# Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge

Tuan Anh Phung

▶ **To cite this version:**

Tuan Anh Phung. Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge. Génie civil. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMC219 . tel-01938827

**HAL Id: tel-01938827**

**https://theses.hal.science/tel-01938827**

Submitted on 29 Nov 2018

**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.

Normandie Université

# THÈSE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**

**Spécialité GENIE CIVIL**

**Préparé au sein de l'Université de Caen Normandie**

# Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge


**Présentée et soutenue par**
**Tuan Anh PHUNG**


| Thèse soutenue publiquement le 28/05/2018 devant le jury composé de | | |
|---|---|---|
| M. JEAN EMMANUEL AUBERT | Maître de conférences HDR, UNIVERSITE TOULOUSE 3 PAUL SABATIER | Président du jury |
| M. BOGDAN CAZACLIU | Directeur de recherche, IFSTTAR | Membre du jury |
| M. MALO LE GUERN | Enseignant chercheur, Ecole sup.d'ingénieurs ESITP Epron | Membre du jury |
| M. ARNAUD PERROT | Maître de conférences, UNIVERSITE BRETAGNE SUD UBS | Membre du jury |
| M. MOHAMED BOUTOUIL | Directeur de recherche, Ecole sup.d'ingénieurs ESITP Epron | Directeur de thèse |
| Mme HASNA LOUAHLIA | Professeur des universités, UNIVERSITE CAEN NORMANDIE | Co-directeur de thèse |

**Thèse dirigée par HASNA LOUAHLIA et MOHAMED BOUTOUIL, Laboratoire universitaire des sciences appliquées de cherbourg (Caen)**

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

ED 591 PSIME

LUSAC

# REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire de recherche de l'École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction de Caen (ESITC Caen) et au Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées (LUSAC site Saint-Lô). Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leur aide, leurs encouragements et leurs conseils, m'ont permis de réaliser cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Jérôme Lebrun, Directeur de l'ESITC Caen, de m'avoir accueilli durant ces années au sein de son établissement.

Je tiens ensuite à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse Monsieur Mohamed Boutouil, Directeur de la recherche à l'ESITC Caen, et à ma Codirectrice de thèse Madame Hasna Louahlia, Professeur de l'université de Caen, au laboratoire LUSAC Saint-Lô. Ils m'ont permis l'aboutissement heureux de ce travail. Le partage de leurs compétences scientifiques et de leurs conseils avisés m'a aidé à mener à bien ce travail. Surtout, M Boutouil, son œil critique m'a été précieux pour structurer le travail pendant ma thèse et pour améliorer la qualité de rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Malo Le Guern, enseignant-chercheur à l'ESITC Caen, pour l'encadrement de ma thèse. Je le remercie de m'avoir fait bénéficier de sa solide expérience et de ses grandes qualités de chercheur et surtout ses corrections qui ont beaucoup apporté à mon travail. Merci de m'avoir appris et aidé à progresser non seulement dans le domaine de la recherche mais également sur le plan personnel. Merci pour sa gentillesse et sa disponibilité à chaque fois que j'ai un petit souci, et aussi pour ses encouragements dans les moments difficiles de la thèse.

Je remercie également à Messieurs Jean-Emmanuel Aubert et Bogdan Cazacliu d'avoir accepté d'être rapporteurs pour mon travail de thèse. Je remercie également Monsieur Arnaud Perrot pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de participer au jury de ma soutenance de thèse.

Je remercie les membres de l'équipe du laboratoire de l'ESITC Caen, de nombreuses personnes m'ont donné un coup de main et participé à mon travail. En premier, un grand merci à Jonathan, mon collègue de bureau, pour « les cours de français », ses conseils scientifiques et également ses conseils de vie. Ensuite, je tiens à remercier chaleureusement Dang et Hector, enseignant-chercheurs, leur expérience, leur patience et leur gentillesse m'ont permis d'organiser mon travail de thèse sereinement. J'adresse mes vifs remerciements à toute l'équipe du laboratoire de l'ESITC Caen, David, Frédéric, Nassim, Antoine, Stéphanie, Mariane, Aurélie, Marie-Adeline, Olivier, Jean-Jacques et Karim.

Je voudrais exprimer mes remerciements à l'ensemble du personnel de l'ESITC Caen qui ont su m'accueillir chaleureusement et qui m'ont permis de m'intégrer à l'équipe durant 3 années et pour les années à venir.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance et mon affection à mes amis vietnamiens pour leur soutien moral et pour tous les moments inoubliables passés ensemble.

Enfin, je tiens à exprimer tout ma gratitude à mes parents, ma sœur pour leur amour profond et leur soutien inconditionnel, surtout ma femme Dung et mon petit trésor Léo, qui sont toujours à côté de moi pour m'encourager et me soutenir.

# TABLE DES MATIERES

**INTRODUCTION GENERALE ..... 7**

**I. CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 9**

I.1. Matériaux et construction durable ..... 9

I.2. Différents types de construction en terre crue ..... 10

I.2.1. Les principaux modes d'utilisation de la terre en construction ..... 11

I.2.1.1. Le pisé ..... 11

I.2.1.2. Le Torchis ..... 12

I.2.1.3. L'adobe ..... 13

I.2.1.4. La BTC (Brique de Terre Compressée) et BTCS (Brique de Terre Compressée Stabilisée) ..... 14

I.3. Présentation de la bauge ..... 15

I.3.1. La terre crue ..... 16

I.3.1.1. Fraction fine : argile et limon ..... 17

I.3.1.2. Les graviers, les sables et les limons ..... 19

I.3.2. Les fibres ..... 20

I.3.2.1. Apport de l'incorporation des fibres dans la matrice du sol ..... 21

I.3.2.2. Fibres naturelles utilisées dans la construction en terre ..... 22

I.3.2.3. Caractéristiques de la paille utilisée dans la bauge ..... 25

I.4. Méthode de mise en œuvre de la bauge ..... 27

I.4.1. Préparation du mélange terre-fibre in-situ ..... 28

I.4.2. Mise en œuvre de la bauge in-situ ..... 28

I.5. Propriétés de la bauge ..... 30

I.5.1. Cinétique de séchage et retrait ..... 30

I.5.1.1. Cinétique de séchage ..... 30

I.5.1.2. Retrait ..... 32

I.5.2. Comportement mécanique de la bauge ..... 36

I.5.2.1. Comportement en compression ..... 36

I.5.2.2. Comportement en flexion ..... 42

I.5.3. Propriétés hygrothermique de la bauge ..... 45

I.5.3.1. Conductivité thermique ..... 46

I.5.3.2. Propriété hygroscopique ..... 48
I.6. Conclusions ..... 56
**II. CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'EXPERIMENTALES ..... 57**
II.1. Caractérisation des matériaux ..... 57
II.1.1. Sols initiaux ..... 57
II.1.1.1. Analyse granulométrique ..... 58
II.1.1.2. Activité argileuse ..... 59
II.1.1.3. Caractéristiques de compactage ..... 59
II.1.2. Les fibres ..... 60
II.1.2.1. Caractéristiques physiques ..... 61
II.1.2.2. Masse volumique absolue ..... 61
II.1.2.3. Coefficient d'absorption d'eau ..... 62
II.1.2.4. Caractéristiques mécaniques ..... 65
II.1.3. Sols retenus ..... 68
II.2. Formulations et réalisations des composites terre-fibre ..... 68
II.2.1. Formulations des composites terre-fibre ..... 68
II.2.2. Méthodologies de fabrication des échantillons ..... 72
II.2.2.1. Méthode de préparation ..... 72
II.2.2.2. Echantillons cylindriques ..... 73
II.2.2.3. Echantillons cubiques ..... 73
II.2.2.4. Echantillons prismatiques ..... 74
II.2.3. Conservation et condition de cure ..... 75
II.3. Méthodes expérimentales ..... 75
II.3.1. Propriétés mécaniques et physiques ..... 75
II.3.1.1. Essai de compression simple ..... 75
II.3.1.2. Essai de flexion 4 points ..... 76
II.3.1.3. Mesure du retrait ..... 78
II.3.2. Conductivité thermique ..... 80
II.3.2.1. Méthode du fil chaud ..... 80
II.3.2.2. Dispositif de mesure ..... 82
II.3.3. Caractéristiques hygrométriques ..... 86

II.3.3.1. Courbe isotherme sorption/désorption ..... 86
II.3.3.2. Perméabilité à la vapeur d'eau ..... 90
II.4. Conclusion ..... 93
**III. CHAPITRE 3 : ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DE LA BAUGE ..... 94**
III.1. Comportement physique ..... 94
III.1.1. Masse volumique apparente ..... 94
III.1.1.1. Influence des fibres ..... 94
III.1.1.2. Influence de la teneur en eau initiale ..... 96
III.1.2. Cinétique de séchage ..... 96
III.1.2.1. Influence des fibres et de la condition de cure ..... 97
III.1.2.2. Influence du mélange de sol ..... 98
III.2. Analyse de la courbe contrainte-déformation ..... 101
III.2.1. Comportement en compression ..... 101
III.2.1.1. Rôle des fibres ..... 101
III.2.1.2. Rôle des teneurs en eau initiales ..... 103
III.2.1.3. Influence de la direction de chargement ..... 104
III.2.2. Courbe contrainte-déformation en flexion de la bauge ..... 108
III.2.2.1. Rôle des fibres ..... 108
III.2.2.2. Influence du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon ..... 111
III.3. Comportement en compression ..... 112
III.3.1. Influence des conditions de cure, du mélange et des fibres ..... 112
III.3.1.1. Influence des conditions de cure ..... 112
III.3.1.2. Influence du mélange ..... 114
III.3.1.3. Influence de l'incorporation des fibres ..... 115
III.3.1.4. Influence du type de fibre à la $W_{OPN}$ ..... 117
III.3.1.5. Influence de teneur en fibre à la $W_{BAU}$ ..... 118
III.3.2. Influence des teneurs en eau initiales ..... 120
III.3.3. Influence de la taille d'échantillon ..... 123
III.4. Comportement en flexion de la bauge ..... 124
III.4.1. Influence des fibres ..... 124
III.4.2. Influence du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon ..... 125

III.5. Conclusion ..... 127
**IV. CHAPITRE 4 : COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE ..... 128**
IV.1. Conductivité thermique ..... 128
IV.2. Retrait ..... 131
IV.3. Courbe isotherme sorption/désorption des matériaux ..... 135
IV.3.1. Fibres ..... 135
IV.3.2. Bauge ..... 138
IV.4. Perméabilité à la vapeur d'eau ..... 144
IV.5. Conclusions ..... 147
**CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES ..... 149**
**REFERENCES ..... 153**
**LISTE DES FIGURES ..... 162**
**LISTE DES TABLEAUX ..... 169**
**ANNEXES ..... 171**
**NOTATIONS ..... 175**
**RESUME ..... 177**
**ABSTRACT ..... 178**

# INTRODUCTION GENERALE

En France comme en Europe, les enjeux de réduction des consommations d'énergie et d'émissions de $CO_2$ incitent le secteur de la construction en général et celui des matériaux en particulier à se tourner vers des matériaux locaux et biosourcés. Les matériaux en terre crue permettent de réduire l'empreinte environnemental des bâtiments (Achenza et Fenu, 2007; Avrami et al., 2008; Aymerich et al., 2012; Berge, 2009; H Houben et al., 2006; Minke, 2006; Röhlen et al., 2013) tout en améliorant leur confort thermique (Binici et al., 2007; Little et Morton, 2001; Papika, 2010; Reeves et al., 2006; Röhlen et al., 2013). Néanmoins, les matériaux en terre crue nécessitent davantage de caractérisation scientifique pour une meilleure reconnaissance par tous les acteurs de la construction.

Parmi les nombreux matériaux en terre crue, la bauge (terre et fibres) est assez présente en Normandie (Manche et Calvados) mais moins étudiée que le pisé, l'adobe et les briques en terre compressée (Lebas et al., 2007; Weismann et Bryce, 2010). L'objectif de cette thèse est de formuler et de caractériser les propriétés mécaniques et hygrothermiques de la bauge composés à partir de matériaux (terres et fibres) disponibles localement en Normandie.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre, aborde les différents types de construction en terre avant de focaliser l'étude bibliographique sur la bauge : ses composants, sa mise en œuvre et ses propriétés.

Le second chapitre est dédié, dans un premier temps, aux caractérisations des composants de la bauge (terres et fibres) utilisés dans ces travaux. Par la suite, sont présentées les formulations, les méthodes de préparation et de conservation de la bauge au laboratoire. Ce chapitre est clôturé par les méthodes expérimentales de caractérisation des propriétés mécaniques, physiques, thermiques et hygroscopiques de la bauge.

Le troisième chapitre concerne les résultats du comportement physico-mécanique de la bauge. Ainsi, la masse volumique apparente et la cinétique de séchage de la bauge sont étudiées en fonction de plusieurs paramètres comme : le taux et la longueur des fibres, les types du sol, et les conditions de conservation. Ces facteurs ont été retenus également pour interpréter les essais de compression et de traction par flexion et identifier les résistances en compression et en traction en fonction des différentes formulations.

Le quatrième chapitre est consacré au comportement hygrothermique du matériau la bauge. Ce chapitre s'appuie sur une étude de la conductivité thermique et en fonction de la teneur en fibre et du type du sol. Ensuite, le comportement hygroscopique de la bauge représenté par les courbes isothermes de sorption/désorption est étudié en tenant en compte l'influence du type de mélange et de fibre. Grâce à ces courbes, une relation entre l'humidité relative et la conductivité thermique a été établie. La perméabilité à la vapeur d'eau de la bauge est étudiée afin d'avoir un paramètre important pour la modélisation de ce matériau.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives envisagées.

# I. CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre se compose de plusieurs parties qui vont du contexte de l'étude d'un point de vue environnemental jusqu'à l'étude de l'état de l'art sur les compositions et les propriétés de la bauge en tant que matériau de construction. Une partie sera également consacrée aux méthodes de préparations et de mise en œuvre de la bauge.

## I.1. Matériaux et construction durable

D'un point de vue impact environnemental, la consommation énergétique durant la vie d'un bâtiment dépend de différents facteurs : les matériaux de construction, la construction, l'usage, la maintenance et la démolition ou fin de vie. Actuellement, pour la plupart des bâtiments, la quasi-totalité de la consommation énergétique est liée à son exploitation (l'usage). Cependant, l'évolution des bâtiments vers les hautes performances énergétiques entraine une hausse de la part des matériaux de construction en défaveur de l'usage (Figure I-1).

Cela montre qu'il est nécessaire non seulement de limiter les consommations énergétiques liées à la phase d'exploitation des bâtiments (grâce aux qualités thermiques des matériaux, par exemple) mais également liées à la phase de construction (matériaux à faible énergie grise) (Magniont, 2010)

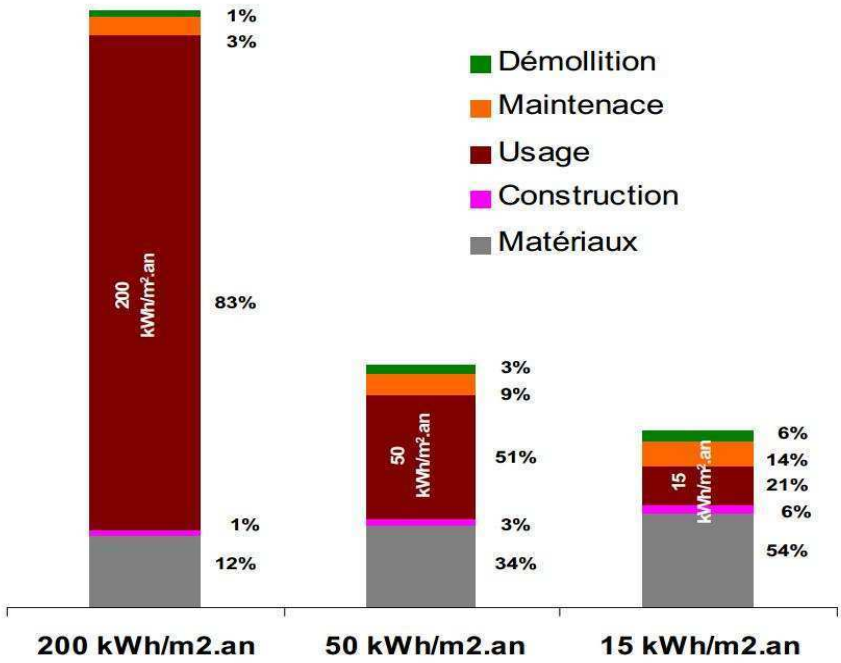



Figure I-1 : Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques (Magniont, 2010)

Le secteur du bâtiment fait donc face à une nécessité de faire évoluer ses pratiques et ses méthodes afin de répondre aux enjeux de développement durable : diminution des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre contraint par « Le Sommet de la terre à Rio » en 1992 à Rio+20 et « Le protocole de Kyoto » en 1997.

Cette évolution passe notamment par l'utilisation de matériaux à faible impact environnemental (Collet-Foucault, 2004; Menet et Gruescu, 2014; Röhlen et al., 2013). Ces deux dernières décennies ont vu donc l'apparition et le développement de nouveaux matériaux que l'on peut classer en deux catégories : La première catégorie fait notamment appel à des ressources 'biosourcées' et utilise des liants conventionnels tels que le béton de chanvre (matériau pour l'isolation, (Gourlay et al., 2017; Page et al., 2017)) et le béton à base de fibres de lin (matériau structurel, (Le Hoang, 2013; Page, 2017)). La seconde catégorie concerne les matériaux en terre crue. Leur utilisation est ancestrale mais qui rencontrent un regain d'intérêt lié à leurs propriétés d'isolation et à leur faible impact environnemental (utilisation de matériaux locaux, non recours à des liants conventionnels, recyclage aisé en fin de vie) (Achenza et Fenu, 2007; Avrami et al., 2008; Berge, 2009; Collet-Foucault, 2004; Galán-Marín et al., 2010; Hamard et al., 2016; Houben et al., 2006; Minke, 2006; Quagliarini et Lenci, 2010; Röhlen et al., 2013).

Nous aborderons par la suite les différents types de construction en terre pour se focaliser sur la bauge, objet de ces travaux de recherche.

## I.2. Différents types de construction en terre crue

La terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes depuis des milliers d'années. Aujourd'hui encore, plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des bâtiments en terre (Houben et al., 2006). Pour les pays en développement, ce pourcentage s'élève à 50% de la population rurale et à au moins 20% de la population urbaine et périurbaine. Par exemple, en Inde, en 1971, 72,2 % du parc immobilier était construit en terre. Cela représentait 67 millions de maisons où vivaient près de 375 millions de personnes. En Europe, pour de nombreux pays (Suède, Angleterre, Espagne, Portugal), l'habitat rural en terre fait partie du patrimoine culturel. En France, 15 % de la population, à majorité rurale, occupe des maisons en pisé, en adobe ou en torchis. Dans le Sud-ouest des U.S.A, la construction en adobe concerne 97 % des maisons en terre et ce type de construction progresse de 30 % par an en Californie (Houben et al., 2006). Les différents modes de construction en terre sont issus des traditions, des climats et des cultures des populations locales. Il existe une douzaine modes d'utilisation de la terre en construction dont les plus courantes sont : l'adobe, le pisé, la terre-paille, le torchis, les blocs comprimés et la bauge (Houben et al., 2006).

Au cours des dernières années, un regain d'intérêt des matériaux de construction en terre a eu lieu pour des raisons de restauration et de réparation des bâtiments historiques et culturels du patrimoine ainsi que pour une utilisation comme matériau à faible consommation d'énergie dans la construction durable (Aymerich et al., 2012). Le renouveau de l'utilisation de la terre comme est lié à la réduction significative de l'impact environnemental dû à l'utilisation de matières premières locales et de procédés de fabrication simples et économes en énergie (Achenza et Fenu, 2007; Avrami et al., 2008; Berge, 2009; Houben et al., 2006; Minke, 2000, 2006). De par son inertie thermique, la terre est un très bon régulateur de la température intérieure qui permet des économies d'énergie importantes (Hamard, 2017). La terre est également choisie par la qualité sanitaire de l'air (Röhlen et al., 2013)

### I.2.1. Les principaux modes d'utilisation de la terre en construction

#### I.2.1.1. Le pisé

La technique du pisé consiste à damer de la terre humide dans un coffrage. La terre est versée dans un coffrage par couche, avant compactage elles sont épaisses d'environ 20 cm et ramenées à moitié d'épaisseur après le compactage (Figure I-2(a)). Ainsi, pour un coffrage qui est traditionnellement haut de 90 cm, une dizaine de couches permettent de réaliser une « banchée» de pisé. Ces couches restent souvent visibles sur l'aspect du mur fini (AsTerre). Le compactage a été fait par une dame manuelle en bois ou en métal, un fouloir pneumatique, un marteau-piqueur ou par une plaque vibrante. Le mur est décoffré directement après le damage de la terre. L'épaisseur du mur dépend de la hauteur du mur mais doit être supérieure ou égale à 50 cm afin d'assurer son intégrité (Houben et al., 2006).

(a) Compactage d'un mur en pisé

(b) École d'arts plastiques Oaxaca construite partiellement en pisé (Méxique)

Figure I-2 : Construction en pisé (Sources Internet)

La teneur en argile se situe entre 5 et 20 % (François et al., 2017; Lin et al., 2017). Le pisé ne peut être mis en œuvre qu'avec une teneur en eau très précise, la marge de tolérance est faible, un mélange trop d'humide provoque un déplacement latéral de la terre au lieu d'un compactage (Röhlen et al., 2013). La teneur en eau usuelle est aux alentours de 8-12 % (Raj S et al., 2018). Une teneur en argile importante augmente le risque de retrait. Le diamètre maximum des grains est de 5 cm de diamètre et la présence des grains de plus de 5 mm de diamètre permet d'obtenir une résistance mécanique plus importante (Hugo Houben et al., 2006).

Cette technique est adaptée à la réalisation de murs massifs rectilignes (Figure I-2(b)). Concernant l'aspect esthétique, les couches successives de terres compactées sont visibles sur le mur final.

La masse volumique du pisé est comprise entre 1700 et 2400 $kg.m^{-3}$ ((François et al., 2017; Lin et al., 2017; Raj S et al., 2018; Röhlen et al., 2013). Des mélanges de pisé avec des ajouts légers peuvent avoir des masses volumiques plus légères. Le pisé doit avoir une résistance à la compression d'au moins 2 MPa s'il est porteur et une résistance à l'abrasion suffisante (Röhlen et al., 2013). Eventuellement, le pisé est stabilisé avec le ciment ou la chaux. Généralement, le ciment est utilisé avec une proportion de 3% à 6% pour limiter les impacts environnementaux et également augmenter la résistance mécanique (Suresh et Anand, 2017). Le dosage optimal de la chaux varie de 6 % à 12 %, au-delà duquel la résistance à la compression diminue (Jayasinghe et Kamaladasa, 2007). La conductivité thermique du pisé varie en fonction de la densité, elle varie entre 0,86 et 1,01 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour une densité de 1980 à 2120 $kg.m^{-3}$ (Hall et Allinson, 2009).

### I.2.1.2. Le Torchis

Le torchis est constitué d'une structure portante en bois remplie d'un mélange terre-fibre (usuellement de la paille). La terre est malaxée avec un ajout d'eau afin d'obtenir un matériau plastique qui est ensuite plaqué sur le lattis de façon à le recouvrir complètement (Figure I-3). Après séchage, il est généralement enduit de terre, parfois stabilisée à la chaux ou avec un mélange chaux-sable (Röhlen et al., 2013).

(a) Mélange du torchis

(b) Maison en torchis (AsTerre)

Figure I-3 : Construction en torchis (Sources Internet)

Le torchis est un mélange de terre argileuse et d'adjuvants divers où dominent les fibres végétales. La terre utilisée est constitué d'éléments fins, argileux et collants et contenant peu de sable (Dewulf, 2015). L'ajout de fibres permet éviter la fissuration du mélange au séchage, et la stabilité de la structure et la résistance aux intempéries (Röhlen et al., 2013).

