mélange de terre et de paille de riz. Par contre, n'ayant pas suffisamment de graines de néré à notre disposition, nous avons utilisé un autre fluidifiant pour remplacer la décoction de néré, l'Hexamétaphosphate de sodium. Nous n'avons pas eu le temps durant cette thèse d'optimiser les proportions de chaque constituant et notamment l'HMP que nous avons certainement utilisé en excès. Il serait intéressant dans des travaux ultérieurs de chercher à réduire la quantité d'HMP ajouté mais aussi de voir si l'effet fluidifiant de la décoction de néré serait suffisant pour pouvoir fabriquer des bétons de terre de qualité. La formule que nous avons retenue est une formule qui contient 2% de paille de riz et 1% d'HMP. Nous avons aussi testé une formule pour laquelle nous avons cherché à optimiser la courbe granulaire pour se rapprocher de celle d'un pisé en ajoutant du sable et du gravier à notre terre mais cette formule n'a pas permis d'obtenir des résistances plus élevées malgré une densité plus importante.

La suite de ce chapitre a porté sur l'association armature en bois – béton de terre. Cette étude s'est faite en deux étapes. Nous avons d'abord mesuré la contrainte d'adhérence entre les armatures en bois et le béton de terre en fabriquant des matériaux modèles constitués d'une armature en bois noyée dans un cube de béton de terre. Deux systèmes d'essai (un par traction l'autre par compression) ont été testés et ont donné des résultats comparables. Un des objectifs de cette étude était de comparer l'effet de la transformation de l'état de surface des armatures sur leur adhérence avec le béton. Deux états de surface ont été testés sur le pin : les armatures lisses et les armatures trouées (des « trous » de 3 mm de profondeur, 5 mm de diamètre séparés les uns des autres d'une distance de 3 mm sont faits à la surface de l'armature). Pour l'échantillon de rônier, nous n'avons pu tester que l'échantillon lisse. Les résultats montrent que, pour les échantillons lisses, les contraintes d'adhérence sont faibles même si le rônier, un peu plus rugueux que le pin, présente une adhérence légèrement supérieure. Par contre, les trous faits à la surface de l'armature améliorent considérablement la contrainte d'adhérence qui est multipliée par un facteur supérieur à 10 par rapport à l'armature lisse.

La seconde étape a porté sur l'étude en flexion 4 points de poutrelles de petites dimensions ($15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$) armées de 2 armatures longitudinales en bois de $14 \times 14 \text{ mm}^2$ de section. Pour ces essais, nous avons testé des poutrelles non armées ainsi que des poutrelles armées d'armatures lisses, crénelées et trouées en sapin. Enfin, pour comparer les deux essences de bois, nous avons aussi réalisé des essais avec des armatures en rônier lisses mais nous n'avons pas suffisamment de bois ni de temps pour faire les essais sur des armatures en rônier trouées ce qui est regrettable et pourrait être fait dans des travaux ultérieurs. Enfin, après avoir observé des glissements importants des armatures lisses durant les essais de flexion, nous avons tenté de bloquer les armatures aux deux extrémités de la poutre en les vissant dans des plaques épaisses en bois. Toutes les poutres testées ont subi une rupture par flexion liée à un écrasement du béton de terre en fibre supérieure. Les résultats des essais montrent que les crénelures (fentes peu profondes faites à la surface de l'armature pour augmenter son adhérence) sont inefficaces pour améliorer le comportement mécanique de la poutre en flexion qui est exactement le même que celui des poutres avec armatures lisses. Par contre, les armatures trouées augmentent considérablement les contraintes et les flèches maximales atteintes ce qui confirme les bons

résultats des essais d'adhérence. En ce qui concerne l'effet de l'essence de bois sur les performances des poutres en flexion, nous n'avons pas mis en évidence une différence entre le pin et le rônier bien que le rônier soit plus résistant que le pin (résultats du chapitre 2 de la thèse) et légèrement plus adhérent. De même, le fait de bloquer le glissement des armatures aux extrémités de la poutre est aussi sans effet sur les performances en flexion.