On peut distinguer 2 grands types de mélange (AsTerre) :

- Le torchis lourd : beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature. Sa conductivité thermique est de 1,05 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Il possède une masse volumique de 1400 $kg.m^{-3}$ (1800 $kg.m^{-3}$ humide).
- Le torchis allégé : beaucoup de paille et un peu de terre. Sa conductivité thermique est de 0,12 à 0,15 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Il possède une masse volumique de 300 à 400 $kg.m^{-3}$. Il est privilégié pour l'isolation.

### I.2.1.3. L'adobe

L'adobe est une brique en terre crue façonnée à la main ou dans un moule en bois à l'état plastique et séchée à l'air libre. Actuellement, certains procédés incluent un ajout de paille afin d'obtenir une meilleure isolation thermique. Costi de Castrillo et al., (2017) suggèrent que la teneur en argile/limon pour la production d'adobe devrait être comprise entre 5 et 70 %. Dao et al., (2018) ont utilisé un sol qui se compose de 4,7 % de sable grossier, 37,9 % de sable fin (20-200 µm), 22,7 % de limon (2-20 µm) et 29,9 % d'argile (<2 µm). Les dimensions d'une brique d'adobe varient beaucoup : 60 x 40 x 5 cm, 45 x 30 x 5 cm, 50 x 36 x 5 cm, 40 x 30 x 6 cm (Costi de Castrillo et al., 2017).

(a) Séchage des adobes

(b) Mur d'une maison en adobe

Figure I-4 : Construction en adobe (Sources Internet)

Dao et al., (2018) rapportent une conductivité thermique aux alentours de 1,1 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour une masse volumique apparente de 1780 $kg.m^{-3}$. La résistance est supérieure à 2,5 MPa en compression et à 1 MPa en flexion (Dao et al., 2018).

### I.2.1.4. La BTC (Brique de Terre Compressée) et BTCS (Brique de Terre Compressée Stabilisée)

Les briques de terre compressée (BTC) et briques de terre compressée stabilisée (BTCS) sont obtenues par compression de la terre dans des presses et sont immédiatement démoulés contrairement aux briques d'adobe (Figure I-5). Pour la construction de blocs de terre compressée, Houben et al., (1996) recommandent un sol contenant : 0-40 % de gravier, 25-80 % de sable, 10-25 % de limon et 8-30 % d'argile. Pour les BTCS, en général, 3 à 19 % de chaux hydraulique ou de ciment sont utilisés, avec une moyenne de 6 à 8 %.

(a) Brique de terre compressée

(b) Cloison en brique de terre compressée

Figure I-5 : Construction en BTC (Sources Internet)

La résistance en compression moyenne d'une brique est de 2 à 4 MPa. Dans certains cas particuliers, les briques de terre atteignent 12 MPa (Röhlen et al., 2013). La BTCS est plus résistante que la BTC. Touré et al., (2017) montrent une résistance en compression de 2,5 à 4 MPa pour les BTC, et de 2 à 6 MPa pour les BTCS avec 8 % de ciment. L'épaisseur minimale d'un mur porteur en BTC ou BTCS doit être de 20 cm de largeur. Zhang et al., (2018) montrent une corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente des BTC, où les valeurs moyennes de la conductivité thermique augmentent de 0,52 à 0,93 $W.m^{-1}.K^{-1}$ avec l'augmentation de la densité apparente de 1500 à 2100 $kg.m^{-3}$.

Les avantages des BTC et BTCS sont de diminuer l'épaisseur des murs pour des caractéristiques identiques aux autres techniques et de permettre de nombreuses formes de construction (niches, arc, frises,…). Cependant, le coût de ces matériaux est plus important (Houben et al., 1996).

## I.3. Présentation de la bauge

La bauge est une technique traditionnelle de construction en terre qui est utilisée depuis des milliers d'années dans le monde entier et par tous les climats (Hugo Houben et al., 2006; Röhlen et al., 2013).

La technique de construction en bauge consiste en l'édification de murs massifs, souvent porteurs et sans coffrage, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales (ou animales) mis en œuvre par empilement des boules en terre à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage (Hamard, 2017; Hugo Houben et al., 2006; Röhlen et al., 2013) (Figure I-6). L'ajout de fibres permet de maintenir la cohésion et de limiter le retrait du matériau lors du séchage.

(a) Mélange terre-fibre pour la bauge (b) Maison individuelle en bauge en Californie

Figure I-6 : Construction en bauge (Sources Internet)

La composition de la bauge, la disponibilité de la terre et des fibres et sa structure lui confèrent des propriétés de résistances mécaniques et de confort thermo-hygrométrique qui ont contribué à sa large utilisation dans le monde. Dans ce qui suit, nous allons présenter un état de l'art sur la composition de la bauge, sa mise en œuvre et les propriétés qui en découlent.

### I.3.1. La terre crue

La terre crue est le constituant de base de la bauge. Bien que le choix du sol et ses propriétés a longtemps été réalisé in-situ en se confiant à l'expérience des constructeurs en bauge, plusieurs auteurs ((Akinkurolere et al., 2006; Hamard et al., 2016; Harries et al., 2000; Worris, 1992; Akinwumi et al., 2015) ont identifié les terres destinés à la bauge sur la base d'essais de reconnaissances géotechniques.

La granulométrie est le premier essai d'indentification de la bauge.(Akinkurolere et al., 2006; Hamard et al., 2016; Harries et al., 2000; Worris, 1992; Akinwumi et al., 2015) rapportent qu'un sol typique destiné à la bauge est constitué d'environ 30 % de graviers (> 2mm), 35 % de sable (0,063/2 mm) et 35 % de limon (0,002/0,063 mm) et d'argile (< 0,002 mm = 2 µm), avec une variation de ± 10 % (Tableau I-1).

Tableau I-1 : Composition usuelle du sol utilisé pour la bauge

| **Références** | | **Gravier (%)** | **Sable (%)** | **Limon (%)** | **Argile (%)** |
|---|---|---|---|---|---|
| Worris, (1992) | | 30-40 | 25-30 | 10-20 | 10-25 |
| Saxton, (1995) | | 30 | 35 | 35 | |
| Harries et al., (1995) | Site de Trillow | 22 | 16 | 34 | 28 |
| | Site de Hayne Barton | 2 | 28 | 42 | 18 |
| Goodhew, (2000) | | 25 | 54 | | 21 |
| Akinkurolere et al., (2006) | | 67 | >19,2 | <13,8 | |
| Bouhicha et al., (2005) | Sol A | 0 | 15 | 45 | 40 |
| | Sol B | 0 | 43 | 29 | 28 |
| | Sol C | 0 | 40 | 39 | 21 |
| | Sol D | 0 | 31 | 42 | 26 |
| Quagliarini et al., (2010) | | 0 | 17 | 49 | 34 |
| | | 0 | 13,5 | 50,5 | 36 |
| Pullen et Scholz, (2011) | Sol A | 20 | > 76 | < 4 | |
| | Sol B | 16 | > 79 | < 5 | |
| | Sol C | 20 | > 78 | < 2 | |
| | Sol D | 4 | > 94 | < 2 | |
| | Sol E | 20 | > 66 | < 14 | |
| | Sol F | 25 | > 72 | < 3 | |
| Clark, (2013) | | 30-75 | | 10-30 | 10-40 |
| Böttger et Rizza, (2013) | | 6 | 43 | 51 | |
| Miccoli et al., (2014) | | 18 | | 61 | 21 |
| Akinwumi et al., (2015) | Sol A | 8 | 61 | 16 | 15 |
| | Sol B | 4 | 67 | 15 | 14 |
| | Sol C | 28 | 43 | 14 | 15 |

### I.3.1.1. Fraction fine : argile et limon

L'argile présente dans les terres de la bauge agit comme un liant sur les autres constituants (sable, graviers et fibres) de la bauge et lui apporte de la cohésion. Les particules d'argiles sont formées par un empilement de feuillets de minéraux de silicates d'alumine hydratés et classées en trois grandes familles selon l'empilement des feuillets siliceux et hydro-alumineux : la Kaolinite, l'Illite et la Smectite (Addison Greer, 1996; Delage et Cui, 2000). Leurs structures particulières engendrent une interaction plus ou moins forte avec l'eau et modifient ainsi les propriétés de la terre. Parmi ces propriétés, la teneur en eau et la plasticité revêtent une importance capitale pour la bauge (Addison Greer, 1996; Harries et al., 1995; Pullen et Scholz, 2011).

De façon générale, si la teneur en argile est trop faible, il y n'a pas assez de liaison entre les particules du sol (Bouflet et Jacoutot, 1982). Une teneur minimale de 15 % est avancée par (Akinkurolere et al., 2006). En revanche, une grande teneur en argile peut entrainer un retrait de séchage du matériau et des fissures pouvant affaiblir le matériau. A ce titre, certains auteurs (Harries et al., 1995; Miccoli et al., 2014; Simons et al., 2015) recommandent des terres avec des argiles à structures stables telles que la kaolinite et l'illite.

Tableau I-2 : Variation de l'IP en fonction de la teneur en de limon/argile

| **Références** | | **Limon/Argile (%)** | **$W_L$ (%)** | **$W_P$ (%)** | **$I_P$** | **W du mélange terre/fibres (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Saxton, (1995) | | 35 | 40 | 20 | 20 | 17-29 |
| Harries et al., (1995) | Site de Trillow | 28 | 43 | 27 | 15 | 20-25 |
| | Site de Hayne Barton | 18 | 28 | 20 | 8 | 20-25 |
| Akinkurolere et al., (2006) | | < 13,8 | 40 | 16 | 24 | |
| Bouhicha et al., (2005) | Sol A | 40 | 56 | 23 | 33 | 28 |
| | Sol B | 28 | 32 | 14 | 18 | 19 |
| | Sol C | 21 | 31 | 17 | 14 | 19 |
| | Sol D | 26 | 39 | 21 | 18 | 25 |
| Quagliarini et al., (2010) | Terre originale | 34 | 38 | 19 | 19 | 28 |
| | Terre jaune | 36 | 42 | 21 | 21 | 28 |
| Pullen et Scholz, (2011) | Sol A | < 4 | 36 | 27 | 9 | 26 |
| | Sol B | < 5 | 37 | 31 | 6 | 26 |
| | Sol C | < 2 | 41 | 28 | 13 | 23 |
| | Sol D | < 2 | 28 | 25 | 3 | 25 |
| | Sol E | < 14 | 23 | 22 | 1 | 18 |
| | Sol F | < 3 | 38 | 32 | 6 | 24 |
| Böttger et Rizza, (2013) | | 51 | 52 | 32 | 20 | - |
| Akinwumi et al., (2015) | Sol A | 15 | 29 | 7 | 22 | - |
| | Sol B | 14 | 26 | 12 | 14 | - |
| | Sol C | 15 | 24 | 12 | 12 | - |

Le Tableau I-2 présente la variation de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en limon et argile. Le résultat montre une variation d'importante de l'$I_P$, allant de 1 % pour un sable jusqu'à 33 % pour une argile limoneuse. Cette variation est due à la variation de la teneur en limon/argile, qui a besoin de plus d'eau pour passer de l'état plastique à l'état liquide (les sols de (Bouhicha et al., 2005) par rapport aux sables de (Pullen et Scholz, 2011)). On peut

observer également que l'$I_P$ est corrélé à la teneur en eau du mélange terre-fibre lors de la mise en œuvre la bauge. Ainsi, plus cet indice est important, plus la teneur en eau requise pour avoir un mélange homogène est importante (Harries et al., 1995).

Houben et al., (2006) recommandent une teneur en eau entre 15 et 30 % pour la construction en bauge. Cela correspond à un état intermédiaire entre l'état liquide et l'état plastique, pendant lequel on peut façonner très facilement des boules de terre homogènes.

### I.3.1.2. Les graviers, les sables et les limons

Les particules de graviers, de sable et de limons sont destinées à former le squelette granulaire qui confère de la résistance au matériau (Bouflet et Jacoutot, 1982; Clark, 2013; Harries et al., 1995; Reeves et al., 2006; Saxton, 1995; Watson et McCabe, 2011). Les sols avec une granulométrie étalée (un grand coefficient d'uniformité Cu > 2) sont recommandés grâce à leur structure permettant d'augmenter la densité de la bauge et donc sa résistance mécanique (Reeves et al., 2006; Watson et McCabe, 2011).

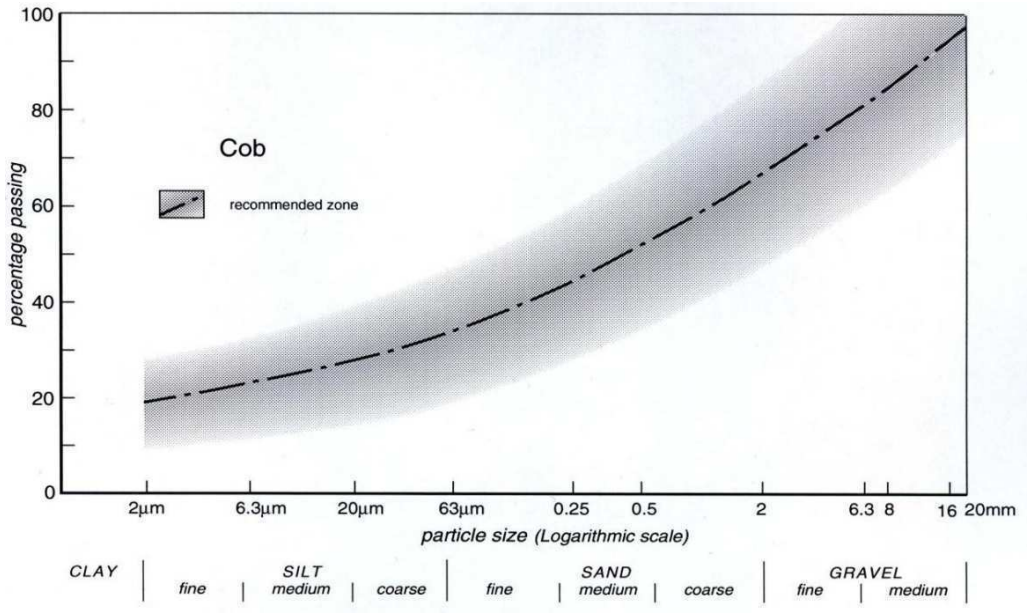



Figure I-7 : Courbe granulométrique recommandé par (Clark, 2013)

La Figure I-7 présente un faisceau de courbes granulométriques recommandé pour la construction en bauge par (Clark, 2013). Cette zone présente une distribution régulière avec approximativement 1/3 de gravier, 1/3 de sable et 1/3 de limon et argile. Akinwumi et al., (2015) ont analysé des terres issues des anciens murs. La Figure I-8 présente les courbes granulométriques où l'on constate que les 3 sols diffèrent par leurs teneurs en graviers (28 % > à 2 mm pour le sol C contre 8 et 4 % > à 2 mm respectivement pour les sols A et B).

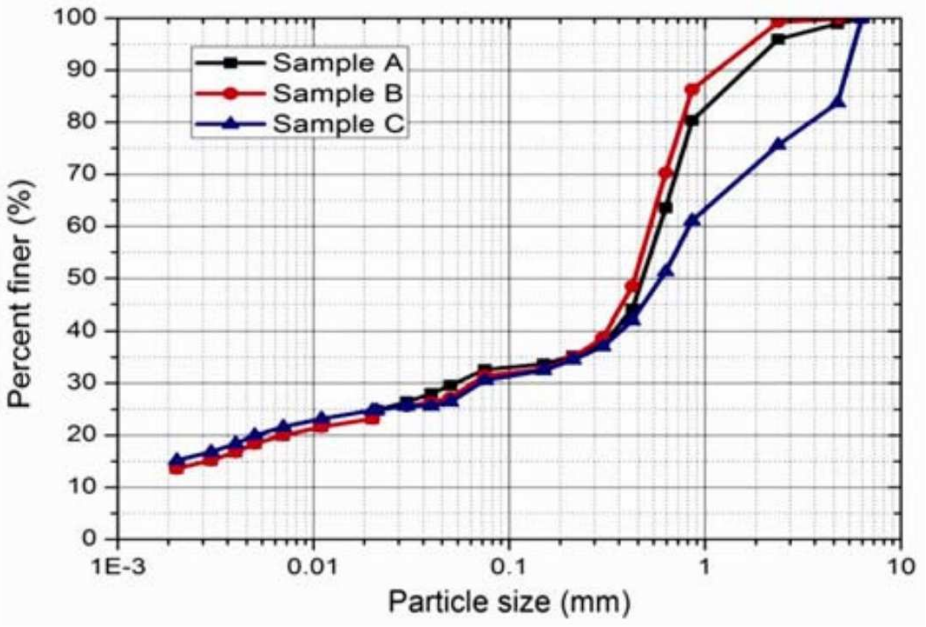



Figure I-8 : Courbes granulométriques de la terre des anciennes maisons

### I.3.2. Les fibres

L'utilisation de fibres végétales présente deux principaux avantages en tant que renfort dans les matériaux composites tels que la bauge. Tout d'abord, les fibres sont largement disponibles à faible coût (Akbulut et al., 2007 ; Crockford et al., 1993, Gregory et Chill, 1998) et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les fibres agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à l'utilisation de fibres polymères étant donné leur caractère renouvelable, neutre vis-à-vis des émissions de $CO_2$ et peu énergivore à la production (Baley, 2005).

Les fibres peuvent être regroupées selon leur origine :

- Les fibres minérales : elles sont soit directement issues de roches (amiante), soit artificiellement produites à partir de minéraux (fibre de verre ou fibre de carbone).
- Les fibres animales : proviennent des poils, telle que la toison animale et des sécrétions telle que la soie.
- Les fibres végétales (Baley, 2005) (Figure I-9): les fibres provenant de graines (coton, kapok) ; les fibres extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ; les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), et d'enveloppes de fruits (noix de coco).

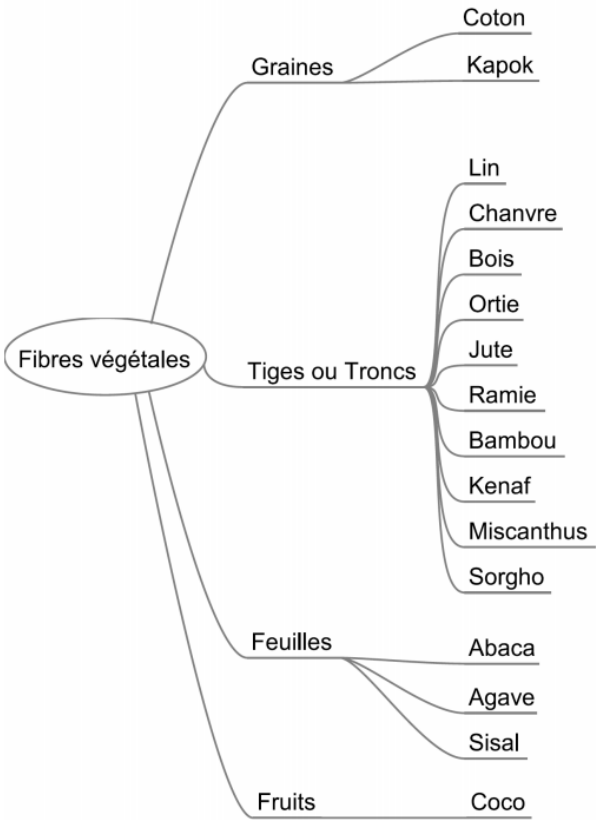



Figure I-9 : Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines (Baley, 2005)

### I.3.2.1. Apport de l'incorporation des fibres dans la matrice du sol

Les exemples de la littérature (Abtahi et al., 2010; Baker, 1997; Kumar et al., 2006; Maher et Gray, 1990; Ola, 1989; Yetimoglu et Salbas, 2003) montrent que les mélanges sol-fibres sont considérés comme des matériaux renforcés de deux façons. Dans la première, les fibres sont distribuées aléatoirement pour une résistance améliorée de façon uniforme. Dans la seconde, les fibres sont orientées dans une direction tel qu'un géotextile, avec pour conséquence une résistance renforcée dans la direction souhaitée.

La présence de fibre a pour conséquence une diminution de la propagation des fissures à la traction après déformation initiale, du nombre de fissures causées par le retrait et une diminution de la conductivité hydraulique des terres argileux compacté (Miller et Rifai, 2004; Tang et al., 2010) et du poids des ouvrages en terre (Khedari et al., 2005).

L'adhérence entre les fibres et le sol dépend des deux facteurs suivants (Hejazi et al., 2012):

- La résistance au cisaillement et propriétés de cohésion du sol en raison de la rugosité de la fibre ;
- Le frottement sur la surface des fibres due au retrait du sol ;

Ces deux facteurs sont affectés par le changement des dimensions des fibres causées par les changements d'humidité et de température. En effet, lorsque la fibre absorbe de l'eau, elle gonfle et pousse sur la matrice du sol. Après séchage, la fibre perd l'eau absorbée mais la matrice de terre reste inchangée. Par conséquent, un espace vide se forme autour de la fibre et diminue donc la force de la liaison terre-fibre.

### I.3.2.2. Fibres naturelles utilisées dans la construction en terre

#### A- Fibre de coco

La fibre de coco est une fibre végétale naturelle qui entoure et protège la noix de coco (Figure I-10). La longueur usuelle est de 50 à 350 mm. La fibre se compose principalement de lignine, tanins, cellulose, pectine et d'autres substances solubles dans l'eau.

a) Noix de coco

b) Fibre de coco

Figure I-10 : La noix de coco (a) et les fibres de coco (b) (Sources Internet)

La durée de vie de cette fibre est située entre 4 et 10 ans. Elle possède un fort coefficient d'absorption d'eau (entre 130 et 180 %) et son diamètre varie de 0,1 à 0,6 mm (Rowell M et al., 2000). Sa résistance à la traction varie entre 108,26 et 251,90 MPa, son allongement est très élevé (de 13,70 à 41 %) (Tolêdo Filho et al., 2000). Ces fibres conservent 80 % de leur résistance à la traction après 6 mois au sein d'une argile. Leurs propriétés permettent également de diminuer le gonflement du sol.

**B- Fibre de sisal**

Le sisal est une fibre lingo-cellulose dont le coefficient d'absorption d'eau est de 60 à 70 % d'eau et le diamètre de 0,06 mm à 0,4 mm (Figure I-11). Les fibres sont extraites à partir de feuilles large entre 6 et 10 cm et de longueur entre 50 et 250 cm (Mishra et al., 2004). (Ghavami et al., 1999) a montré que l'ajout de 4 % de fibre de sisal ou de coco confère au sol une ductilité et augmente lentement la résistance à compression,.

Prabakar et Sridhar, (2002) ont utilisé des ajouts de 0,25 % ; 0,5 % ; 0,75 % ; 1 % en poids de fibres de sisal avec 4 longueurs différentes (10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm) pour renforcer le sol. Les résultats montrent que la résistance au cisaillement est maximale (66 kPa) pour une longueur de 20 mm et pour une teneur de 0,75 %.

a) Plante de sisal

b) Fibre de sisal

Figure I-11 : Les plantes de sisal (a) et les fibres de sial (b) (Sources Internet)

**C- Fibre de palmier**

Les fibres de palmier possèdent une texture en forme de filaments (Figure I-12).

a) Palmier

b) Fibres de palmiers

Figure I-12 : La plante de palmier (a) et la fibre de palmier (b) (Sources Internet)

Jamellodin et al., (2010) ont montré que les fibres de palmier inter-verrouillent les particules de sol et les groupent dans une matrice unitaire, donc les propriétés mécanique du sol peuvent augmentées. Une étude de (Ahmad et al., 2010) a rapporté que l'ajout de 0,5 % en

poids de fibre de palme de 30 mm à un sable limoneux augmentait l'angle de frottement interne de 25 % et la cohésion de 30 % par rapport à un sol naturel.

**D- Fibre de jute**

Le jute est cultivé dans les régions tropicales dont les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh (Figure I-13). Les fibres de jute sont extraites de l'écorce de plantes de jute qui a 2,5 m de long et 2,5 cm de diamètre. Cette fibre est cultivée pour la production textile poreuse qui est majoritairement utilisé pour la filtration, le drainage et la stabilisation du sol.

Figure I-13 : Les plantes de jute (Sources Internet)

Le jute semble être le plus efficace parmi les fibres sélectionnées (paille, chanvre et jute) puisque le jute améliore à la fois la ductilité et la ténacité du matériau adobe avec une diminution légèrement en résistance en compression. La teneur en jute optimal est de 2 % en masse et la longueur optimale est de 2 cm, (Islam et Iwashita, 2010).

**E- La paille**

La paille de blé et d'orge est une plante à récolte bisannuelle largement cultivée dans le monde entier (Figure I-14). C'est la fibre la plus couramment utilisée dans la bauge (Hamard et al., 2016). Au cours du XIXe siècle, l'évolution des pratiques agricoles a généré un excès de paille qui a pu être utilisé dans la construction en bauge comme une source matériau locale (Petitjean, 2003; Weismann et Bryce, 2010).

Figure I-14 : La paille d'orge (Sources Internet)

Le rôle des fibres à l'intérieur des murs en bauge est de (Hamard et al., 2016) :

- Faciliter de mélanger et de manipuler,
- Accélérer le processus de séchage,
- Distribuer des fissures de retrait dans toute la masse du mur,
- Améliorer la cohésion et la résistance au cisaillement du mur,
- Améliorer la résistance aux intempéries, renforcer les angles des parois.

Bouhicha et al., (2005) ont montré que l'ajout de paille d'orge dans la terre permettait de réduire le retrait et le temps de durcissement et d'améliorer les résistances à la compression, à la flexion et au cisaillement. Abtahi et al., (2010) ont montré que les fibres de paille d'orge permettaient d'obtenir une résistance au cisaillement du sol plus importante qu'avec les fibres Kenaf.

Nous reviendrons sur les caractéristiques de la paille en tant que composant de la bauge dans les sections suivantes.

### I.3.2.3. Caractéristiques de la paille utilisée dans la bauge

La technique de construction en bauge est généralement associée à l'addition de fibre de paille. Les principales caractéristiques de la paille couramment citées sont : leurs longueurs, leurs résistances à la traction et leurs teneurs. Le Tableau I-3 résume ces caractéristiques d'après différentes études.

Tableau I-3 : Caractéristiques des fibres utilisées pour la bauge

| **Références** | | **Type de fibre** | **Diamètre (mm)** | **Longueur (mm)** | **Résistance en traction (MPa)** | **Teneur en fibre en masse (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Worris, (1992) | | Paille | - | - | - | 1,5-2 |
| Saxton, (1995) | | Paille | - | - | - | 0-3 |
| Harries et al., (1995) | Site de Trillow | Paille | - | - | - | 0-3 |
| | Site de Hayne Barton | Paille | - | - | - | 0-3 |
| Goodhew, (2000) | | Paille | - | - | - | 1,25 |
| Akinkurolere et al., (2006) | | Paille | - | - | - | 0-3 |
| Bouhicha et al., (2005) | Sol A | Paille | 1-4 | 10-20, 20-40, 40-60, 100-200 | - | 0-3,5 |
| | Sol B | Paille | 1-4 | | - | 0-3,5 |
| | Sol C | Paille | 1-4 | | - | 0-3,5 |
| | Sol D | Paille | 1-4 | | - | 0-3,5 |
| Quagliarini et al., (2010) | | Paille | - | 50-100 | - | - |
| | | Paille | - | 50-100 | - | - |
| Pullen et Scholz, (2011) | Sol A | Paille | 1,25 | 150 | 16,55 | - |
| | Sol B | Paille | 1,5 | 300 | 17,93 | - |
| | Sol C | Paille | 4 | 200 | 4,83 | - |
| | Sol D | Paille | 2,25 | 87,5 | 13,10 | - |
| | Sol E | Paille | 2,75 | 175 | 7,58 | - |
| | Sol F | Paille | 4 | 225 | 3,45 | - |
| Clark, (2013) | | Paille | - | - | - | 1-3 |
| Böttger et Rizza, (2013) | Bauge conventionnelle | Paille | - | - | - | 0,7 |
| | Bauge avec les fibres longues | Paille | - | - | - | 2,1 |
| | Bauge avec les fibres courtes | Paille | - | - | - | 2,6 |
| Miccoli et al., (2014) | | Paille | - | 200-300 | - | 1,3-2 |

La longueur des fibres de paille utilisées est variable : 10 à 20 cm pour les petites fibres et 40 à 60 cm pour les fibres longues. Il est à noter que la longueur des fibres est souvent égale à la largeur du mur (Hamard et al., 2016). Quant à leur résistance à la traction, Pullen et Scholz, (2011) rapportent une résistance en traction variable de 3,45 à 18 MPa avec une moyenne de

10,34 MPa. Cette résistances est plus faible que celle du lin, du chanvre, du sisal et de la fibre de coco (Magniont, 2010)).

Certains auteurs (Watson et McCabe, 2011; Weismann et Bryce, 2010; Ziegert, 2003) ont montré que les fibres contribuent à l'isolation thermique de la paroi. Pourtant, Keefe, (2005) note que la réduction de la conductivité thermique d'un mur en bauge n'est significative que si une grande quantité de fibres est ajoutée au mélange (environ 25 % en masse) sachant que la teneur en fibres de la bauge est généralement comprise entre 1 et 3,5 % en masse (Tableau I-3).

## I.4. Méthode de mise en œuvre de la bauge

La procédure de mise en œuvre d'un mur en bauge suit généralement les étapes suivantes (Figure I-15) :

- Choix, préparation du sol et des fibres et mélange de la terre-fibres (Figure I-15(a)).
- Empilement de boules de terre sur le soubassement en pierre jusqu'à atteindre la hauteur souhaité de la couche de bauge (Figure I-15(b)).
- Séchage du mur et rectification éventuelles des surfaces avant ajout des couches suivantes (Figure I-15(c)).

(a) Mélange terre-fibre

(b) Empilement de la bauge

(c) Séchage et rectification du mur

Figure I-15 : Mise en œuvre d'un mur en bauge

### I.4.1. Préparation du mélange terre-fibre in-situ

Le mélange a eu lieu souvent sur une surface plane, dure si possible (Worris, 1992) et imperméable. La terre est étalée sur cette surface et disposée en forme circulaire (1-6 m de diamètre) à côté du mur (Conventry, 2004), ou une bande de terre continu (0,5-1,8 m de large) tout autour du futur bâtiment et à côté des murs (Petitjean, 2003). La terre est étendue pour former une couche de quelques centimètres d'épaisseur à 10 cm d'épaisseur (Worris, 1992). Les fibres sont uniformément réparties sur la terre (Addison Greer, 1996; Conventry, 2004; Petitjean, 2003; Röhlen et al., 2013; Worris, 1992) et tout est foulé par les hommes (Addison Greer, 1996; Keefe, 2005; Petitjean, 2003; Röhlen et al., 2013; Worris, 1992) ou par des animaux (Petitjean, 2003; Worris, 1992), généralement des chevaux. Au cours du mélange, les fibres sont ajoutées progressivement (Conventry, 2004) et la teneur en eau est corrigée par les artisanats (Bouflet et Jacoutot, 1982; Keefe, 2005; Röhlen et al., 2013).

La teneur en eau de fabrication est de l'ordre de 20 % (Hamard et al., 2016), elle correspond à l'état plastique du mélange (Bouflet et Jacoutot, 1982; Röhlen et al., 2013). Le mélange terre-fibre est plus facile et plus efficace si la terre est pré-trempée et le mélange réalisé sur le "côté humide" de l'état plastique (Addison Greer, 1996; Keefe, 2005; Röhlen et al., 2013; Saxton, 1995; Watson et McCabe, 2011). Le but du mélange est de répartir uniformément l'argile, l'eau et les fibres dans le mélange de bauge afin de maximiser la surface de contact entre les argiles et les autres constituants du mélange (Addison Greer, 1996; Keefe, 2005; Röhlen et al., 2013; Saxton, 1995; Watson et McCabe, 2011; Worris, 1992).

### I.4.2. Mise en œuvre de la bauge in-situ

Pour construire des murs en bauge, plusieurs techniques sont utilisées (Hamard et al., 2016) notamment par empilement de boules/blocs de mélanges terre-fibres.

La première technique de construction en bauge traditionnel est la plus répandu. Le matériau est prélevé du mélange de bauge avec une fourche et remis sur le mur par un artisan, qui arrange les boules de terre. Les boules de terre sont disposées de sorte qu'elles dépassent des deux côtés du mur de 5 à 15 cm (Fenard et al., 1984; Watson et McCabe, 2011; Worris, 1992). Par la suite, la bauge est compactée par piétinement. Cette méthode est décrite comme une méthode 'lente', car le mur doit sécher pendant plusieurs jours ou semaines avant qu'une autre couche puisse être mise en place dessus. Au Royaume-Uni, plusieurs auteurs (Keefe, 2005) cité par (Hamard et al., 2016) se réfèrent à une autre méthode dite « rapide» Celle-ci consiste à empiler des blocs de terre (formés à base du mélange terre-fibre) en petits rangs (environ 8 cm) et les rangs sont séparés par une couche de paille. Selon (McCann, 2004), les murs ont été construits en 1 jour grâce à cette méthode. Dans cette technique, les couches de fibres ont un rôle structural significatif à l'état frais.

Le deuxième technique, le mélange terre-fibre a été étalé sur le sol en une couche de 10 cm d'épaisseur et coupé en carrés de 20 à 30 cm de coté (Agarwal, 1981) avec un outil tranchant (Figure I-16). Ces petits blocs rectangulaires peuvent être laissés à sécher avant d'être placés dans le mur (Lebas et al., 2007).

(a) Bloc en carrée du mélange terre-fibre

(b) Mur en bauge

Figure I-16 : Mise en œuvre de la bauge avec la méthode « rapide » (Sources Internet)

La troisième technique utilise des coffrages pour la construction en bauge (Keefe, 2005; Novotný, 2014; Worris, 1992). Selon Keefe (2005), le mélange terre-fibre est plus humide que celui pour lequel il n'y a pas de coffrage. Donc, dans ce cas, les temps de séchage sont plus longs.

Le mur en bauge peut également être fabriqué en assemblant des blocs de bauge préfabriqués (Collet-Foucault, 2004) (Figure I-17). Dans ce cas, les matières premières sont mélangées dans un malaxeur. Une fois le mélange homogène, il est placé dans des moules puis comprimé manuellement et séchés à l'air. Cette technique permet un gain de temps sur les chantiers et une diminution du temps de séchage du mur.

Figure I-17 : Empilement de blocs de bauge préfabriqués (Festival Grains d' Isère)

Quant aux épaisseurs des murs en bauge, elle varie de 10 à 150 cm avec une moyenne de 62 cm (Hamard et al., 2016), entre 45 et 60 cm (Saxton, 1995), entre 30 et 90 cm (Worris, 1992). Hamard et al., (2016) rapportent que l'épaisseur des murs était de 80-90 cm au 17ème siècle. Elle a diminué à 50-60 cm au 18ème siècle pour atteindre 45-50 cm au cours du 19ème siècle. Avec le temps la technique était mieux maitrisée, permettant aux artisans de construire des parois de plus en plus minces.

## I.5. Propriétés de la bauge

### I.5.1. Cinétique de séchage et retrait

#### I.5.1.1. Cinétique de séchage

Pour réaliser un mur en bauge, une période de séchage indispensable de une à quatre semaines est nécessaire entre les différentes levées. Le séchage est donc l'étape la plus chronophage pour la fabrication d'un mur bauge. La capacité de séchage de la bauge est donc une caractéristique très importante. Les fibres accélèrent le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres (Hibouche, 2013; Houben et al., 2006; Keefe, 2005; Saxton, 1995).

Plusieurs auteurs (Akinkurolere et al., 2006; Saxton, 1995) ont étudiés la capacité de séchage de la bauge. La Figure I-18 présente les pertes de masse d'échantillons cylindriques de bauge avec différentes teneurs en fibre : 0 ; 1,6 ; 2 et 3 % (Saxton, 1995). Nous constatons que ces courbes présentent une première partie où la capacité de séchage ne semble pas être influencée par la teneur en paille. Cela correspondrait à un retrait uniforme des échantillons de bauge. Au-delà, les pertes d'eau sont variables en fonction des formulations et donc de la teneur en fibres. Plus la teneur en paille est élevée, plus les pertes d'eau sont importantes.

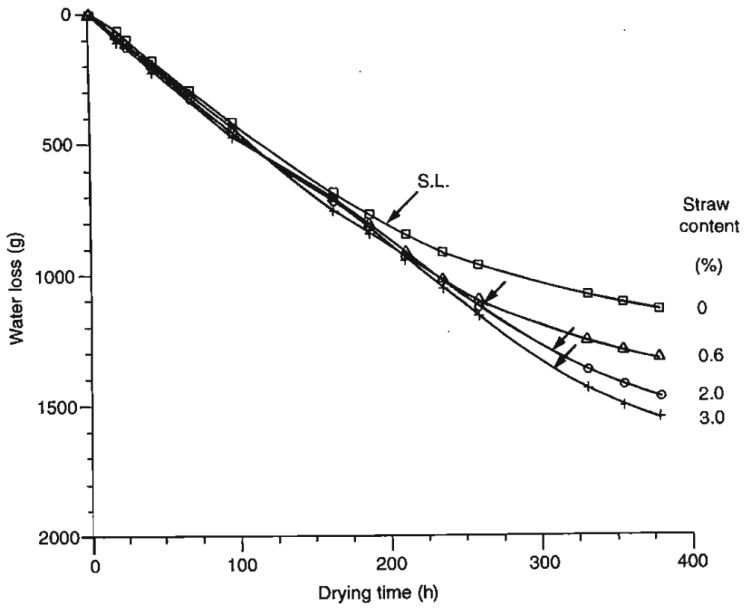



Figure I-18 : Cinétique de séchage des échantillons cylindriques Ø150xH300 mm (Saxton, 1995)

Akinkurolere et al., (2006) montrent que la cinétique de séchage ne semble pas être influencée par la teneur en fibre ou la teneur en eau et est relativement uniforme jusqu'à la fin du retrait (aux alentours de 192 jours) (Figure I-19).

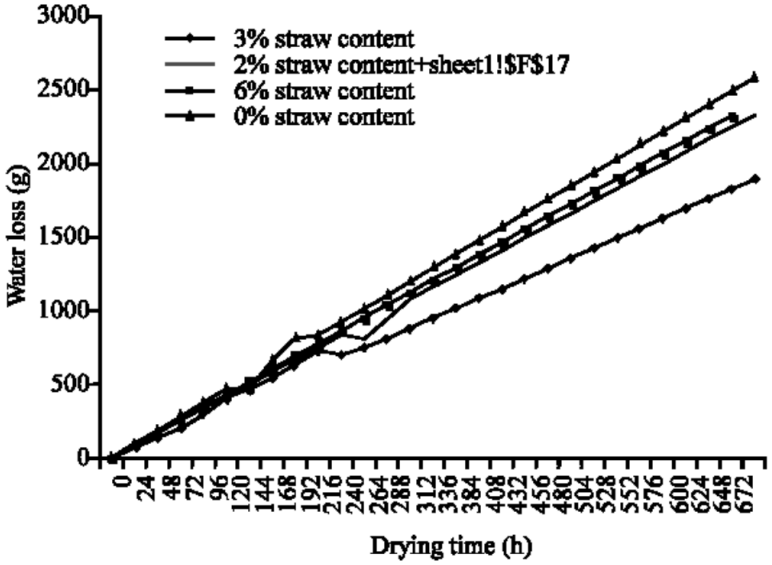


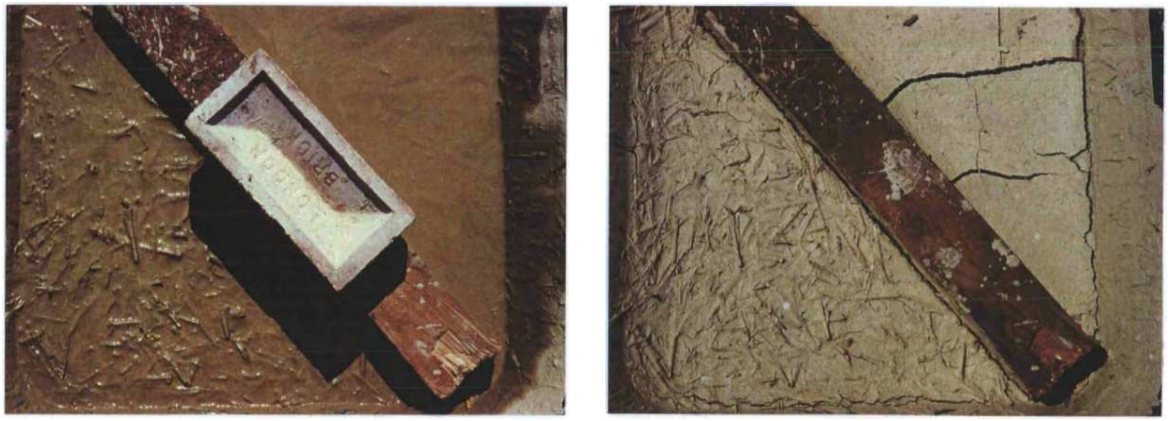

Figure I-19 : Cinétique de séchage de la bauge aux différentes teneurs en fibre

### I.5.1.2. Retrait

Quagliarini et al., (2010) rapportent que la paille peut réduire le retrait hygrométrique en raison de sa résistance à la traction et surtout de sa capacité à libérer l'eau lentement. Cela peut être expliqué par la présence des fibres sur la surface extérieure des échantillons de bauge qui limitent considérablement le retrait du matériau. Conventry, (2004) a constaté un retrait de moins de 2 % de la bauge pour un ajout de 2 % de fibre de paille dans un sol contenant moins de 25 % d'argile. Pullen et Scholz, (2011) rapportent quant à lui un retrait vertical moyenne de 0,9 % et un retrait radial de 1,6 % pour les échantillons cylindrique de Ø150xH300 mm.

#### A- L'influence des fibres sur le retrait de la bauge

Pendant le séchage de la bauge, Addison Greer, (1996) a constaté que les fibres permettent de distribuer le retrait dans tout le volume du matériau. Sans fibre, le retrait se concentre dans quelques endroits à travers le matériau avec l'apparence de grandes fissures. Cet effet de la présence des fibres sur le comportement du retrait et de l'apparition de fissures dans un mélange de bauge humide est illustré dans les Figure I-20 et Figure I-21.



(a) Etat frais de la bauge avec et sans fibre (b) Etat sec de la bauge avec et sans fibre

Figure I-20 : La bauge avec et sans fibre à l'état frais et à l'état sec (Addison Greer, 1996)

(a) Surface de la bauge renforcé par les fibres (b) Surface de la bauge sans fibre

Figure I-21 : La surface de la bauge renforcée par les fibres et sans fibre à l'état sec (Addison Greer, 1996)

Akinkurolere et al., (2006) et Saxton, (1995) ont montré que les mélanges qui contiennent le plus de paille (et qui contiennent davantage d'eau pour obtenir un mélange approprié), ces mélanges ont tendance à rétrécir davantage. Plus la teneur en fibres est élevée, plus le retrait de séchage est important (Figure I-22). En revanche, une teneur en paille plus élevée permet une nette réduction des fissures dites capillaires. Ces fissures se développant davantage dans les échantillons à faible teneur en paille. La résistance à la traction de la paille a probablement contribué à réduire la fissuration, même si le changement de volume global est plus important.

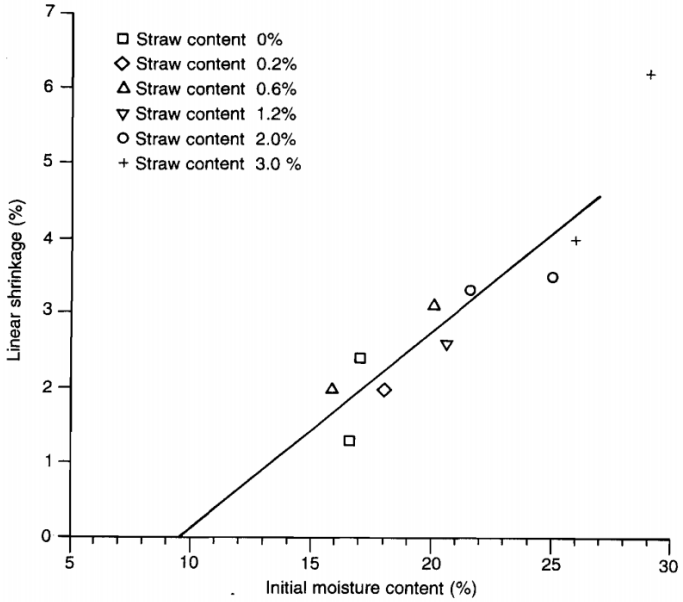



Figure I-22 : Le retrait en fonction de la teneur en eau initial et de la teneur en fibres (Saxton, 1995)

Bouhicha et al., (2005) ont étudié le retrait de quatre différents sols renforcé par la paille avec différentes de longueur et à différentes de teneur en fibre : 0 % ; 1,5 % ; 2,5 % et 3,5 % (Tableau I-3). La teneur en eau des différents mélanges est maintenue constante. Les résultats montrent que le retrait augmente avec le temps pour tous les sols et diminue avec l'augmentation de la teneur en fibre (Figure I-23) car les fibres empêchent la déformation du mélange. Pour le sol A, le retrait diminue d'environ 72 % pour un ajout de 3,5 % de fibre, par rapport au sol sans fibres.

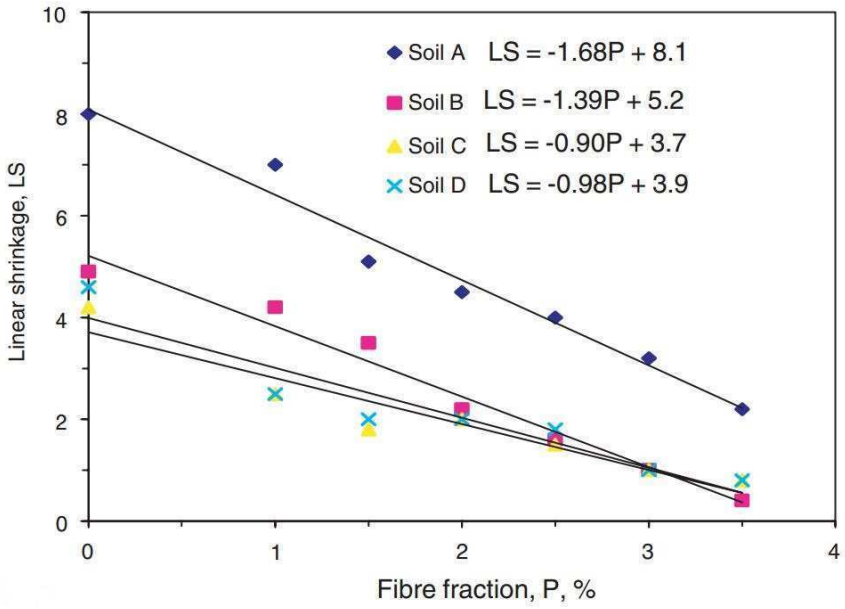



Figure I-23 : Variation du retrait en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005)

Une légère diminution du retrait est observée avec l'augmentation de la longueur des fibres et ce grâce à une plus forte liaison entre la matrice terre et les fibres (Figure I-24). Par ailleurs, Bouhicha et al., (2005) observent que le retrait se stabilise tôt avec une teneur en fibre plus importante, du fait d'un séchage plus rapide grâce à la paille qui accélère l'évaporation de l'eau.