Les résultats obtenus dans cette partie posent de nombreuses questions qui sont aujourd'hui encore sans réponse et qui vont nécessiter des travaux de recherche ultérieurs. Il est important d'insister sur le côté exploratoire de cette partie de la thèse qui a porté sur l'association bois – béton de terre. En effet, ces essais ont été faits par analogie avec le Béton Armé sachant qu'on est en présence de matériaux qui ont des comportements très différents et surtout avec des hypothèses très différentes notamment celle de la « parfaite » adhérence « acier/béton ». Il n'est pas envisageable pour le moment de modéliser théoriquement le comportement mécanique de ces poutres de béton de terre armé d'armatures en bois qui ont un fonctionnement mécanique différent des poutres en Béton Armé classiques et surtout qui ne vérifient pas les hypothèses de calculs du Béton Armé mais les résultats exploratoires obtenus sur ces poutres en flexion donnent des perspectives intéressantes de futures recherches et développement.

6. REFERENCES

- BINICI H., AKSOGAN O., SHAH T. Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials* 19, 2005, 313-318.
- BOUCHICHA M., AOUISSI F., KENAI S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites* 27(5), 2005, 617-621.
- FOUDJET A., FOMO J. Une nouvelle méthode d'accroissement de l'adhérence entre une armature en matière végétale et le béton (effet de confinement): cas de l'armature de rotin dans le béton de nodules latéritiques. *Materials and Structures* 28, 1995, 554-557.
- GHAVAMI K., TOLEDO FILHO R.D., BARBOSA N.P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites* 21, 1999, 39-48.
- GUIHENEUF S. Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation structurelle. Thèse de doctorat de l'INSA de Rennes, 2020, p. 262.
- LABOREL-PRENERON A., AUBERT J.E., MAGNIONT C., MAILLARD P., POIRIER C. Effect of plant aggregates on the mechanical properties of earth bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29(12), 2017.
- MOEVUS M., JORAND Y., OLAGNON C., MAXIMILIEN S., ANGER R., FONTAINE L., ARNAUD L. Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. *Materials and Structures* 49, 2016, 1555-1568.
- NF EN 206. Béton - Spécification, performances, production et conformité. AFNOR, 2014.
- NF EN 12350-2. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement. AFNOR, 2012.
- NF EN 12390-5. Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes. AFNOR, 2019.
- NF EN 12350-6. Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique. AFNOR, 2019.
- HOUBEN H., GUILLAUD H. *Traité de construction en terre*. Editions Paranthèses, 2006.
- SAADI I., BELOUETTAR R. Comportement mécanique des briques de terre crue renforcées par des fibres de palmier dattier et des fibres de paille. INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, 2011.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette thèse a porté sur le développement d'un principe constructif original de plancher pour la construction de logements confortables, modernes, à moindre coût et à faible impact environnemental en valorisant un matériau local, la terre. Ce système est basé sur celui des planchers à poutrelles et entrevous avec des entrevous en matériau composite en terre et des poutrelles constituées de béton de terre armé d'armatures longitudinales en bois.

Le premier chapitre de cette thèse a consisté en un état de l'art de la construction en terre crue réalisé par une étude bibliographique qui a notamment porté sur les différents matériaux utilisés durant cette thèse (la terre, les fibres, les fluidifiants et le bois de rônier). Cette étude a montré que l'utilisation de fibres végétales ou de biopolymères naturels permet d'améliorer le comportement de la terre crue et présente l'avantage d'être écologique et disponible. Ainsi, pour le développement de nos matériaux composites, nous avons décidé d'utiliser des fibres de paille de riz et de la décoction de graines de néré en nous inspirant des matériaux utilisés pour la construction des greniers en terre pour le stockage des céréales en milieu rural au Nord-Ouest du Bénin. De plus, cette étude bibliographique a mis en avant les excellentes propriétés mécaniques du bois de rônier qui fait que ce bois est actuellement utilisé en bois de structure. Ainsi, il semble pertinent d'utiliser ce bois disponible localement pour produire les armatures longitudinales que nous utiliserons pour le renforcement des poutrelles en béton de terre comme cela est fait dans certains planchers de bâtiments traditionnels (les tatas somba) du Bénin et du Togo.