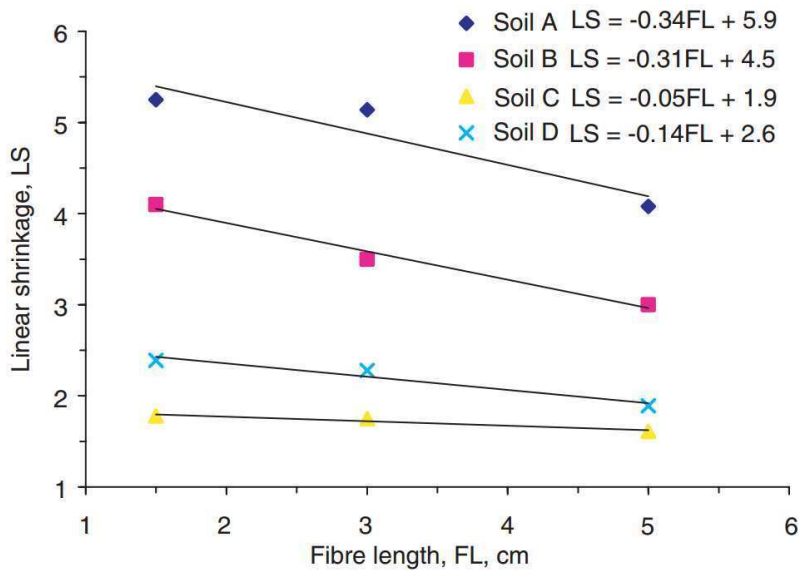



Figure I-24 : Variation du retrait en fonction de la longueur de fibre (Bouhicha et al., 2005)

**B- L'influence du type de terre sur le retrait de la bauge**

La Figure I-25, tiré des travaux de Bouhicha et al., (2005), montre que le retrait volumique est plus important pour un sol argileux (sol A). Le retrait volumique est de 9,2 % pour le sol A alors qu'il est de 2,5 % pour les 3 autres sols pour une même teneur en fibres de 3,5 % de fibre. Paulus, (2015) note que l'ajout de sable permet de réduire le retrait. Les grains de sable créent un squelette rigide qui s'oppose au retrait en masse de l'argile. Une augmentation de l'équivalent sable de 31 % à 45 % peut réduire le retrait volumique de 5 % à 3 % d'environ (Figure I-26).

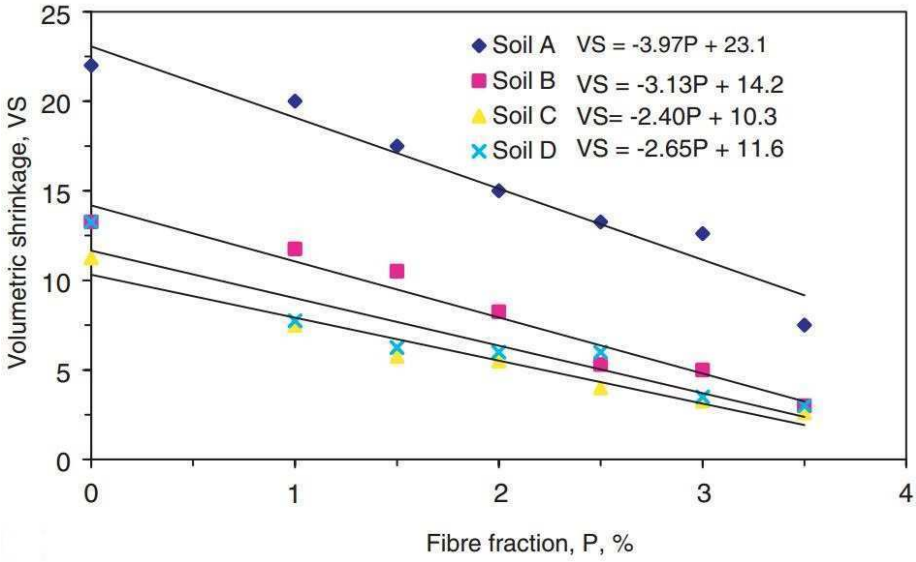



Figure I-25 : Variation du retrait volumique en fonction du type de terre et de la teneur en fibres (Bouhicha et al., 2005)

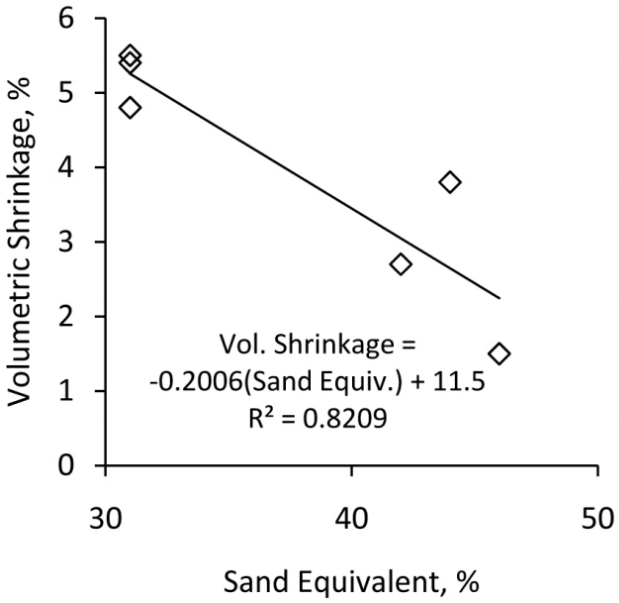



Figure I-26 : Variation du retrait volumique en fonction de l'équivalent sable (Pullen et Scholz, 2011)

## I.5.2. Comportement mécanique de la bauge

### I.5.2.1. Comportement en compression

La résistance mécanique est un des paramètres essentiels de la bauge qui permet à celle-ci, contrairement au torchis, d'assurer la stabilité structurelle d'un bâtiment. Actuellement, en France, aucune norme ni guide ne fixent de performances mécaniques à atteindre pour la construction en bauge.

Selon la bibliographie, la résistance en compression de la bauge est présentée sur le Tableau I-4:

Tableau I-4 : Résistance en compression de la bauge

| **Références** | | **Densité ($kg.m^{-3}$)** | **$R_c$ (MPa)** | **Type d'échantillon** |
|---|---|---|---|---|
| Ziegert, (2003) | | 1400-1700 | 0,45-1,40 | Cubique : 15, 20,30 cm |
| Böttger et Rizza, (2013) | Bauge conventionnelle | 1505 | 0,60 | Prismatique : 12,7x20x25,4 cm |
| | Bauge avec les fibres longues | 977 | 0,28 | Prismatique : 12,7x20x25,4 cm |
| | Bauge avec les fibres courtes | 1009 | 0,52 | Prismatique : 12,7x20x25,4 cm |
| Pullen et Scholz, (2011) | Sol A | 1473 | 0,70 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| | Sol B | 1489 | 0,74 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| | Sol C | 1585 | 0,62 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| | Sol D | 1521 | 0,45 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| | Sol E | 1650 | 0,82 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| | Sol F | 1490 | 0,89 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |
| Miccoli et al., (2014) | | 1475 | 1,59 | Prismatique : 42x42x11,5 cm |
| Conventry, (2004) | | 1792-2128 | 0,37-1,12 | Cylindrique : Ø15xH30 cm |

Parmi les matériaux de construction en terre, la bauge a la plus faible résistance à la compression ; 0,6 MPa (Röhlen et al., 2013) en comparaison par rapport à 1 à 3 MPa du pisé, 2 à 4 MPa de la brique de terre comprimé (certaines cas particuliers de briques de terre stabilisé atteignent jusqu'à 12 MPa). Cependant, cette résistance est suffisante pour une maison en 2 étages (Harries et al., 1995), ou 3 étages (Akinkurolere et al., 2006). Harries et al., (1995) ont réalisé des tests de résistance en compression sur les échantillons récupérés de 2 anciennes maisons en bauge de 2 étages, une résistance est de 0,12 MPa a été rapportée.

**A- Courbes typiques de compression de la bauge**

La Figure I-27 compare la courbe contrainte-déformation de 3 types d'échantillons en terre : la bauge, le pisé et la brique de terre (Miccoli et al., 2014). Dans le cas de la brique de terre et du pisé, les courbes contrainte-déformation présentent un comportement fragile : la contrainte augmente de jusqu'à un maximum, suivi par une chute de la résistance. En revanche,

la bauge présente un comportement très ductile avec une grande déformation. Ce comportement a été également rapporté par (Figure I-28) (Böttger et Rizza, 2013).

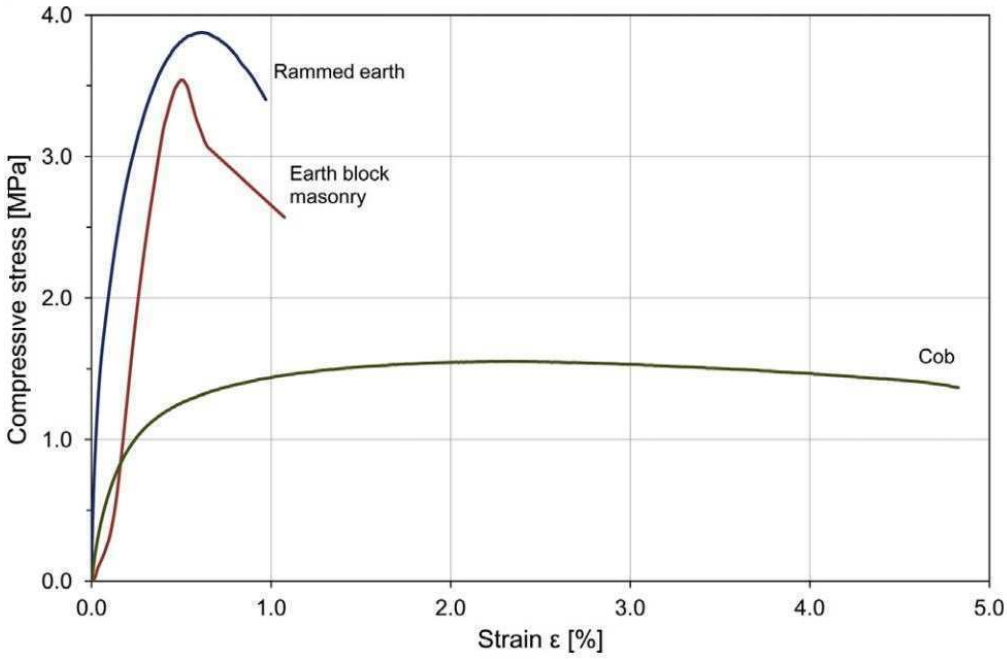



Figure I-27 : Courbe contrainte-déformation de la bauge, du pisé et de brique de terre (Miccoli et al., 2014)

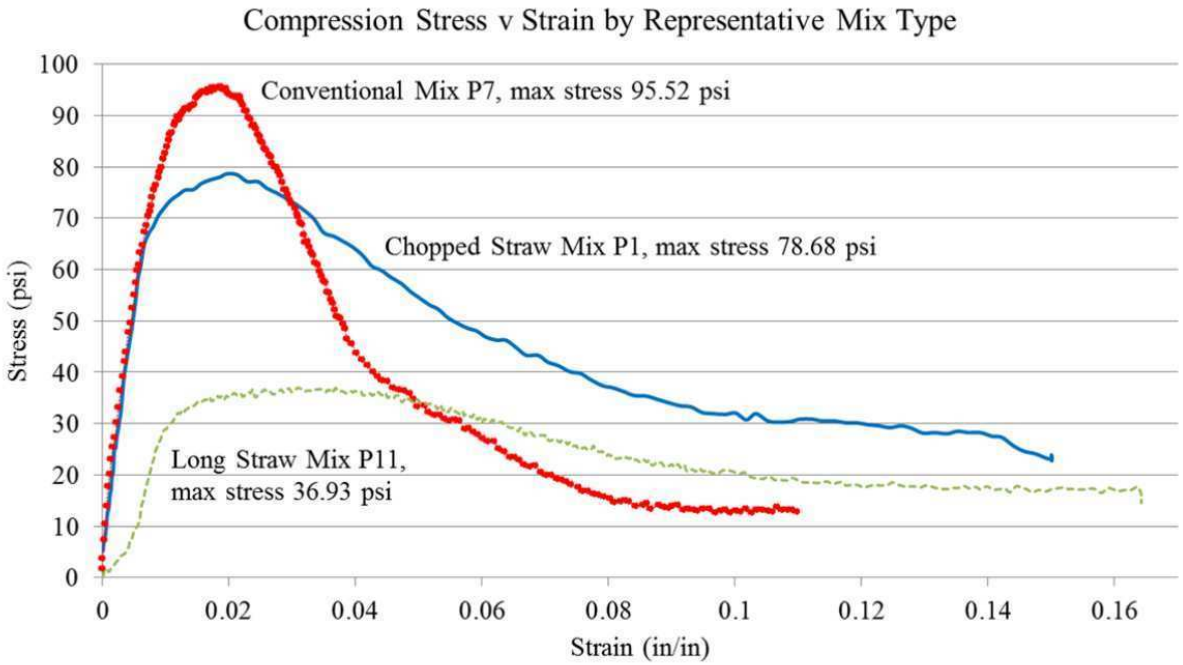



Figure I-28 : Courbe contrainte-déformation de la bauge à différentes formulations (Böttger et Rizza, 2013)

Le comportement ductile de la bauge est probablement dû aux fibres qui maintiennent une certaine cohésion post-rupture (Hibouche, 2013). Plusieurs auteurs (Akinkurolere et al., 2006; Bouhicha et al., 2005; Conventry, 2004; Saxton, 1995) rapportent que la ductilité est accompagnée de la formation d'un plus grand nombre de fissure. Par ailleurs, Saxton, (1995) rapporte une augmentation de la déformation à la rupture de 1,6 % à 11 % après ajout de 3% de fibres. L'effet de l'augmentation de la longueur de la fibre sur la résistance à la compression est négligeable (Bouhicha et al., 2005).

**B- Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau**

La bauge est un matériau à base de terre qui présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de la teneur en eau. Dur et cassant lorsqu'elle est sèche, la terre se transforme en un matériau plastique après augmentation de la teneur en eau .Par conséquent, la résistance en compression de la bauge varie en sens inverse de la teneur en eau (Figure I-29, Figure I-30) (Akinkurolere et al., 2006; Conventry, 2004; Harries et al., 1995; Saxton, 1995)**.**

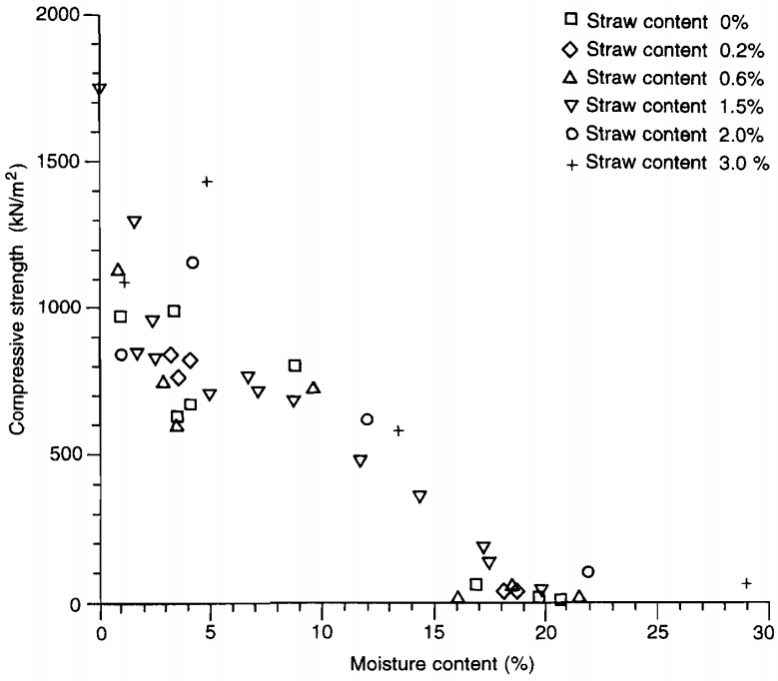



Figure I-29 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau (Saxton, 1995)

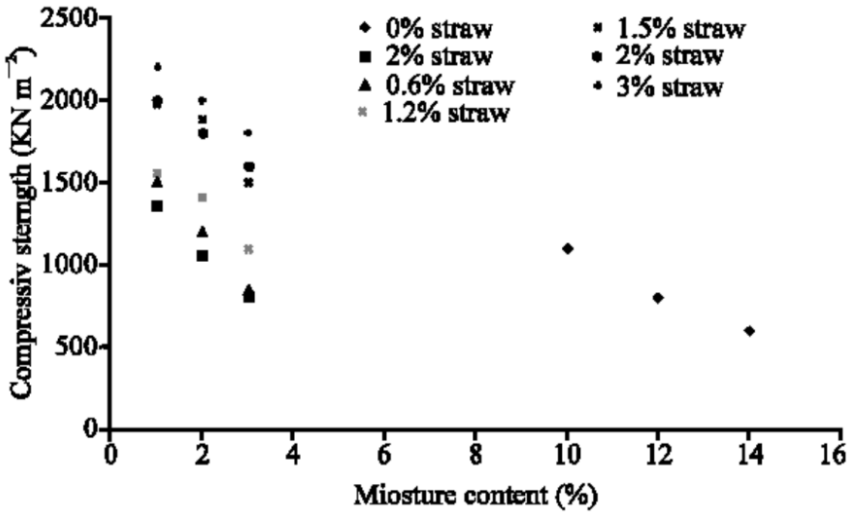



Figure I-30 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau (Akinkurolere et al., 2006)

Harries et al., (1995) rapportent que la teneur en eau est le facteur le plus important qui peut réduire la résistance à la compression d'un mur en bauge. La résistance en compression est de 0,8 MPa à 4 % de teneur en eau (la teneur en eau normale d'un mur en bauge à l'état d'équilibre). Elle descend jusqu'à 0,6 MPa à 10 % et 0,36 MPa à 15 % ; elle est de 0,12 MPa à 18%. Harries et al., (1995) précisent que cette valeur correspond à la charge admissible par la bauge pour un bâtiment de deux étages.

### C- Variation de la résistance en compression en fonction des paramètres de la fibre

Concernant l'influence de la teneur en fibre sur la résistance à la compression de la bauge, il ne semble pas y voir de consensus entre les études rapportées dans cet état de l'art. Harries et al., (1995) et Saxton, (1995) ont constaté que, plus la teneur en paille est élevée, plus la contrainte à la rupture est élevée. Quant à Bouhicha et al., (2005), ils sont constaté qu'une augmentation de la teneur en fibre jusqu'à 1,5 % entraine une augmentation de la résistance entre 10-20 %, dépendant du type de sol (Figure I-31). Cependant, une augmentation supplémentaire de la quantité de fibre entraine une diminution de la résistance. A 3,5 % de fibre, une diminution de 45 % est constatée.

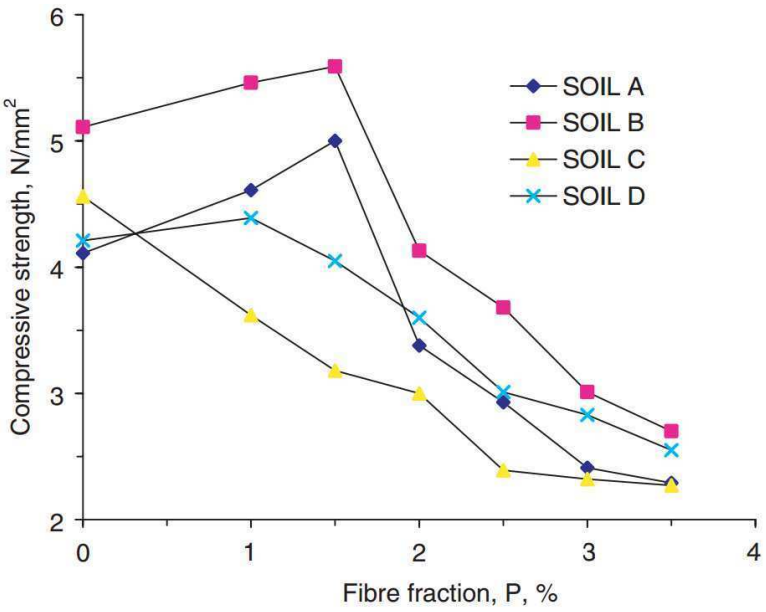



Figure I-31 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005)

(Avrami et al., 2008; Piattoni et al., 2011; Quagliarini et Lenci, 2010) constatent une diminution de la résistance en compression de la bauge lorsqu'on augmente la teneur en fibre. Ces résultats peuvent s'expliquer par une faible adhérence de la paille avec la matrice de terre, ce qui peut engendrer un glissement au début du chargement et entrainer une diminution de la résistance en compression ainsi qu'une diminution de la densité comme présenté sur la Figure I-32 (Laurent, 1986).

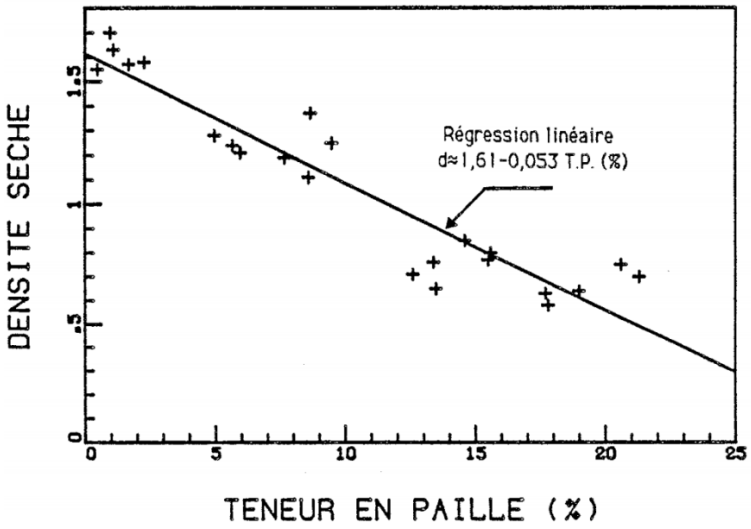



Figure I-32 : Relation entre teneur en paille et la densité sèche (tonne.m$^{-3}$) (Laurent, 1986)

Au niveau de l'influence de la longueur des fibres, Böttger et Rizza, (2013) ont rapporté une résistance plus élevé de 46,1 % de la bauge renforcée par de courtes fibres que celle de la bauge renforcée par des longues fibres, et ce à densités égales (1000 $kg.m^{-3}$) (Tableau I-4).

**D- Variation de la résistance en compression en fonction des paramètres de la terre**

La Figure I-33 montre que la résistance en compression augmente en fonction de l'équivalent sable (à part le mélange D), qui confère un squelette rigide à la bauge.

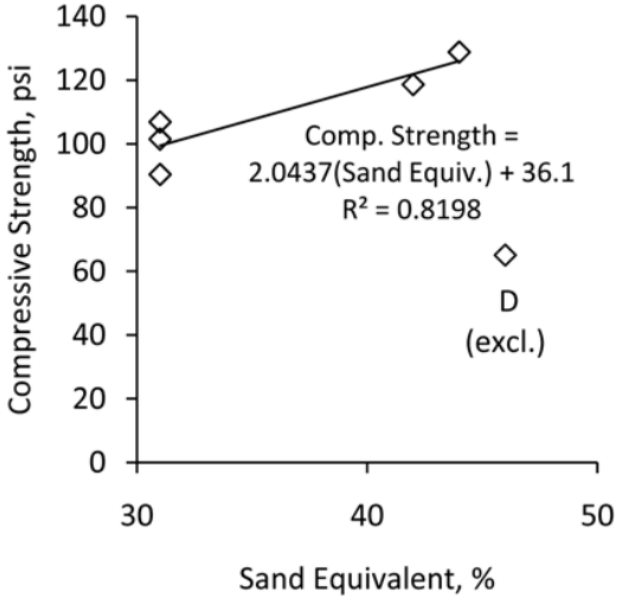



Figure I-33 : Variation de la résistance en compression en fonction de l'équivalent sable (Pullen et Scholz, 2011)

### I.5.2.2. Comportement en flexion

Selon plusieurs auteurs (Tableau I-5) la résistance en flexion varie entre 0,1 et 1,16 MPa, dépendant essentiellement de la teneur en paille, de leur longueur et du type de sol.