Le second chapitre a permis de présenter et de caractériser l'ensemble des matériaux utilisés durant cette thèse (les terres, les pailles de riz, les fluidifiants et les bois de rônier et de pin). Nous avons envisagé au départ de ne travailler que sur un seul échantillon par type de matériau en provenance du Bénin mais des problèmes d'approvisionnement nous ont contraints à utiliser aussi des matériaux français. Cela a ajouté du travail mais cela a présenté l'avantage de pouvoir comparer les résultats obtenus sur plusieurs matériaux. Les deux terres utilisées durant ce travail (une terre béninoise et une terre française) sont de type latérite et elles ont des caractéristiques très proches ce qui a permis de les utiliser de manière indifférenciée dans notre travail sans que cela ne nuise à sa cohérence globale. La caractérisation de la paille de riz a donné des résultats relativement classiques mais importants pour leur utilisation dans les matériaux en terre comme la masse volumique, la conductivité thermique en vrac ou la capacité d'absorption d'eau. Par contre, les essais de caractérisation des deux espèces de bois réalisés par le Professeur Florent Eyma à l'Institut Clément Ader de Tarbes ont fourni des résultats originaux sur le bois rônier. Les essais qui ont porté sur la masse volumique, la teneur en eau, la dureté, la résistance en compression ainsi que la résistance et le module en flexion ont montré que les deux essences de bois avaient des caractéristiques très différentes. Pour toutes les caractéristiques (sauf la contrainte en flexion), le rônier est nettement plus performant que le pin. De plus, ces essais ont montré la grande hétérogénéité du rônier. Des essais ultérieurs seraient nécessaires pour mieux connaître ce bois et mieux appréhender son comportement.

Le troisième chapitre a permis de mettre au point le composite à base de terre, de paille de riz et de décoction de néré destiné à être utilisé pour la fabrication des entrevous. L'effet fluidifiant de la décoction a pu être observé par des mesures d'indice de liquidité mais il faudrait aller plus

loin dans l'étude de l'effet fluidifiant de la décoction de néré. Il en est de même pour les essais Proctor avec décoction qui n'ont pas pu être réalisés par manque de matériau. La caractérisation mécanique et la durabilité des composites ont montré que l'ajout de tige de paille de riz et de décoction de néré améliorent les résistances en compression, à l'abrasion et à l'érosion. En parallèle, l'ajout de paille de riz permet de diminuer la densité du composite ce qui le rend plus isolant. L'ensemble de ces résultats nous a permis de retenir le mélange à 2% de paille de riz et 6% de décoction de néré pour la fabrication des entrevous. Deux types d'entrevous ont été fabriqués à l'Université d'Abomey Calavi (des entrevous de 15x20x40 cm³ ayant 2 alvéoles et des entrevous de 15x20x50 cm³ ayant 3 alvéoles). Ces entrevous ont été caractérisés du point de vue mécanique à l'UAC par l'intermédiaire de deux essais : la mesure de résistance à la compression longitudinale et la mesure de la résistance au poinçonnement-flexion qui a nécessité la fabrication d'une presse spécifique. Les résultats obtenus ont permis de conclure que les entrevous en terre crue que nous avons fabriqués peuvent être classés dans la catégorie des entrevous semi-résistants ce qui est un résultat prometteur de nos travaux.