Tableau I-5 : Résistance en flexion de la bauge

| **Références** | | **Densité ($kg.m^{-3}$)** | **$R_f$ (MPa)** | **Taille d'échantillon prismatique** | **Type d'essai** |
|---|---|---|---|---|---|
| Böttger et Rizza, (2013) | Bauge conventionnelle | 1505 | 0,40-0,61 | 5x5x20 cm | Flexion trois points |
| | Bauge avec les fibres longues | 977 | 0,61-0,96 | 5x5x20 cm | |
| | Bauge avec les fibres courtes | 1009 | 0,72-1,16 | 5x5x20 cm | |
| Pullen et Scholz, (2011) | Sol A | 1473 | 0,23 | 15x15x53 cm | Flexion quatre points |
| | Sol B | 1489 | 0,21 | 15x15x53 cm | |
| | Sol C | 1585 | 0,16 | 15x15x53 cm | |
| | Sol D | 1521 | 0,07 | 15x15x53 cm | |
| | Sol E | 1650 | 0,16 | 15x15x53 cm | |
| | Sol F | 1490 | 0,18 | 15x15x53 cm | |
| Bouhicha et al., (2005) | Sol A | 1100-1300 | 0,25-0,28 | 7x7x28 cm | Flexion quatre points |
| | Sol B | | 0,19-0,26 | 7x7x28 cm | |
| | Sol C | | 0,10-0,18 | 7x7x28 cm | |
| | Sol D | | 0,14-0,21 | 7x7x28 cm | |

La bibliographie montre que le renforcement des fibres peut engendrer une amélioration de la résistance en flexion du matériau (Binici et al., 2005; Bouhicha et al., 2005). Bouhicha et al., (2005) ont étudié le renforcement de 4 sols avec des fibre de paille (100-200 mm de longueurs) à différentes teneurs de 0 %, 1,5 %, 2,5 % et 3,5 %. Les résultats de la Figure I-34 montrent une légère augmentation de la résistance à la flexion (qui reste inférieur à 0,3 MPa) en fonction de l'augmentation de la teneur en fibres et ce pour les quatre sols utilisés. Il est à noter que la taille des fibres utilisées est plus longue que la plus petite dimension des échantillons rectangulaires 7x7x28 cm). Ceci peut entrainer une plus forte liaison terre/fibre.

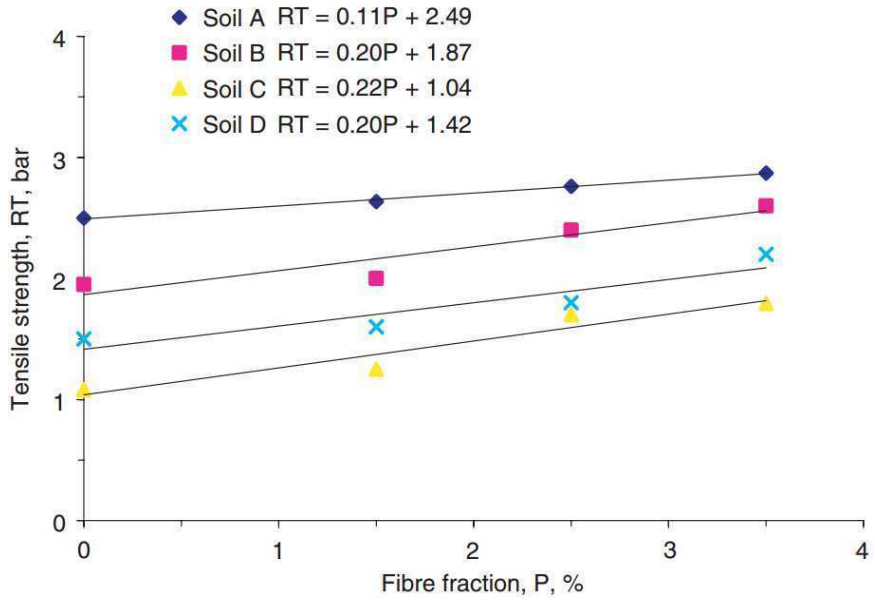



Figure I-34 : Résistance en flexion en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005)

Böttger et Rizza, (2013) ont rapporté que, l'ajout supplémentaire de fibre dans la bauge augmente la résistance en flexion (Tableau I-5). Cependant, on note que la bauge renforcée par de longues fibres présente des résistances moindres que celle renforcée par de courtes fibres.

La Figure I-35 (Pullen et Scholz, 2011) montre la variation de la résistance en flexion en fonction de la résistance à la flexion des fibres. Le résultat montre que, pour les longues fibres (formulations A, B, C, E, F), la résistance en flexion augmente légèrement en fonction de la résistance en traction des fibres (fibres longue de plus de 15 cm). Il est également à noter que l'équivalent sable semble avoir peu ou pas d'influence sur la résistance à la flexion de la bauge.

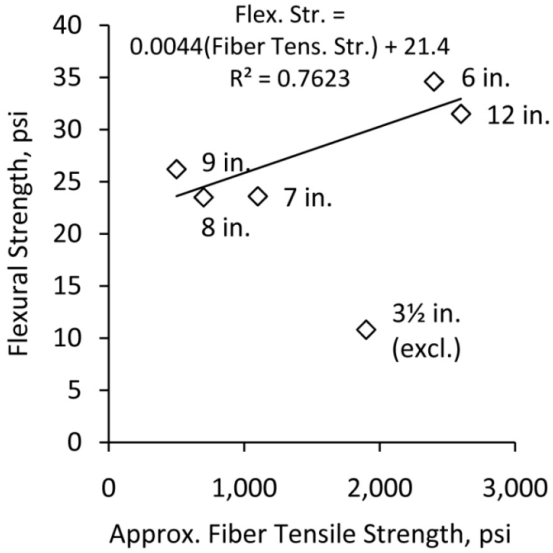



Figure I-35 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la résistance en traction des fibres (Pullen et Scholz, 2011)

### I.5.3. Propriétés hygrothermique de la bauge

La conductivité thermique d'un matériau est définie comme la quantité de chaleur qui passe par unité de temps à travers une unité de surface de la coupe transversale du matériau sous un gradient de température unitaire appliquée dans la direction de ce flux de chaleur. Considérant un élément prismatique de matériau ayant une surface de section transversale A perpendiculaire au flux thermique q (Figure I-36). Le sol de conductivité thermique λ est défini sous la forme :

$$\lambda = \frac{q}{A(T_2 - T_1)/L} \qquad \text{Eq. I-1}$$

Avec :

q : flux de chaleur (W ou J/s) ;

A : surface de la section transversale ($m^2$) ;

$\Delta T = T_2 - T_1$ : différence de température (K ou $C^{o)}$ ;

L : distance entre les deux faces d'extrémités (m) ;

λ : conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$);

Figure I-36 : Flux de chaleur à travers un élément prismatique de sol

Lorsque le matériau est un sol, la conductivité thermique de celui-ci dépend des conditions extérieures et des caractéristiques intrinsèques de ses composants. La conductivité thermique est d'environ 2,5 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les minéraux de sol ; de 0,6 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour l'eau liquide ; et de 0,025 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour l'air (Campbell et Norman, 1998). Nous constatons ainsi uns différence entre les valeurs de la conductivité thermique de ces trois composants, donc le changement de la fraction volumique engendre une variation de la conductivité thermique apparente du sol.

### I.5.3.1. Conductivité thermique

Selon plusieurs auteurs (Laurent, 1986; Minke, 2000; Röhlen et al., 2013), la conductivité thermique de la bauge varie entre 0,47 et 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$, dépendant essentiellement de la teneur en paille, de la densité et de la teneur en eau. Le Tableau I-6 présente la conductivité thermique d'autres matériaux utilisés pour la construction en terre, qui varie entre 0,17 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (pour la terre allégée) à 1,40 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (pour le pisé).

Tableau I-6 : Conductivité thermique des matériaux à base de terre

| Références | Type de construction en terre | Densité ($kg.m^{-3}$) | $\lambda$ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| Röhlen et al., (2013) | Terre allégée en bois ou argile expansée | 600-800 | 0,17-0,25 |
| | BTC | 1600-2100 | 0,70-1,20 |
| | Pisé | 1600-2200 | 0,70-1,40 |
| | Bauge | 1400-1700 | 0,60-0,80 |
| | Enduit de terre | 1000-1800 | 0,35-0,91 |
| Laurent, (1986) | Terre fibrée (Torchis et bauge) | 600-1700 | 0,20-1,00 |
| Minke, (2000) | Bauge | 1200-2000 | 0,47-0,93 |

**A- Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibre et de la densité**

L'incorporation des fibres dans la matrice du sol influence fortement la densité sèche de la bauge et donc sa conductivité thermique. Cette influence a été étudiée par (Laurent, 1986) à travers un sol fibré. Une variation de la teneur en fibre d'orge de 0,5 % à 22 % entraine une diminution de la densité de 1700 $kg.m^{-3}$ à 600 $kg.m^{-3}$ (Figure I-37). La paille introduit une porosité supplémentaire quasi proportionnelle à son pourcentage (Laurent, 1986) et diminue la conductivité thermique en conséquence (Figure I-38).

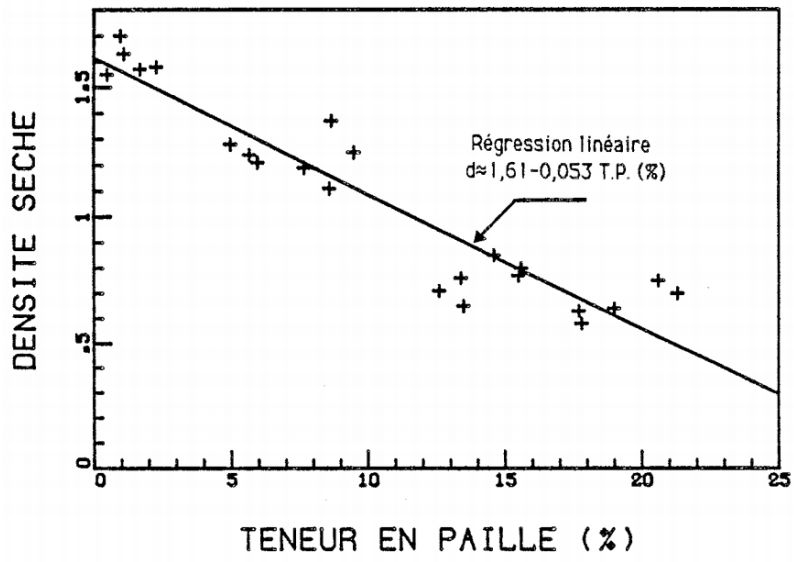



Figure I-37 : Relation teneur en paille/densité sèche (tonne.m$^{-3}$) correspondante (Laurent, 1986)

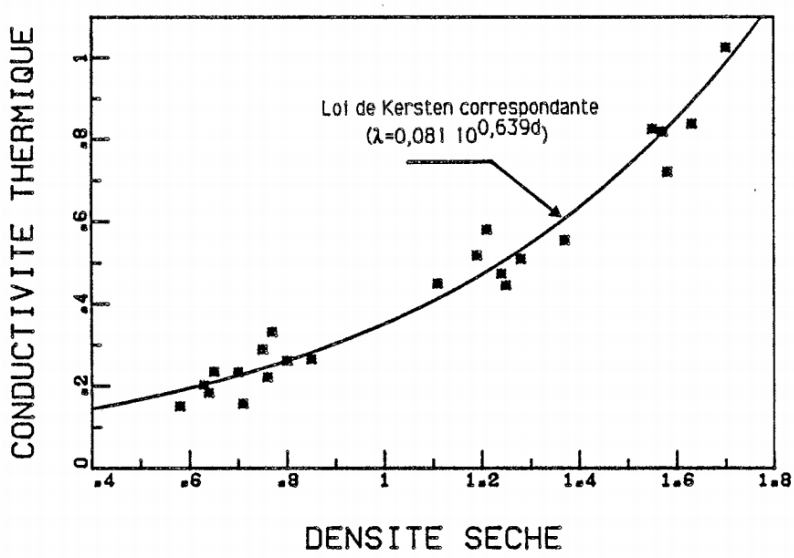



Figure I-38 : Variation de la conductivités thermique (W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) en fonction de la densité sèche (tonne.m$^{-3}$) (Laurent, 1986)

Les résultats montrent que les conductivités thermiques mesurées varient d'un facteur un à cinq (0,2–1 W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) et confirment le rôle majeur joué par la densité sèche sur la variation de la conductivité thermique de ce type de matériau.

Le Tableau I-7 présente la relation entre la densité sèche et la conductivité thermique d'un sol fibré tel que rapporté par Minke, (2000).

Tableau I-7 : Conductivité thermique d'un sol fibré (Minke, 2000)

| Sol | Densité ($kg.m^{-3}$) | Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) |
|---|---|---|
| Densité élevé | 2000 | 0,93 |
| Densité moyenne | 1200-1700 | 0,7 |
| Densité faible | 1200 | 0,47 |

**B- La teneur en eau**

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau est très importante et très variable en fonction de type de terre. Cette évolution est presque linéaire aux faibles teneuses en eau (entre 0 % et 4 %) (Laurent, 1986). Cela est dû à l'évaporation de l'eau qui est remplacée par de l'air (Hibouche, 2013; Tang, 2005), qui possède une conductivité thermique (0,025 $W.m^{-1}.K^{-1}$) beaucoup plus faible que l'eau (0,6 $W.m^{-1}.K^{-1}$). Une diminution de la teneur en eau de 17 % à 6 % a engendré une diminution de la conductivité thermique de 1,22 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à 0,63 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (pour une argile de densité sèche de 1600 ($kg.m^{-3}$)) (Laurent, 1986).

### I.5.3.2. Propriété hygroscopique

La bauge est un milieu poreux humide, c'est-à-dire un milieu hétérogène constitué de trois phases :

- une matrice solide supposée homogène, isotrope, indéformable et inerte chimiquement,

- une phase liquide constituée d'eau pure qui occupe une partie de l'espace poreux. Les températures considérées sont supérieures à 0°C, ainsi, le phénomène de gel n'est pas pris en compte,

- une phase gazeuse, qui occupe l'autre partie de l'espace poreux, constituée d'air et de vapeur d'eau. Ceux-ci sont considérés comme des gaz parfaits. En outre, l'air est considéré comme un gaz inerte qui ne peut ni interagir avec la matrice solide ni se condenser.

Le réseau poreux ou espace poreux est constitué de pores ouverts et de pores isolés qui ne sont pas accessibles. Les pores ouverts comprennent les pores interconnectés (au moins deux ouvertures) et les pores aveugles (une seule ouverture). Seuls les pores interconnectés peuvent participer au transport des matières à travers le matériau.

Le comportement hygroscopique d'un sol non saturé (un milieu comprenant trois phases : solide, liquide et gazeuse) est plus complexe que celui d'un sol saturé (un milieu comprenant deux phases : solide, liquide) étant donné l'interaction gaz-liquide-solide. La

pression du liquide est toujours inférieure à la pression du gaz dans un sol non saturé. Cette différente de pression est appelée la succion et est à l'origine de comportements hydromécaniques particuliers des sols non saturés. Le terme de «succion» dans le domaine de la géotechnique a été défini (Mitchell, 1993) comme étant «une énergie potentielle comparable à la charge hydraulique dans les sols saturés» correspondant à «l'énergie à fournir pour amener de l'eau libre de l' infini jusqu'à un sol non saturé». Ce potentiel est égal à « la quantité de travail par unité de volume d'eau pure, nécessaire pour transporter de façon réversible, isotherme, à la pression atmosphérique, une quantité infinitésimale d'eau depuis un état d'eau pure loin du sol, à celui d'eau interstitielle dans le sol non saturé ». En géotechnique, la succion est généralement exprimée sous forme de pression en kPa.

**A- Fixation de l'humidité dans les milieux poreux**

La fixation de l'eau sur le matériau peut se faire chimiquement ou physiquement. L'adsorption chimique résulte d'une réaction chimique en surface du matériau : cette réaction d'hydratation est irréversible. Pour la bauge, étant donné qu'aucun liant n'est utilisé, les matériaux sont supposés chimiquement inertes, seule l'adsorption physique sera prise en compte. L'adsorption physique est un phénomène de surface qui permet de fixer des molécules de gaz ou de liquide sur des surfaces solides. Contrairement à l'absorption chimique, la molécule adsorbée n'est pas dégradée, et reste dans sa forme originelle mais n'est plus libre dans le solvant.

L'adsorption physique peut être décomposée en trois phases (Figure I-39) :

- Adsorption monocouche ou monomoléculaire : la surface des pores est recouverte par les molécules d'eau en une couche et sont maintenues sous l'effet des forces de VAN DER WAALS.

- Adsorption multicouche ou polymoléculaire : lorsque l'humidité devient plus importante, d'autres couches de molécules d'eau se fixent à la première.

- Condensation capillaire : pour une humidité relative plus forte, les couches polymoléculaires se rejoignent et un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque se forme. Les forces capillaires retiennent l'eau à la surface des pores et entraîne le remplissage des pores les plus fines puis des pores plus importantes.

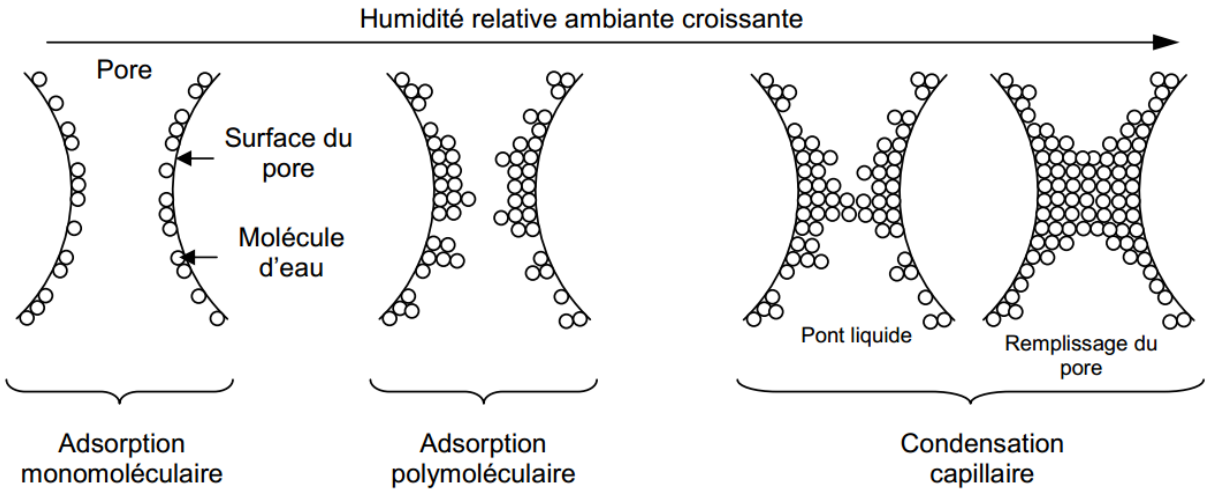



Figure I-39 : Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet-Foucault, 2004)

**B- Condensation capillaire – Loi de Kelvin-Laplace**

La condensation capillaire explique pourquoi un matériau poreux, initialement en équilibre avec le milieu extérieur, se remplit progressivement d'eau, quand l'humidité relative augmente de manière isotherme. Un pore peut être modélisé par deux plaques parallèles qui forment un tube (Figure I-40). Lorsque l'humidité relative augmente, on distingue clairement la différence entre l'adsorption polymoléculaire correspondant à l'accumulation de couches de molécules d'eau d'épaisseur $e_a$ et la condensation capillaire à l'humidité relative de saturation HRs, pour laquelle il apparaît un pont liquide (condensation de l'eau) séparé de la phase gazeuse par un ménisque de rayon $r_k$.

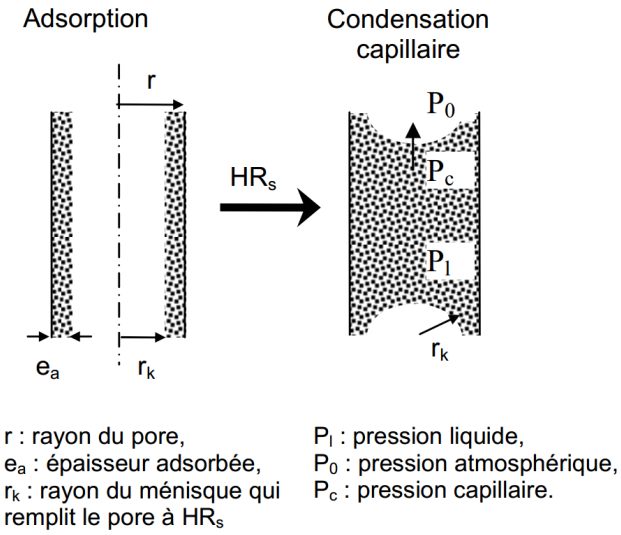



Figure I-40 : Phases de remplissage d'un pore - condensation capillaire (Collet-Foucault, 2004)

Lorsqu'il y a condensation capillaire,

- l'eau capillaire est en équilibre avec l'atmosphère ambiante, ce qui se traduit par la loi de Kelvin :

$$P_c = P_l - P_o = \frac{RT}{Mg}\ln(HR) \qquad \text{Eq. I-2}$$

Avec :

| | |
|---|---|
| $P_c$ | Pression capillaire ou Succion capillaire (MPa) |
| R | la constante molaire des gaz (R=8,3143 J. $mol^{-1}.K^{-1}$) |
| T | la température thermodynamique (K) |
| M | la masse molaire de l'eau (M=18,016 $g.mol^{-1}$) |
| g | l'accélération due à la pesanteur (g= 9,81 $m.s^2$) |
| HR | l'humidité relative (%) |

A 20 °C, on a RT/Mg = 137,837 MPa.

- La relation entre le rayon de courbure du ménisque sphérique eau-air dans le tube et la différence de pression entre l'air et l'eau est donnée par la loi de Laplace, qui se simplifie dans l'hypothèse de pores cylindriques et prend l'expression de la loi de Jurin :

$$P_l - P_o = \frac{-2\sigma\cos\theta}{r_k} \qquad \text{Eq. I-3}$$

σ : la tension superficielle air-eau (pour l'eau σ = 72,75 × $10^{-3}$ N/m),

θ: l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide,

La combinaison de ces deux équations conduit à une relation entre le rayon $r_k$ du ménisque qui remplit le pore de rayon r où une couche de molécules d'épaisseur $e_a$ est déjà adsorbée (Figure I-40), et HR : c'est la relation de Kelvin-Laplace :

$$r_k = r - e_a = \frac{-2\sigma\cos\theta}{\frac{RT}{Mg}\ln(HR)} \qquad \text{Eq. I-4}$$

Cette relation exprime que si l'air humide dans le réseau poreux est caractérisé par une humidité relative HR à l'équilibre, tous les pores de rayon inférieur à $r_k$ sont nécessairement remplis d'eau.

La condensation capillaire se produit donc :

- Dans les macropores au voisinage de la pression de vapeur saturante. La quantité d'eau pouvant y être adsorbée est alors négligeable devant le volume capillaire.

- Dans les mésopores pour des humidités relatives significativement inférieures à 100%. La quantité d'eau adsorbée n'est alors plus négligeable.

Les micropores sont trop fins pour contenir un ménisque de condensation capillaire. La condensation résulte de l'adsorption pure.