Le quatrième et dernier chapitre de cette thèse a porté sur l'étude de poutrelles de béton de terre armé d'armatures en bois. Cette étude est d'abord passée par la formulation et la caractérisation d'un béton ayant la même base que le composite des entrevous (2% de paille de riz) mais pour lequel la décoction de néré a été remplacée par de l'Hexamétaphosphate de sodium. Nous n'avons pas pu optimiser tous les paramètres de la formule de béton par manque de temps et les seuls paramètres optimisés concernent le squelette granulaire, les résultats ayant montré qu'il était préférable d'utiliser la terre seule. La formule que nous avons retenue pour la suite de l'étude sur les éléments en béton de terre armé contient 2% de paille de riz et 1% d'HMP. Nous avons ensuite mesuré la contrainte d'adhérence entre les armatures en bois et le béton de terre en fabriquant des matériaux modèles constitués d'une armature en bois noyée dans un cube de béton de terre. Deux états de surface ont été testés sur le pin (les armatures lisses et les armatures trouées) et, pour le rônier, nous n'avons pu tester que les échantillons lisses. Les résultats obtenus ont montré que le rônier lisse est légèrement plus adhérent que le pin mais, pour les deux espèces, les contraintes d'adhérence en l'absence de traitement de surface sont faibles. Par contre, la réalisation de trous à la surface de pin a permis de multiplier par un facteur 10 la contrainte d'adhérence ce qui est aussi un résultat très prometteur. La dernière partie de ce chapitre a porté sur l'étude en flexion 4 points de poutrelles de petites dimensions (15x15x60 cm³) armées de 2 armatures longitudinales en bois de 14x14 mm² de section. Des essais sur des poutres non armées ont permis de calculer la charge de fissuration théorique des poutres de béton de terre armées. Les charges maximales obtenues pour les poutres armées d'armatures lisses de pin ou de rônier sont comparables pour les deux espèces et plus faibles que les valeurs théoriques de la charge de fissuration. Ces résultats montrent qu'en l'absence d'adhérence, les armatures en bois ne jouent aucun rôle mécanique et, pire, créent une hétérogénéité qui fragilise les poutres. Par contre, comme l'ont montré les essais d'adhérence, le fait de trouser la surface des armatures en pin a conduit à une augmentation importante des charges et des flèches maximales atteintes (les charges maximales sont quasiment doublées). Ce résultat est encourageant et il serait intéressant comme perspectives de faire des essais similaires avec le rônier. Enfin, après avoir observé des glissements importants des armatures lisses durant les essais de flexion, nous avons bloqué les armatures aux deux extrémités de la poutre en les

vissant dans des plaques épaisses en bois afin de voir quel serait l'effet sur le comportement mécanique de l'assemblage. Les résultats obtenus avec des armatures lisses en pin et en rônier ont été décevants car nous obtenons des résultats similaires pour les deux espèces et analogues à ce que nous avons obtenus pour les armatures lisses libres.

Cette thèse effectuée en cotutelle nous a permis d'allier les matériaux et le patrimoine culturel béninois aux essais de laboratoire et outils de caractérisation habituellement utilisés en France. Nous avons eu de riches échanges et du partage entre les cultures différentes avec des approches peut-être différentes sur l'utilisation du matériau terre. La disponibilité d'équipements dans le laboratoire LMDC a été d'une grande utilité dans la réalisation des essais prévus dans notre projet de thèse. La contre partie de cette thèse en cotutelle est qu'il a fallu envoyer les matériaux du Bénin, ce qui nous a causé énormément de soucis. Il a donc fallu changer notre programme de travail en intégrant l'utilisation de matériaux disponibles en France. De plus, à partir de l'année dernière, nous étions en plein programme expérimental sur les poutres en béton de terre armé, quand il y a eu le covid et le confinement, ce qui ne nous a pas permis de réaliser tous les essais prévus. Ainsi, la partie sur les poutres en flexion apparaît davantage comme un travail exploratoire, une étude de faisabilité qui a donné des résultats très intéressants et prometteurs mais qui laisse encore beaucoup de travail et de perspectives pour des études ultérieures.