**C- Domaine hygroscopique et domaine capillaire**

Selon l'humidité relative, deux domaines peuvent être distingués : le domaine hygroscopique jusqu'à HR = 95 % et le domaine capillaire à partir de HR = 95 %. Pour le domaine hygroscopique, l'eau est présente dans les pores grâce aux phénomènes d'adsorption monomoléculaire, d'adsorption multimoléculaire et puis de condensation capillaire (Figure I-41). Au-dessus de 95 %, on passe au domaine capillaire.

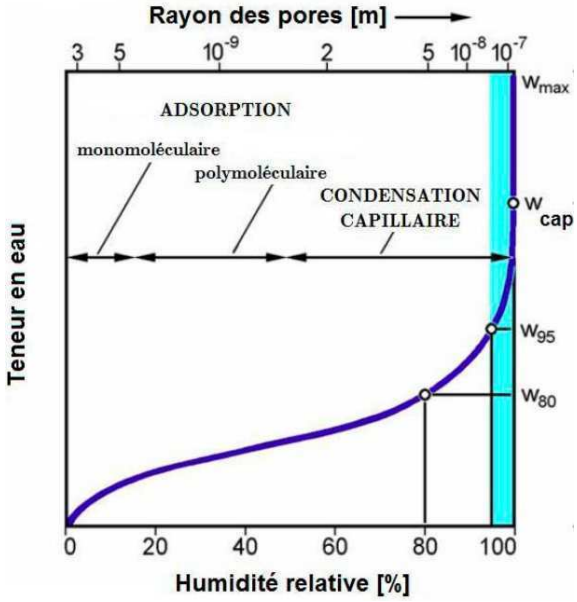



Figure I-41 : Relation entre teneur en eau d'un matériau et humidité relative d'après (Veas, 2006)

À partir d'Eq. I-4, deux classes de pores sont identifiables (Quenard, 1989) :

- Classe 1 : les pores condensables à 20°C : r < 0,1 µm- domaine hygroscopique
- Classe 2 : les pores non condensables à 20°C : r > 0,1 µm- domaine capillaire.

A la limite du domaine hygroscopique, les pores de rayon inférieur à 0,1 µm sont remplis d'eau et la teneur en eau du matériau est appelée teneur en eau critique. En dessous de

cette valeur, le transport d'eau par capillarité n'est pas possible. Le remplissage des pores de rayon supérieur à 0,1 µm ne peut se faire que par capillarité. Pour cela, il faut mettre le matériau directement en contact avec l'eau liquide. On se situe alors dans le domaine capillaire et la teneur en eau du matériau au contact de l'eau, après stabilisation, est appelé teneur en eau capillaire ($W_{cap}$). Cette valeur est plus faible que la teneur en eau de saturation ($W_{max}$). Lorsque le matériau est sous pression, il est possible de forcer l'entrée d'eau liquide dans le matériau et, donc, de remplir tout l'espace poreux d'eau, c'est la teneur en eau maximale.

**D- Propriété hygroscopique de la bauge**

La paille est un matériau lignocellulosique. Elle est connue pour être très hydrophile et absorber facilement l'eau (Okubayashi et al., 2004). Les mécanismes d'absorption d'eau par les fibres cellulosiques sont complexes et dépendent de nombreux paramètres (Okubayashi et al., 2004). Pour la cellulose, les groupements hydroxyles interviennent dans de nombreuses liaisons intra et intermoléculaires mais peuvent également être liés à des molécules d'eau. Le modèle présenté par (Peirce, 1929) fait l'hypothèse que les molécules d'eau peuvent être directement ou indirectement adsorbées. A la surface des fibres, les molécules d'eau peuvent s'absorber facilement sur les hydroxyles présents ou sur les hydroxyles des zones amorphes. Cette eau qualifiée de « libre » peut s'évaporer facilement. Par contre, à la surface interne des vides et au niveau des cristallites, d'autres molécules d'eau vont être absorbées plus difficilement. Donc, elles vont être liées au squelette de la fibre ou se retrouver piégées à l'intérieur de la fibre. Ces molécules d'eau pénètrent entre les chaînes de cellulose qui vont engendrer un écartement de ces chaines et favoriser leur glissement les unes par rapport aux autres, ce qui va engendrer le gonflement des fibres. L'eau « liée » possède donc des processus d'absorption et désorption plus lents que l'eau «libre ». Enfin, d'autres molécules d'eau peuvent aussi se combiner à l'eau déjà liée à la fibre, cela s'appelle l'adsorption multicouche (Okubayashi et al., 2004).

Collet-Foucault, (2004) a mené un travail de caractérisation hydrique et thermique des matériaux à faibles impacts environnementaux : la bauge, l'enduit chanvre chaux, le béton de chanvre et la laine de chanvre. Ces matériaux ont été utilisés pour construire des bâtiments réels. Les résultats concernant les courbes d'isothermes de sorption/désorption de la bauge et du béton de chanvre ont présentés sur les Figure I-42 et Figure I-43. Les courbes présentent une hystérésis qui s'étend sur tout le domaine d'humidité relative et montrent une capacité de stockage de l'eau du béton de chanvre plus forte que celle de la bauge.

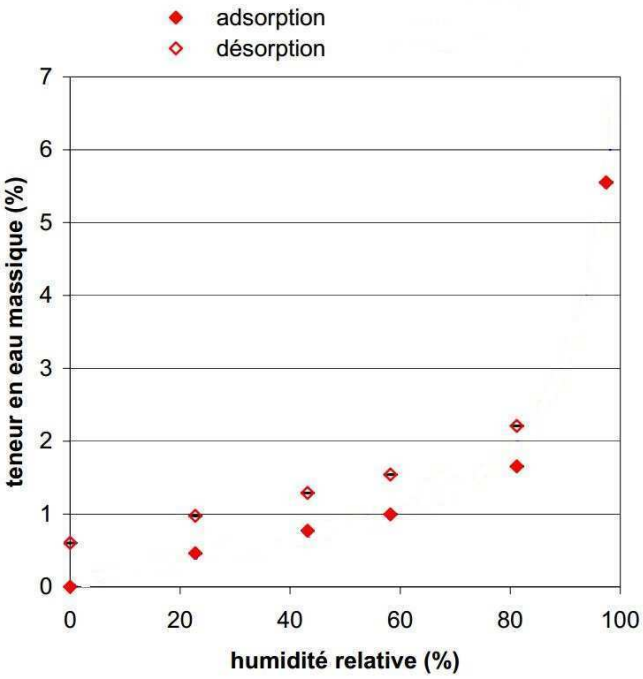



Figure I-42 : Isotherme d'adsorption désorption de la bauge – Teneurs en eau massiques moyennes et écarts-type (Collet-Foucault, 2004)

Les résultats des isothermes de sorption sont cohérents avec les calculs de surfaces spécifiques : dans le domaine de l'adsorption pure, le matériau qui a la plus petite surface spécifique a la plus faible teneur en eau. La surface spécifique de la bauge est de 17,07 $m^2.g^{-1}$ alors que celle du béton de chanvre est de 70,60 $m^2.g^{-1}$. La bauge est un matériau micro et macroporeux. La masse d'eau fixée résulte donc d'adsorption pure sur la quasi-totalité du domaine. La teneur en eau obtenue aux différentes humidités est faible car la surface spécifique de la bauge est due principalement aux micropores qui se remplissent plus vite. La condensation capillaire dans les macropores ne débute qu'aux humidités relatives élevées (Collet-Foucault, 2004).

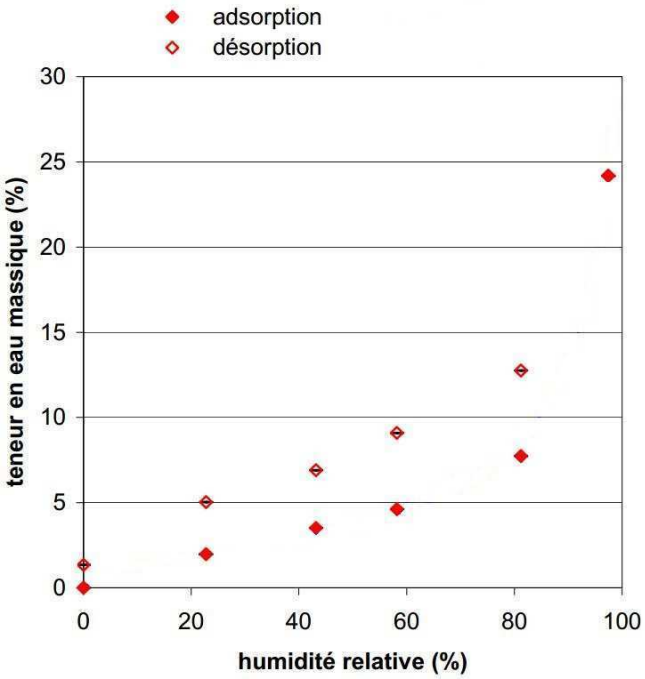



Figure I-43 : Isotherme d'adsorption désorption du béton de chanvre – Teneurs en eau massiques moyennes et écarts-type (Collet-Foucault, 2004)

Concernant sur la perméabilité à la vapeur d'eau, Collet-Foucault, (2004) montre que les perméabilités moyennes obtenues à 23°C pour la bauge sont comprises entre $1{,}5.10^{-11}$ et $1{,}7.10^{-11}$ $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen est compris entre 11,8 et 13,3. Tandis que pour le béton de chanvre, la perméabilité à la vapeur d'eau est comprise entre $1{,}6.10^{-11}$ et $2{,}3.10^{-11}$ $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen est compris entre 8,7 et 12,5. Réglementation Thermique 2005 (règles (Th-U, 2005)) montre que le facteur de résistance à la vapeur d'eau de la terre cuite varie entre 10 et 16 pour une densité entre 1000 $kg.m^{-3}$ et 2400 $kg.m^{-3}$.

Simons et al., (2015) ont trouvé un facteur de résistance à la vapeur d'eau un peu plus faible par rapport aux résultats ci-dessus. L'étude porte sur un sol fin sans fibre et avec 3 % et 6 % de paille d'orge. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau de ces 3 mélanges est de 4,6 pour le sol fin (densité-1990 $kg.m^{-3}$) ; de 4,7 (densité de 1520 $kg.m^{-3}$) à 3 % de fibres et de 6,3 (densité de 1220 $kg.m^{-3}$) à 6 % de fibre. On constate donc que la présence des fibres a une faible influence sur la perméabilité à la vapeur d'eau du sol.

## I.6. Conclusions

Face aux enjeux du développement durable, le secteur du bâtiment et plus précisément celui des matériaux de construction propose de plus en plus de solutions à base de matériaux locaux. Parmi ces matériaux, la bauge est une construction en terre crue ancestrale, assez présente en Normandie, qui présente de nombreux avantages environnementaux.

L'étude bibliographique a montré que les formulations types de la bauge sont constituées d'environ 30 % de graviers, 35 % de sable et 35 % de limon et d'argile et d'une teneur en en paille généralement comprise entre 1 et 3,5 % en masse. En termes de comportement mécanique, la résistance à la compression varie de 0,28 à 1,40 MPa, et la résistance à la flexion de 0,1 à 0,96 MPa. Ce comportement est influencé par la teneur en eau du mélange, les paramètres de la fibre (dont la teneur et le type) et également les paramètres de la terre (telle que la granulométrie et la teneur en argile).

Quant au comportement thermique, la conductivité thermique de la bauge varie en fonction de la teneur en fibre, de la densité et de la teneur en eau du mélange. Elle présente des valeurs entre 0,47 et 1 $W.m^{-1}.K^{-1}$.

La bauge est également caractérisée par un comportement hygroscopique spécifique. C'est un matériau micro et macroporeux dont la perméabilité moyenne à 23°C est comprise entre $1,5.10^{-11}$ et $1,7.10^{-11}$ $kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$ et le facteur de résistance à la vapeur d'eau moyen est compris entre 11,8 et 13,3.

# II. CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'EXPERIMENTALES

L'étude bibliographique a montré qu'il existait des caractéristiques optimales pour les matériaux composant la bauge. Ainsi, il est nécessaire de caractériser ces différents constituants (terres, fibres) pour définir des formulations de bauge permettant d'étudier son comportement. Il est à noter que les matériaux utilisés proviennent tous de la région Normandie afin d'en simplifier l'approvisionnement et de privilégier des matériaux locaux. Cependant, des matériaux similaires peuvent être obtenus dans les différentes régions de France. Ce chapitre détaille donc la campagne d'essais menée pour caractériser les matériaux de base ainsi que la mise au point des différentes formulations et des conditions de fabrication des échantillons. Par ailleurs, ce chapitre détaille également les méthodes d'essais qui seront appliquées pour l'étude des composites de bauge.

## II.1. Caractérisation des matériaux

### II.1.1. Sols initiaux

Pour cette étude, six sols ont été sélectionnés pour être caractérisés du point de vue géotechnique afin de déterminer la possibilité de les utiliser pour des mélanges de bauge. Ces six sols proviennent de Normandie et, plus précisément, de Lieusaint (sol 1, sol 3 et sol 4), de Montsurvent (sol 2), de Saint-André-de-Bohon (sol 5) et de Saint-Sébastien-de-Raids (sol 6) (Figure II-1).

Figure II-1 : Sites de prélèvements des sols

### II.1.1.1. Analyse granulométrique

Tout d'abord, une analyse granulométrique a été effectuée sur les six sols. Cet essai permet de déterminer la taille et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon. L'analyse granulométrique a été menée selon la norme (XP P94-041, 1995). Les courbes granulométriques des six sols sont données dans la Figure II-2. Parmi les informations obtenues d'une courbe granulométrique, le diamètre maximal ($D_{max}$), le tamisât à 2 mm et la teneur en fines (D < 80 µm) sont des paramètres de nature qui permettent de classer les sols selon la norme (NF P11-300, 1992) (Tableau II-1). Selon les résultats obtenus, les sols 1 et 5 sont des sols sableux ou graveleux avec fines ($D_{max}$ < 50 mm, 12 % < teneur en fines < 35 %) et les sols 2, 3, 4 et 6 sont des sols fins ($D_{max}$ < 50 mm, teneur en fines > 35 %).

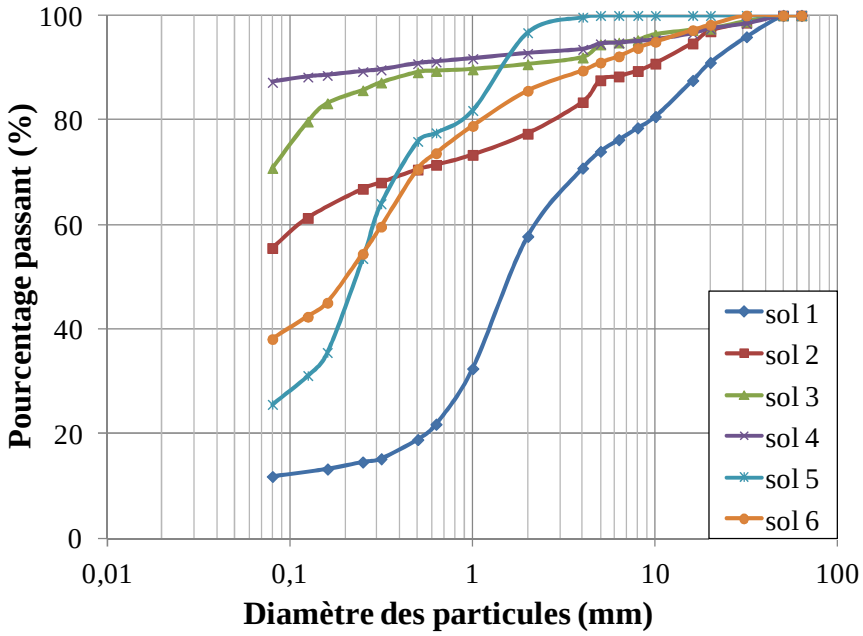



Figure II-2 : Courbes granulométriques des 6 sols

Tableau II-1 : Paramètres obtenues par les courbes granulométriques

| | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 | Sol 4 | Sol 5 | Sol 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{max}$ (mm) | 31,5 | 20 | 31,5 | 31,5 | 5 | 20 |
| Pourcentage passant à 2 mm | 63,45 | 79,81 | 93,02 | 95,15 | 96,70 | 87,16 |
| Teneur en fines (TF) < 80µm (%) | 12,98 | 57,25 | 72,65 | 89,51 | 25,61 | 38,80 |

### II.1.1.2. Activité argileuse

Comme expliqué dans la bibliographie, les argiles confèrent au sol une capacité d'absorption d'eau (appelée activité) qui peut entrainer des phénomènes de retraits/gonflements et jouent un rôle important dans la plasticité et la cohésion du sol. Pour évaluer cette activité argileuse, deux essais sont utilisés : l'essai au bleu de méthylène ((NF P94-068, 1998) et les limites d'Atterberg (NF P94-051, 1993).

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau II-2 et montrent que, quel que soit l'essai, le sol 3 possède la plus grande activité argileuse. Il est à noter que les classements obtenus par l'essai au bleu et par les limites d'Atterberg sont différents. En effet, par exemple, le sol 1 possède un IP supérieur au sol 5 alors que le contraire est observé pour la VBs. Cela peut-être dû à la faible teneur en fines que possèdent les sols 1 et 5 et à la fraction étudiée pour les limites d'Atterberg (0/400 µm). Cette fraction 0/400 µm est plus faible pour les sols 1 et 5, et est donc moins représentative que pour les autres sols. Si la nature du sol est prise en compte, le classement est identique selon les deux méthodes pour les sols fins.

Tableau II-2 : Valeur au bleu de méthylène, limites d'Atterberg des 6 sols.

| Sol | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| VBs (g/100g) | 0,30 | 0,73 | 0,91 | 0,55 | 0,47 | 0,15 |
| Limite de liquidité $W_L$ (%) | 48,9 | 49,4 | 53,3 | 34,1 | 34,8 | 31,3 |
| Limite de plasticité $W_P$ (%) | 28,5 | 35,7 | 24,5 | 20,4 | 23,4 | 23 |
| $I_P$ (%) | 20,4 | 13,7 | 28,8 | 13,7 | 11,4 | 8,3 |

### II.1.1.3. Caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage sont déterminées par l'essai Proctor (NF P94-093). La masse volumique sèche apparente optimale d'un sol dépend de sa nature, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage.

La Figure II-3 présente les courbes Proctor des six sols et les paramètres à l'optimum Proctor sont récapitulés dans le Tableau II-3. Les résultats montrent que le sol 1 possède la plus masse volumique sèche à l'optimum Proctor. Cela est dû au fait que le sol 1 possède une fraction graveleuse (entre 2 et 20 mm) supérieure aux autres sols. Il est intéressant de remarquer que le sol 2, malgré une fraction graveleuse supérieure aux sols 3, 4, 5 et 6, montre une masse volumique sèche plus faible que tous les autres sols. Cela peut être dû à une coupure

granulométrique pour la fraction inférieure à 80 µm. Il est à noter que lorsque la teneur en eau à l'optimum augmente, la masse volumique sèche apparente à l'optimum diminue.

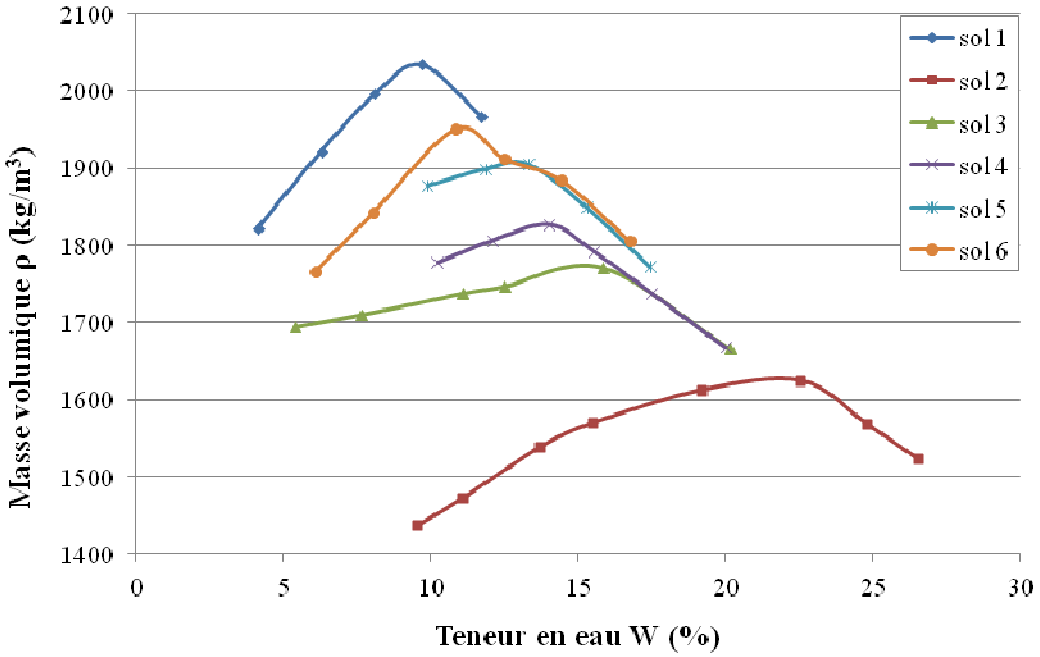



Figure II-3 : Courbes Proctor des 6 sols

Tableau II-3 : Teneur en eau l'optimum Proctor et densité sèche correspondant des 6 sols

| | sol 1 | sol 2 | sol 3 | sol 4 | sol 5 | sol 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $W_{OPN}$ (%) | 9,7 | 22,5 | 15,8 | 14,0 | 13,3 | 10,9 |
| $\rho_{dOPN}$ (kg.m$^{-3}$) | 2034 | 1625 | 1771 | 1827 | 1905 | 1951 |

### II.1.2. Les fibres

Pour la bauge traditionnelle, la paille de blé est usuellement utilisée. Dans cette étude, deux types de fibres ont été utilisées : la paille de blé et la paille de lin. La paille de blé utilisée ici provient de Laulne (Manche) et a été récoltée en 2014. La paille de lin provient de la plaine de Caen et a été récolté en 2013. La paille de lin utilisée à la particularité d'être pauvre en fibre, ce qui ne permet pas une exploitation par la filière linière habituelle. L'utilisation de la paille de lin permettra d'étudier l'influence du type de fibre sur le comportement de la bauge. Pour une simplicité d'écriture dans la suite du rapport, la paille de blé et la paille de lin seront dénommées « paille » et « lin ». De même, dans notre étude, le terme « fibre » sera utilisé plutôt que le terme « plante » qui serait plus proche de réalité mais qui n'est pas utilisé dans la bibliographie.

### II.1.2.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques déterminées pour les fibres sont la longueur moyenne, le diamètre et la teneur en eau à l'atmosphère ambiante. Pour évaluer la longueur moyenne et le diamètre des fibres, des mesures ont été réalisées sur trente fibres. Les résultats obtenus montrent que les fibres de lin ont une longueur moyenne (83,6 cm) plus importante que les pailles de blé (37,44 cm) et ainsi qu'un écart type plus faible (Tableau II-4). Le faible écart type du lin peut être un avantage pour une uniformisation des matériaux de construction pour la bauge. Cette variabilité de la longueur des plantes s'explique par l'influence d'une multitude de facteurs sur son développement agricole ainsi que de la méthode de transformation industrielle et de la méthode utilisée pour la récolte. Cependant, la longueur moyenne indique que les fibres de lin devraient être raccourcies pour être utilisées sur chantier. Les résultats pour la teneur en eau à l'atmosphère ambiante suggèrent que la paille possède une capacité d'absorption plus importante que le lin.