Les perspectives à ce travail sont donc nombreuses qu'elles portent sur les matières premières utilisées, les formulations des matériaux étudiés ou sur le procédé constructif dont les premiers résultats sont prometteurs. Concernant les matériaux, nous n'avons pour le moment travaillé qu'avec des terres de type latérite qui sont très répandues de par le monde. Mais, dans le sud-ouest de la France par exemple, ce type de terre est relativement rare et il serait intéressant de voir si l'on arrive à confirmer les bons résultats obtenus sur les entrevous et sur les poutres avec d'autres natures de terre. Par ailleurs, la caractérisation du bois de rônier est tout à fait originale (peu de résultats existent dans la littérature) et cette essence de bois présente des caractéristiques exceptionnelles (densité, dureté et résistance en compression très élevées) mais aussi une forte hétérogénéité que nous n'avons pas pu correctement étudiée. Nous serions très intéressés de poursuivre et d'approfondir la caractérisation de ce bois de rônier dans des travaux ultérieurs réalisés en partenariat avec le Professeur Eyma de l'ICA. De même, nous n'avons pas pu caractériser de manière approfondie l'efficacité de la décoction de néré comme fluidifiant par manque de matériau. Il faudrait développer cette partie notamment en trouvant un essai qui permette de quantifier cet effet fluidifiant. Peut-être que comme nous l'avons fait, la mesure de la limite de liquidité pourrait être une solution mais il faudrait faire davantage d'essais. De plus, cet effet fluidifiant pourrait être mis à profit dans d'autres types de matériaux en terre crue comme les enduits par exemple.

Par ailleurs, il y a encore énormément de travail à faire sur l'optimisation des bétons que nous avons fabriqués à base de terre et de paille de riz notamment en optimisant l'adjuvantation. Il faudrait, dans un premier temps, chercher à réduire le dosage en HMP mais, surtout, il faudrait vérifier si l'effet fluidifiant de la décoction de néré est suffisant pour permettre de fabriquer des bétons de terre de qualité.

Enfin, la partie sur le dispositif constructif nécessite encore certains développements. Les entrevous que nous avons réussi à produire sont satisfaisants mais il reste encore du travail sur

les poutres en béton armé. Tout d'abord, nous n'avions pas suffisamment de bois de rônier ni de temps pour faire les essais sur des armatures en rônier trouées ce qui est regrettable et pourrait être fait dans des travaux ultérieurs. Les résultats préliminaires que nous avons obtenus montrent que si les armatures en bois ne sont pas adhérentes, elles ne servent à rien voir pire, elles semblent diminuer la capacité portante des poutres. Il faudra alors trouver un moyen plus « industriel » d'augmenter l'adhérence des armatures et de tester l'efficacité de ces moyens. Les résultats obtenus sur les poutres avec armatures trouées soulèvent encore de nombreuses questions qui sont aujourd'hui encore sans réponse et qui vont nécessiter des travaux de recherche ultérieurs. Ces travaux auront notamment pour objectif de voir s'il serait possible de modéliser théoriquement le comportement mécanique de ces poutres de béton de terre armé d'armatures en bois. De plus, nous n'avons pour le moment travaillé qu'avec des modèles réduits de poutre et il faudra dans le futur passer à l'échelle 1 en s'intéressant notamment à l'étude de l'influence de i) l'élancement des poutres et du taux de renforcement sur les modes de rupture et les capacités portantes, ii) le taux d'humidité sur les armatures en bois et les interactions chimiques perturbatrices éventuelles entre l'armature en bois et le béton de terre. Enfin, pour être complets, il reste un élément du plancher que nous n'avons que très peu évoqué dans cette thèse qui est la dalle de compression qui sera coulée à la surface des entrevous. Cette dalle devra aussi être en béton de terre allégé et renforcé par de la paille de riz. Il est probable que le même béton que celui utilisé pour le coulage des poutrelles puisse être utilisé mais là encore des essais et des calculs de vérification seront nécessaires afin de valider ce système de plancher à base de terre.