Tableau II-4 : Caractéristiques physiques des fibres

| | Paille | Lin |
|---|---|---|
| Longueur moyenne (cm) | 37,44 ± 12,10 | 83,6± 3,22 |
| Diamètre (mm) | 2-5 | 2-3 |
| Teneur en eau à l'atmosphère ambiante (%) | 8,4 | 5,8 |

### II.1.2.2. Masse volumique absolue

La mesure de la densité absolue des fibres a été effectuée à l'aide d'un pycnomètre à hélium de type AccuPyc II 1340 de la marque Micromeritics® (Figure II-4). Il permet d'effectuer une mesure précise du volume de phase solide d'un échantillon de masse connue (ASTM B923, 2016). En effet, le principe de mesure est d'introduire l'hélium dans une enceinte de référence avec une pression connue ($P_1$) et étendre ensuite ce gaz dans l'enceinte qui contient l'échantillon en mesurant la nouvelle pression de l'échantillon ($P_2$). Cette pression $P_2$, dite d'expansion ($P_2<P_1$), permet de déterminer le volume du matériau par l'équation :

$$V_{matériau} = V_{cellulle} \cdot \left(1 - \frac{P_2}{P_1 - P_2}\right) \qquad \text{Eq. II-1}$$

La mesure de masse volumique est effectuée avec des fibres sèches après passage à l'étuve. Les fibres sont placées dans la cellule à l'aide de gants pour ne pas modifier la teneur en eau. La cellule ainsi remplie est ensuite pesée puis déposée dans l'appareil. Dix essais ont été réalisés pour chaque type de fibre. Cette méthode de mesure est adaptée aux solides poreux à porosité ouverte car l'hélium est de faible diamètre atomique et pénètre facilement dans les pores.

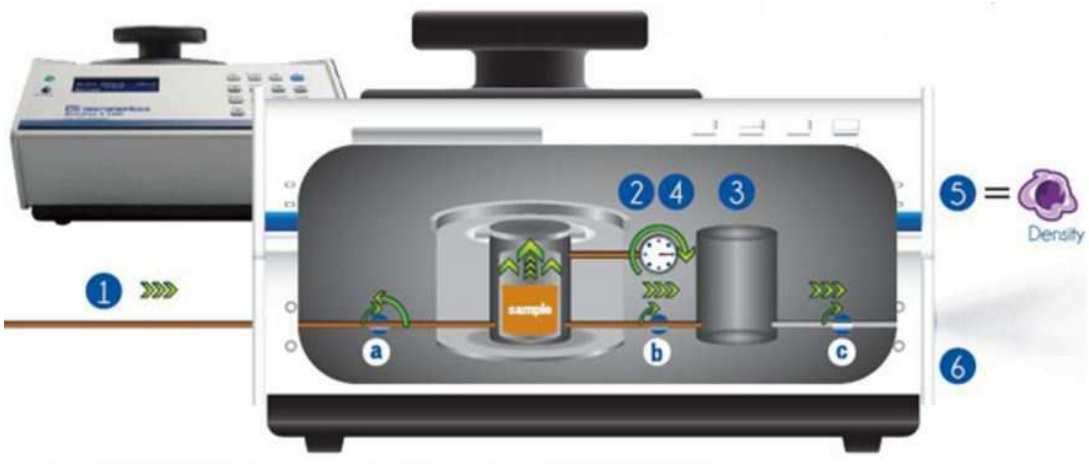



Figure II-4 : Pycnomètre à hélium

La mesure de la masse sèche des fibres est effectuée à température ambiante à l'aide d'une balance de résolution 0,1 mg. La masse volumique est prise égale à la moyenne des dix valeurs obtenues. Expérimentalement, la masse volumique absolue des fibres de lin utilisées dans cette étude est égale à 1,337 ± 0,001 g.cm$^{-3}$ et celle des fibres de paille est de 1,182 ± 0,001 g.cm$^{-3}$. Ces résultats semblent montrer que les fibres de pailles possèdent une porosité plus importante que les fibres de lin.

### II.1.2.3. Coefficient d'absorption d'eau

Le coefficient d'absorption d'eau correspond à l'évolution au cours du temps de la teneur en eau de fibres immergées. Cette caractéristique est essentielle étant donné que cela influencera d'une part le mélange à l'état frais, lorsque l'eau de gâchage est disponible et peut être absorbée par les fibres, mais également le comportement à long terme puisque la capacité des fibres végétales à absorber plus ou moins d'eau pourra entrainer des variations volumiques des fibres dans le mélange et engendrer des modifications de l'interface fibres/matrice.

Cet essai est dérivé d'un protocole expérimental mis au point par le groupe RILEM TC 236‑BBM visant à mesurer l'absorption d'eau des granulats végétaux (Amziane et al., 2017) et

a été utilisé dans des travaux sur les fibres de lin (Page, 2017). L'essai a été répété six fois pour chaque échantillon afin d'améliorer la précision de l'essai.

Pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau, les fibres sont immergées dans de l'eau pendant différentes durées (1 minute, 5 minutes, 15 minutes, 1 heure, 4 heures, 24 heures et 48 heures) (Figure II-5(a)). Après immersion, les fibres sont essorées à l'aide d'une centrifugeuse à une vitesse de 500 tours par minutes pendant 15 secondes (Figure II-5(b)). Puis, la teneur en eau est déterminée pour les différentes durées et permet de déterminer la courbe d'absorption d'eau au cours de temps.

(a) Immersion les fibres dans l'eau

(b) Essorage les sachets de fibres

Figure II-5 : Dispositif de mesure l'absorption d'eau des fibres

La Figure II-6 présente les courbes d'absorption d'eau des fibres en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent que ce coefficient d'absorption pour la paille est très élevé. En effet, les fibres de pailles testées sont capables d'absorber une masse d'eau jusqu'à trois fois supérieure à leur masse propre. La valeur moyenne d'absorption à 24 heures est de 309 %. Dans le cas du lin, ce coefficient est d'environ 185 %.

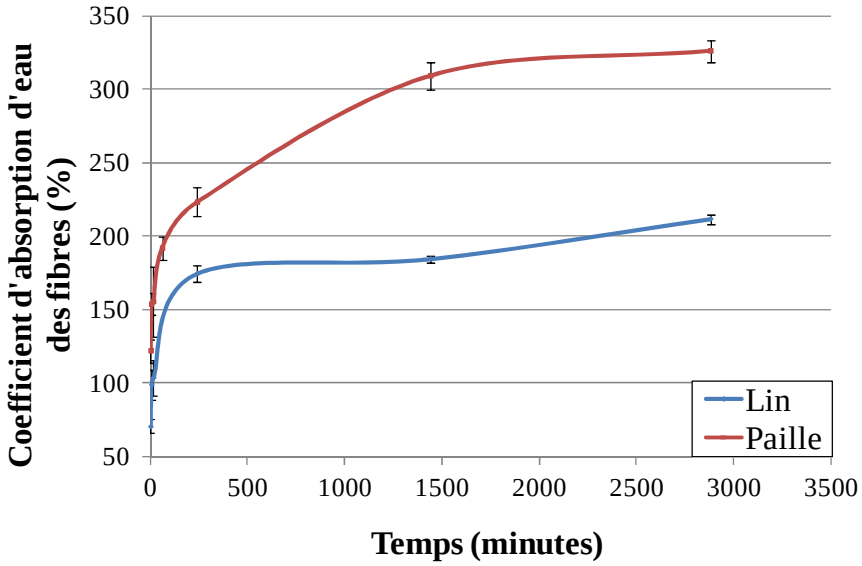



Figure II-6 : Cinétique d'absorption d'eau des fibres

Ces coefficients peuvent être expliqués par la structure de ces deux types de fibres. La Figure II-7 présente la coupe transversale d'une tige de lin, qui se compose d'une couche d'écorce, des faisceaux des fibres, de bois et de vide au milieu de la tige. Le bois est la partie le plus poreuse étant donné que la taille moyenne des pores est d'environ 30 µm de diamètre (Figure II-8(a et b)). Dans le cas de la paille, la surface l'extérieur de la fibre est lisse, à l'intérieur, il y a des vide de taille varie autour de 45 µm de diamètre (Figure II-8(c et d)). Pour chaque pore, la paille peut donc absorber une quantité plus importante d'eau. De plus, la mesure de la masse volumique absolue des fibres a montrée que la paille possède une porosité plus importante que le lin et permet donc d'expliquer cette absorption plus importante pour la paille.

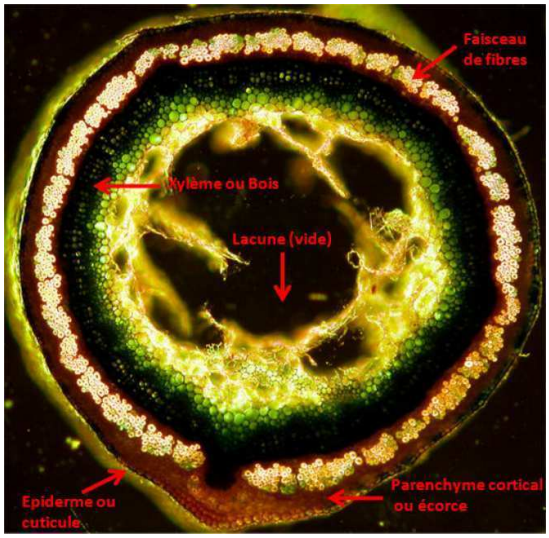



Figure II-7 : Section transversale d'une tige de lin (Alix, 2006) cité par (Magniont, 2010)

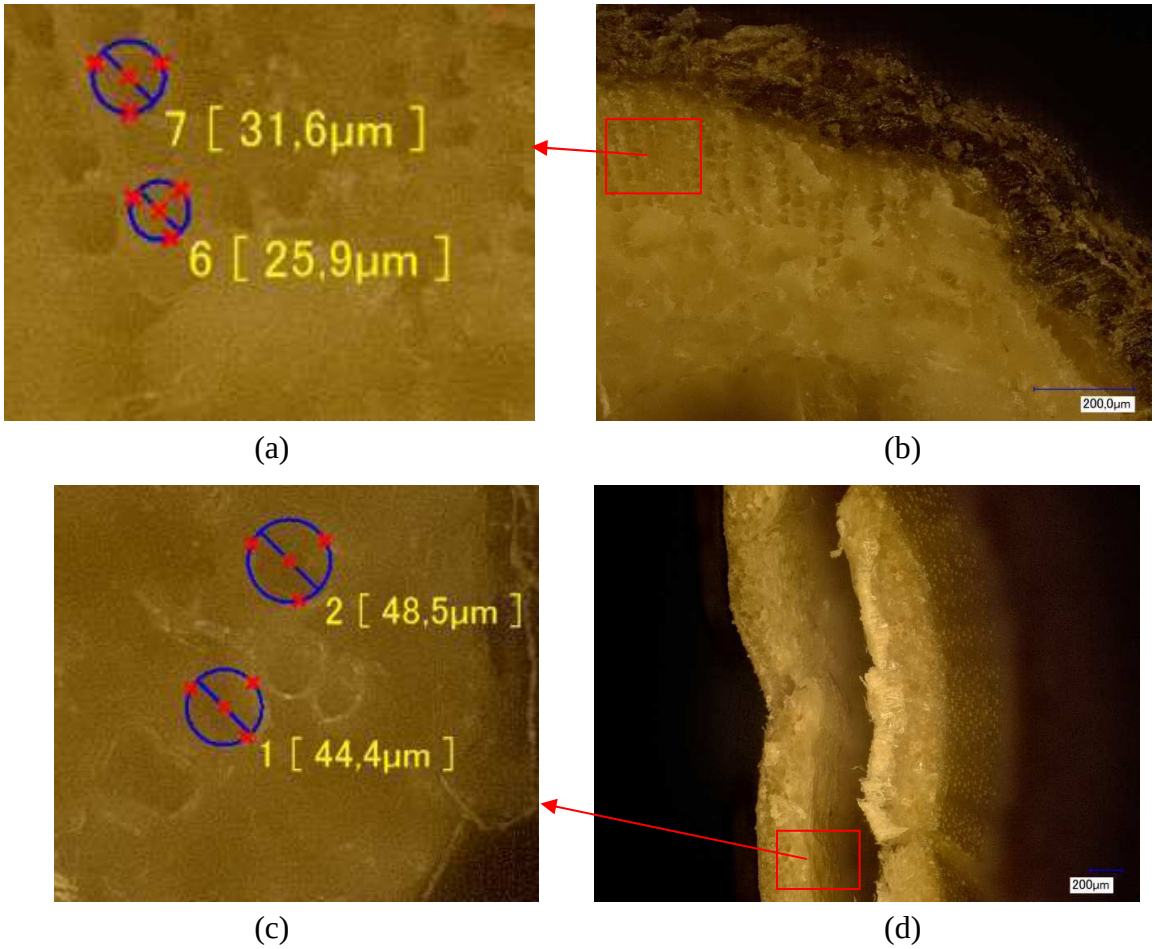



Figure II-8 : Taille des vides dans le bois du lin (a), partie de la section transversale de la tige de lin (b), taille des vides à l'intérieur de la paille (c) et section transversale de la paille (d)

### II.1.2.4. Caractéristiques mécaniques

Avant de valoriser les fibres dans le matériau de construction, leurs propriétés mécaniques doivent être déterminées. Des essais de traction sur les fibres unitaires de paille et de lin ont été réalisés dans les conditions ambiantes.

Des fibres de 10 cm de longueur ont été utilisées pour déterminer la résistance en traction. Afin d'éviter l'endommagement des fibres en contact avec le mors, les deux extrémités de la fibre ont été protégées par du ruban adhésif sur une longueur de 3 cm de chaque coté (Figure II-9(a)). Donc, la longueur initiale de fibre est considérée égale à 4 cm pour le calcul de la déformation de l'échantillon. La fibre est ensuite disposée dans les mors à serrage manuel de la machine d'essai (Figure II-9(b)). La vitesse de chargement est fixée à 1mm/minute (Le Hoang, 2013) tout au long de l'essai. Au cours de l'essai, la force appliquée et le déplacement sont enregistrées afin de calculer la contrainte et la déformation.

(a) Fibres utilisés pour l'essai de traction

(b) Dispositif de l'essai

Figure II-9 : Essai de traction des fibres

Sur la centaine d'échantillons réalisés, seuls les échantillons avec un endommagement dans la zone au milieu ont été pris en compte Figure II-10(a et b). Dans le cas de la paille, les fibres ne présentent pas de ruptures complètes mais des ruptures incomplètes à la zone pliée de la fibre due à la récolte Figure II-10(a). En effet, la paille possède une forme ronde mais, lors de la récolte, la paille est rassemblée en botte et est écrasée. La forme de paille est alors considérée comme rectangulaire (section transversale). Dans le cas du lin, la forme de la fibre est considérée comme circulaire tout au long de l'essai. La mesure de la section des fibres a été réalisée à l'aide un pied à coulisse d'une précision 0,01 mm.

(a) Fibres de paille

(b) Fibres de lin

Figure II-10 : Fibres après rupture

Concernant la déformation, les faibles dimensions des fibres ne permettant pas d'utiliser d'un extensomètre. Donc, l'allongement de la fibre est considéré égal au déplacement au cours de l'essai. La Figure II-11 présente la courbe contrainte-déformation des deux types de fibres. Le début de la courbe est généralement assimilé à la mise en place de la fibre et du dispositif de traction, donc le module d'élasticité est calculé à l'aide de la partie linéaire de la courbe après mise en place de la fibre.

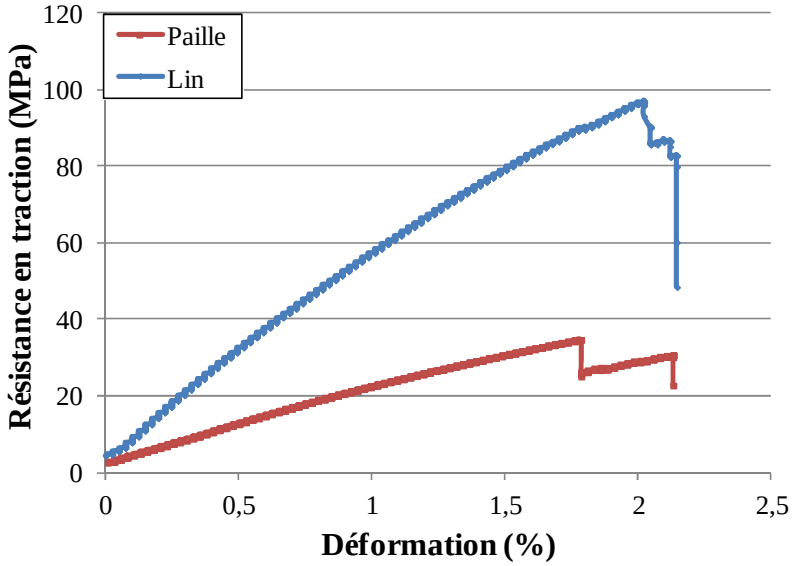



Figure II-11 : Courbes contrainte-déformation de la paille et du lin.

Le Tableau II-5 présente les résultats concernant la résistance en traction et le module d'élasticité des fibres de paille et de lin. Les résultats montrent que le lin est quatre fois plus résistant que la paille. Concernant la paille, cette résistance est deux fois plus importante que celle déterminée par (Pullen et Scholz, 2011). Il sera intéressant d'observer l'influence de ce paramètre sur le comportement mécanique du sol renforcé avec ces deux types de fibres.

Tableau II-5 : Caractéristiques mécaniques des fibres

| | La paille | Le Lin |
|---|---|---|
| Contrainte à la rupture (MPa) | 28,83 ± 7,61 | 111,57 ± 18,24 |
| Module d'élasticité (GPa) | 1,73 ± 0,33 | 5,20 ± 0,80 |

### II.1.3. Sols retenus

Les essais géotechniques réalisés (II.1.1) permettent d'avoir une vue générale sur les types de sols. A partir de ces données, les sols ayant les caractéristiques les plus intéressantes seront choisis pour fabriquer de la bauge. Il est à noter que, selon la bibliographie, il existe une composition usuelle du sol pour la bauge (I.3.1). Les sols choisis pour cette étude ne possèdent pas ces caractéristiques, les formulations de bauge seront donc effectuées à l'aide de mélanges de sols.

En ce qui concerne le squelette du mélange de sol, il est nécessaire que le matériau soit le plus dense possible afin d'obtenir la meilleure résistance mécanique possible. D'après la teneur en fines, les sols 1 et 5 possèdent les pourcentages les plus importants de gros grains. De plus, le sol 1 possède une fraction graveleuse plus importante que le sol 5 et sa courbe granulométrique ne montre pas de discontinuité. Le sol 1 sera donc utilisé pour former le squelette du matériau.

Afin d'augmenter la cohésion du mélange de sol, il est nécessaire d'ajouter des particules fines pour remplir les espaces entre les grains sableux et graveleux afin d'y jouer un rôle de liant. Pour cela, étant donné que le sol 4 est le sol le plus fin des 6 sols (teneur en fines de 89,51%), il sera utilisé pour les mélanges de sol. De plus, ce sol est déjà utilisé sur des chantiers de construction en bauge, cela nous permettra d'obtenir une formulation usuelle de bauge. Cependant, il serait intéressant de comparer une formulation usuelle avec une formulation expérimentale. Etant donné que le sol 4 est considéré comme moyennement argileux (12<IP<25), il semblerait judicieux d'utiliser un sol considéré comme peu argileux (IP<12) ou argileux (25<IP<40) pour étudier l'influence de l'activité argileuse sur le mélange. De plus, afin de ne pas augmenter le nombre de variable, il semble pertinent de choisir un sol à la granulométrie proche du sol 4. Etant donné sa granulométrie et son caractère argileux, le sol 3 sera également utilisé.

## II.2. Formulations et réalisations des composites terre-fibre

### II.2.1. Formulations des composites terre-fibre

Comme expliqué dans le paragraphe 0, deux différents mélanges de sols seront donc effectués : un mélange A (sol 1 et sol 3) et un mélange B (sol 1 et sol 4). Un sol typique utilisé en bauge doit contenir environ 30 % de gravier, 35 % de sable et 35 % de limon et d'argile avec une variation de ces paramètres de plus ou moins 10 % (Akinkurolere et al., 2006). Pour respecter cela, le dosage en masse retenu est de deux quantités de sol 1 pour une de sol 3 ou 4. Les courbes granulométriques de ces mélanges sont présentées dans la Figure II-12. Les courbes granulométries des 2 formulations sont proches avec une différence pour le diamètre

inférieur à 0,3 mm. Le mélange A comporte 26,7 % de gravier ; 40,5 % de sable et 32,8 % de limon et d'argile. Le mélange B comporte 26 % de gravier ; 35,5 % de sable et 38,5 % de limon et d'argile. Les mélanges utilisés sont donc proches une formulation classique de bauge.

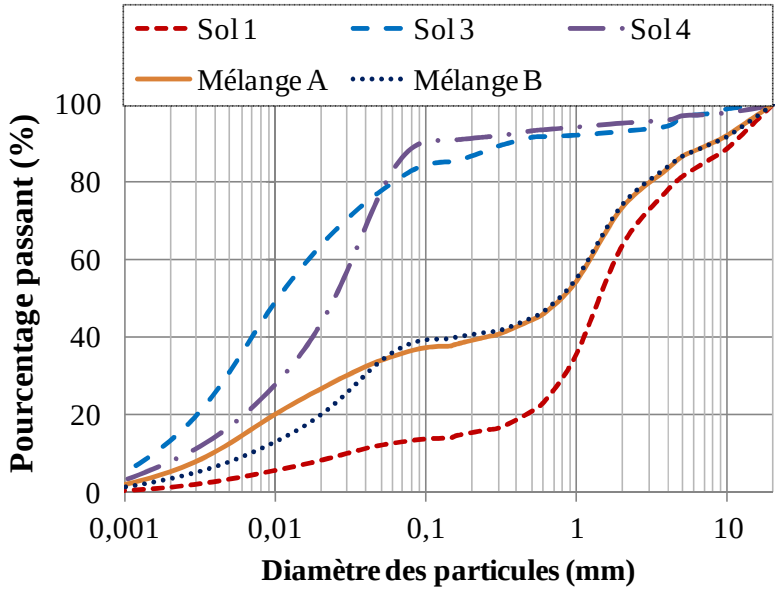



Figure II-12 : Courbe granulométrique des trois sols et deux mélanges

Concernant fibres, selon la bibliographie, un pourcentage de paille d'environ 1 à 3 % en masse sèche permet d'obtenir des performances mécaniques suffisantes pour la construction de bâtiments en R+1 (I.5.2.1). Pour cette étude, la teneur en masse sèche de fibre utilisée ira de 0 à 3 %. La longueur des fibres sera également étudiée. Les longueurs utilisées seront de 5 et 10 cm. Ces longueurs ont été choisies en prenant en compte les dimensions des différentes éprouvettes à fabriquer (Papika, 2010). Cela permettra d'étudier l'influence des fibres en fonction de leurs quantités ainsi que de leurs longueurs.

Le troisième paramètre à prendre en compte est la teneur en eau du mélange. Selon les types de construction en terre, la teneur en eau varie de la teneur à l'optimum Proctor (pisé) à une teneur en eau plus importante permettant d'obtenir un mélange plastique facilitant la mise en œuvre (bauge). Des mesures sur chantier réalisées en partenariat avec le Parc Naturel Régional des Marais du Cotentin et du Bessin ont permis de déterminer que la teneur en eau utilisée en bauge est supérieure d'environ 6 % à la teneur en eau à l'optimum Proctor. Pour cette étude, les teneurs en eau utilisées seront donc : la teneur en eau à l'optimum Proctor ($W_{OPN}$), la teneur en eau supérieure de 3 % par rapport à l'optimum Proctor ($W_{INT}$) et la teneur en eau supérieure de 6 % par rapport à l'optimum Proctor ($W_{BAU}$). Ces différentes teneurs en eau nous permettrons d'évaluer l'influence de la teneur en eau de départ sur les différentes propriétés finales du composite terre-fibre. Différents types de moules seront utilisés pour la fabrication des échantillons selon les essais à faire : un moule cylindrique CBR (cl), un moule

cubique de 15x15x15 cm (cb), un moule prismatique (pm) de 7x7x28 pour tous les formulation à la $W_{BAU}$ ou de 14x14x56 cm (supplémentaire pour les formulation 13→15)).

Le Tableau II-6 récapitule des différentes formulations qui seront effectuées dans cette étude. Pour chaque essai, un nombre défini de formulations seront utilisées selon l'objectif visé. Les caractéristiques déterminées seront : la cinétique de séchage (1) ; la résistance en compression (2), en flexion (3) ; le retrait (4) ; la conductivité thermique (5) ; l'isotherme sorption/désorption (6) ; la perméabilité à la vapeur d'eau (7).

Tableau II-6 : Formulations étudiées

| Mélange | Formulations | Fibre | Longueur de fibres (cm) | Teneur de fibre ajoutée (F) (%) | Teneur en eau du mélange (E) (%) | | Essai | Type échantillon | Rapport E/F |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | A-1 | - | - | - | 12 | $W_{OPN}$ | 1, 2, 6 | cl | - |
| A | A-2 | lin | 5 | 0,5 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 23 |
| A | A-3 | lin | 10 | 0,5 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 23 |
| A | A-4 | lin | 5 | 1 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 11,5 |
| A | A-5 | lin | 10 | 1 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 2, 6 | cl | 11,5 |
| A | A-6 | paille | 5 | 0,5 | 12 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 24 |
| A | A-7 | paille | 10 | 0,5 | 11,7 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 23,4 |
| A | A-8 | paille | 5 | 1 | 12 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 12 |
| A | A-9 | paille | 10 | 1 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 1, 2, 6 | cl | 11,5 |
| A | A-10 | paille | 10 | 1 | 11,5 | $W_{OPN}$ | 1, 2 | cb | 11,5 |
| A | A-11 | paille | 10 | 1 | 14,5 | $W_{INT}$ | 1, 2 | cb | 14,5 |
| A | A-12 | paille | 10 | 1 | 17,5 | $W_{BAU}$ | 1, 2 | cb | 17,5 |
| A | A-13 | - | - | - | 18 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | - |
| A | A-14 | paille | 5 | 1 | 18 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 18 |
| A | A-15 | paille | 5 | 2 | 18 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 9 |
| A | A-16 | paille | 5 | 3 | 18 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 6 |
| B | B-1 | - | - | - | 10 | $W_{OPN}$ | 1, 2, 6 | cl | - |
| B | B-2 | lin | 5 | 0,5 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 20 |
| B | B-3 | lin | 10 | 0,5 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 20 |
| B | B-4 | lin | 5 | 1 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 10 |
| B | B-5 | lin | 10 | 1 | 10 | $W_{OPN}$ | 2, 6 | cl | 10 |
| B | B-6 | paille | 5 | 0,5 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 20 |
| B | B-7 | paille | 10 | 0,5 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 20 |
| B | B-8 | paille | 5 | 1 | 10 | $W_{OPN}$ | 2 | cl | 10 |
| B | B-9 | paille | 10 | 1 | 12 | $W_{OPN}$ | 1, 2, 6 | cl | 12 |
| B | B-10 | paille | 10 | 1 | 12 | $W_{OPN}$ | 1, 2 | cb | 12 |
| B | B-11 | paille | 10 | 1 | 15 | $W_{INT}$ | 1, 2 | cb | 15 |
| B | B-12 | paille | 10 | 1 | 18 | $W_{BAU}$ | 1, 2 | cb | 18 |
| B | B-13 | - | - | - | 16 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | - |
| B | B-14 | paille | 5 | 1 | 16 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 16 |
| B | B-15 | paille | 5 | 2 | 16 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 8 |
| B | B-16 | paille | 5 | 3 | 18,5 | $W_{BAU}$ | 2-7 | pm | 6,2 |

### II.2.2. Méthodologies de fabrication des échantillons

Après avoir défini les formulations utilisées, les différentes techniques de fabrication des échantillons vont être présentées. Tout d'abord, il faut préparer les différents matériaux composant la bauge (sols, fibres). Puis, selon le type d'échantillon, la méthode de fabrication du mélange terre-fibre sera présentée avec une description des différentes étapes.

#### II.2.2.1. Méthode de préparation

Les différents sols sont séchés dans une étuve ventilée à 50°C et tamisés à 20mm (NF P94-093, 2014). La fraction supérieure à 20 mm est éliminée étant donné les tailles des échantillons fabriqués. Les fibres sont coupées l'aide un massicot. La Figure II-13 présente les 3 sols et les fibres prêtes à utiliser : (a) fibres, (b) sol 1, (c) sol 3, (d) sol 4.

(a) Fibres (b) Sol 1 (c) Sol 3 (d) Sol 4

Figure II-13 : Fibres et les sols utilisés

La méthode de préparation est identique pour les différents mélanges. Les sols et les fibres sont d'abord mélangés manuellement dans un bac. Puis, l'eau nécessaire est ajoutée et le mélange se poursuit jusqu'à obtention d'un mélange homogène (Figure II-14). Cette procédure de fabrication des éprouvettes permet de simuler au mieux la méthode de fabrication sur chantier.

(a) Sol A (b) Sol A mélangé avec la paille (c) Mélange A

Figure II-14 : Etapes de préparation d'un mélange terre-fibre.

### II.2.2.2. Echantillons cylindriques

Pour les échantillons cylindriques, la démarche de fabrication est similaire à celle de l'essai Proctor sur moule CBR excepté que l'ajout d'eau est effectué juste avant le début de fabrication. En effet, l'échantillon est réalisé en trois couches compactées en 56 coups chacune. L'échantillon est ensuite arasé au niveau de la réhausse. Si des éléments de plus de 10 mm sont entraînés dans cette opération en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, il est nécessaire de remplir ceux-ci avec des éléments fins. Ces échantillons cylindriques ont une dimension de Ø152 x H152 mm. Après démoulage, les échantillons sont placés dans la chambre de conservation dans des bacs métalliques afin d'éviter la déformation du échantillon dans l'état humide ainsi qu'un transfert d'eau. La Figure II-15 montre l'aspect d'échantillons avec fibre et sans fibre.

(a) Mélange A (à gauche) et mélange B (à droite) avec 1% de 10 cm de la paille

(b) Mélange A (à gauche) et mélange B (à droite) sans fibre

Figure II-15 : Echantillons à $W_{OPN}$ pour l'essai de compression

Des échantillons cylindriques Ø152 x H60 mm sont également utilisés pour l'essai de sorption/désorption. Ils sont réalisés à l'aide du moule CBR. Cependant, étant donné la hauteur de ces échantillons, le compactage Proctor n'est pas utilisé. Etant donné que les courbes Proctor sont déterminés, la quantité du mélange terre-fibre nécessaire est déterminée pour obtenir la hauteur voulue. Ces échantillons seront utilisés dès fabrication des échantillons.

### II.2.2.3. Echantillons cubiques

Pour la fabrication des échantillons cubiques, les moules utilisés sont de dimension 150x150x150 mm. La quantité de matériau à compacter est déterminée à l'aide de la courbe Proctor pour les différentes teneurs en eau. Le principe du compactage est similaire à celui du Proctor. Après huilage du moule, les matériaux sont compactés en 3 couches avec 56 coups par couche à l'aide d'un cylindre métallique de 50 mm de diamètre et de 182 mm de hauteur (Figure II-16). Cela engendre une énergie de compactage différente par rapport aux échantillons

cylindriques. Cependant, le but recherché est d'obtenir une densité similaire à celle de l'essai Proctor. Ces échantillons sont démoulés après une à deux semaines.

(a) Huiler le moule (b) Compacter et surfacer les échantillons

Figure II-16 : Etapes de fabrication des échantillons cubiques

### II.2.2.4. Echantillons prismatiques

Pour la fabrication des échantillons prismatiques, les moules utilisés sont de dimension 70x70x280 mm et 140x140x560 mm. De même que pour les échantillons cubiques, la quantité de matériau à compacter est déterminée à l'aide de la courbe Proctor pour les différentes teneurs en eau. Le compactage est également réalisé à l'aide d'un cylindre métallique de 50 mm de diamètre et de 182 mm de hauteur. En ce qui concerne la dernière couche, il est important de surfacer l'échantillon (Figure II-17). Ces échantillons sont démoulés après 2 jours.

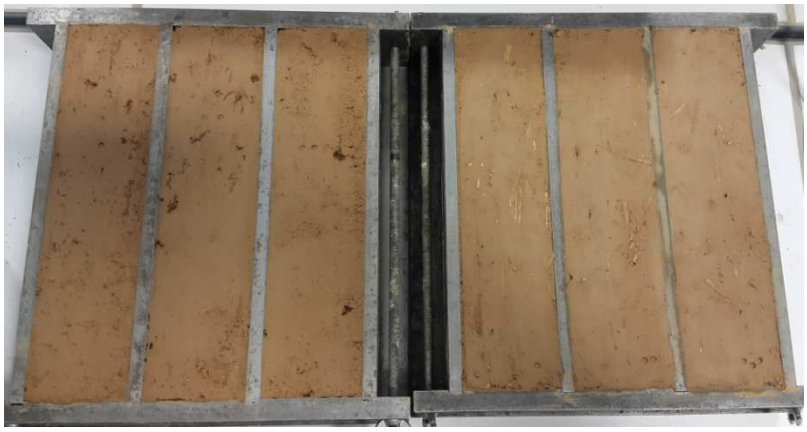


Figure II-17 : Echantillons prismatique 70x70x280 mm

### II.2.3. Conservation et condition de cure

Dans cette étude, différentes méthodes de conservation des échantillons ont été utilisées. La première méthode est une mise en salle de conservation à une température de 21±1°C et une humidité relative de 60 % proche d'études précédentes (C1) (Coventry, 2004; Miccoli et al., 2014) (appliqué aux formulations 1→12 et 2 mélanges). La deuxième méthode correspond à la mise en étuve à une température de 50°C sans ventilation (C2) (appliqué pour la formulation A-9). Ces différentes conditions de conservations ont été fixées pour déterminer l'influence des conditions de cure sur le séchage et la résistance mécanique du matériau. Cependant, il est à noter que la cure en salle de conservation a permis le développement de champignons autour des fibres de paille sur l'extérieur des échantillons dû au manque de rayons de soleil et à une trop grande humidité relative.

Une troisième méthode a donc été mise en place. Les éprouvettes ont été placés dans le laboratoire à une température de 20±2°C et une humidité relative de 50±5 % (C3) (appliqué aux formulations 13→16 et 2 mélanges). La présence de lumière naturelle à travers les différentes ouvertures du laboratoire permet d'empêcher le développement des champignons.

Les échantillons sont retournés tous les deux jours lors des 14 premiers jours de cure puis une fois par semaine. Le but étant de faire sécher uniformément les différents cotés de l'échantillon afin d'obtenir une teneur en eau similaire dans tout l'échantillon.

## II.3. Méthodes expérimentales

### II.3.1. Propriétés mécaniques et physiques

#### II.3.1.1. Essai de compression simple

Dans cet essai, l'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance en compression simple a été mesurée sur les éprouvettes cylindriques de dimensions Ø152 × H152 mm, les éprouvettes cubiques 150x150x150 mm et les échantillons prismatiques après rupture à l'essai de flexion 70x70x280 mm. L'essai de compression uni‑axiale a été mené à l'aide d'une presse IGM de capacité 250 kN (Figure II-18).

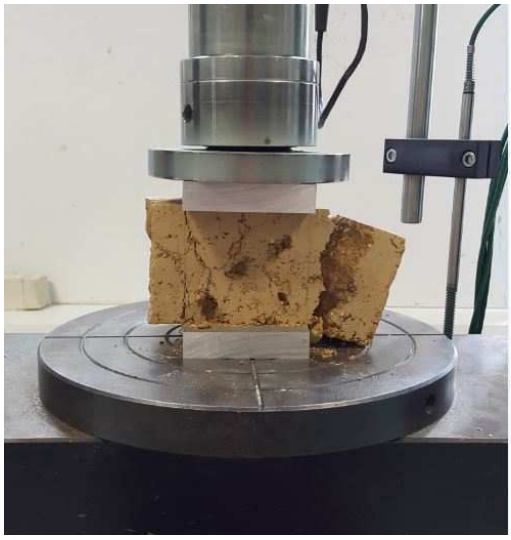


Figure II-18 : Essai de compression simple d'un échantillon prismatique

La presse est pilotée en force, avec une vitesse de chargement imposée de 0,05 kN/s. La courbe contrainte-déformation est obtenue à l'aide d'un capteur de déplacement de 20 mm. En général, pour les échantillons cylindriques, le ratio entre la hauteur et la longueur est de 2 (H/D=2). Ici, étant donné que ce ratio est de 1, un coefficient de correction de 0,87 a été utilisé en se basant sur la norme (ASTM C39M - 03, 2003) qui est utilisée pour le béton. Au minimum trois éprouvettes ont été testées par formulation. La résistance à la compression est calculée selon l'Eq. II-2 :

$$R_c = \frac{F_{c,\max}}{S} \qquad \text{Eq. II-2}$$

Avec :

- $R_c$ la résistance en compression (MPa) ;
- $F_{c,max}$ la charge maximale en compression provoquant la rupture (N);
- S la surface transversale de l'éprouvette ($mm^2$).

### II.3.1.2. Essai de flexion 4 points

Comme montré dans la bibliographie, l'intérêt premier de l'incorporation de fibres dans le sol est d'améliorer de son comportement en flexion : augmentation de sa résistance (Binici et al., 2005; Bouhicha et al., 2005; Ghavami et al., 1999) et/ou amélioration de sa ductilité et de sa ténacité (Hejazi et al., 2012). Pour déterminer ce comportement, il est possible de procéder à des essais de flexion 3 points ou 4 points. Le dernier présente l'avantage d'un moment constant entre les deux appuis supérieurs. Le volume de l'échantillon testé est

donc plus grand. L'essai de flexion 3 points se caractérise par une contrainte maximale à mi-travée, ce qui peut dans certains cas surestimer la résistance en flexion.

La résistance en flexion a donc été déterminée ici par l'essai de flexion 4 points sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 70x70x280 mm et 140x140x560 mm. Les essais sont réalisés sur une presse IGM 50KN selon la norme (NF EN 12390-5, 2012). Les essais en flexion sont effectués après stabilisation de la masse des éprouvettes. Les valeurs de la force et de déplacement de traverse sont enregistrées simultanément. La vitesse de déplacement utilisée lors des essais de flexion est de 0,3 mm/min (Magniont, 2010), ce qui permet d'analyser la phase post-rupture du comportement. Trois éprouvettes sont testées pour chaque formulation. Le capteur de déplacement utilisé possède une course de 20 mm. L'hypothèse sera faite que ce déplacement est représentatif de la flèche maximale des éprouvettes. La déformation du bâti et l'écrasement de l'éprouvette qui peut intervenir au niveau des points d'appui seront donc négligées.

L'éprouvette repose sur deux appuis simples, distants de l, et la charge, F est appliquée en deux points distants de d (flexion 4 points : d=l/3), symétriques par rapport au milieu de la travée (Figure II-19). La longueur, l, entre appuis, est de 21 cm pour les échantillons 70x70x280 mm et de 42 cm pour les échantillons 140x140x560 mm. Les composites, de section $d_1$ x $d_2$ (dans notre cas $d_1=d_2=d=70$ mm ou 140 mm) étant supposés homogènes, la résistance en flexion sera déterminée par l'Eq. II-3 :

$$R_f = \frac{F_{f,\max} \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \qquad \text{Eq. II-3}$$

Avec :

- $R_f$ la résistance en flexion (MPa) ;
- $F_{f,max}$ la charge maximale en flexion provoquant la rupture (N);
- l la distance entre les appuis inférieurs (mm);
- $d_1$ et $d_2$ respectivement la largeur et la hauteur de l'éprouvette (mm).

La flexion 4 points présente l'avantage d'une distribution uniforme des contraintes normales entre les points d'application de la charge et garantit, dans cet intervalle, une rupture gouvernée par le défaut le plus critique.

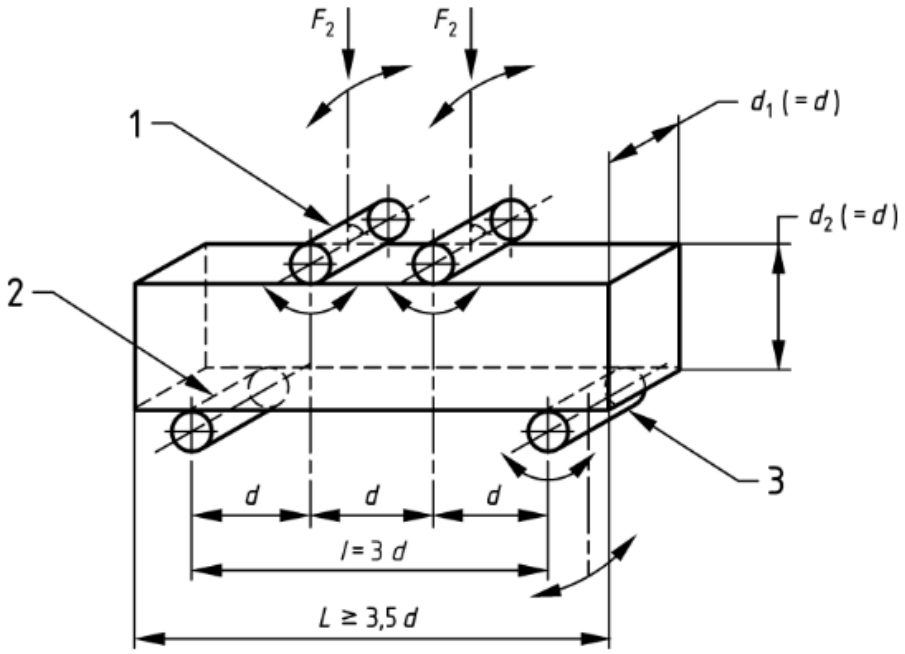
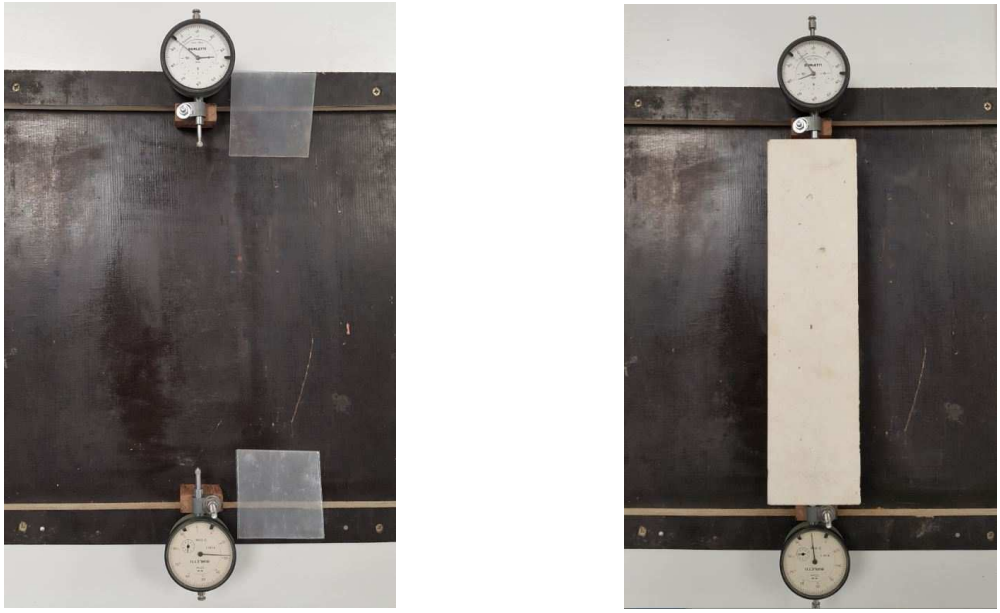



Figure II-19: Flexion quatre points (NF EN 12390-5, 2012)

### II.3.1.3. Mesure du retrait

La mesure de retrait est effectuée sur les échantillons 70x70x280 mm. Le retrait est mesuré sur les deux extrémités de chaque éprouvette et le retrait total est donc la somme des retraits à chaque extrémité.

Pour effectuer cette mesure, un banc d'essai a été fabriqué à l'aide de comparateurs, de plaques de bois et de plastique rigide. Deux comparateurs (précision de $10^{-2}$ mm) ont été fixés sur une plaque en bois pour mesurer le retrait des deux cotés de l'échantillon (Figure II-20(a)). Les échantillons sont démoulés deux jours après confection et sont installés sur la plaque. Afin de suivre l'évolution de la teneur en eau, l'ensemble plaque-comparateurs-plastiques rigides est pesé avant démoulage de l'échantillon. Etant donné que la mesure de retrait débute deux jours après confection, l'échantillon a donc déjà, au départ de la mesure, subi un retrait. Pour mesurer le retrait réel, un échantillon du béton, dont le retrait est connu, est installé au milieu de la plaque pour calibrer les deux comparateurs (Figure II-20(b)).



(a) (b)

Figure II-20: Dispositif d'essai pour la mesure du retrait

Avant d'installer les éprouvettes, la surface de la plaque est huilée afin d'éviter le frottement entre l'éprouvette et la plaque, ce qui pourrait influencer le retrait. Puis, l'échantillon en terre est installé sur la plaque en le protégeant par les deux plastiques transparents rigides (Figure II-21(a)). Le plastique rigide est utilisée afin d'éviter que la contrainte due au comparateur ait lieu sur une surface réduite et engendre un retrait non représentatif de l'échantillon. La valeur sur les deux comparateurs est enregistrée dès la mise en place de l'éprouvette (Figure II-21(b)). Afin de suivre l'évolution de la teneur en eau, l'ensemble plaque-comparateurs-plastiques rigides est pesé avant démoulage de l'échantillon.

Etant donné l'évolution rapide du retrait et de la teneur en eau dans les premiers temps, les mesures de masse et valeurs des comparateurs sont relevées deux fois par jour les 5 premiers jours puis une fois par jour jusqu'à la fin du retrait.

(a)

(b)

Figure II-21: Mesure du retrait d'un échantillon

## II.3.2. Conductivité thermique

### II.3.2.1. Méthode du fil chaud

La méthode du régime transitoire est souvent utilisée pour des matériaux hétérogènes qui ont un taux d'humidité élevé. Dans cette méthode, une source de chaleur est installée dans le sol, la variation de la température du sol en fonction du temps est mesurée. Cette méthode nécessite un temps de mesure court. Donc le changement de la structure dans le temps peut être négligeable.

La méthode du fil chaud est l'une des méthodes à état transitoire utilisée pour mesurer la conductivité thermique du sol à l'état non saturé (Tang, 2005). Un fil métallique mince et droit est inséré dans l'échantillon qui est pré-percé par une mèche. Tout d'abord, un courant électrique traverse le filet pour échauffer l'échantillon. La température mesurée par un thermocouple installé au milieu de ce fil est enregistrée en fonction du temps. La conductivité thermique du sol est finalement calculée à partir de la variation de température dans le temps et de la puissance du courant électrique. En effet, le fil et le thermocouple sont installés dans une sonde mince et longue.

Le principe de cette méthode est de calculer la conductivité thermique ($\lambda$), la diffusivité thermique (D) et la résistivité thermique (R) par l'analyse de la dissipation de chaleur depuis une ou deux sources de chaleur linéaire soumise à un voltage connu.

L'équation pour la conduction de chaleur radiale dans un milieu isotrope et homogène est :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 r} + \mathrm{r}^{-1}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad \text{Eq. II-4}$$

Où :

T : température (K ou $^{o}$C) ;

t : temps (s) ;

D : diffusivité thermique (m²/s) ;

r : distance radiale (m).

La sonde électriquement chauffée est introduite dans le milieu, l'augmentation de température à partir d'une température initiale $T_0$ , pour une distance r, est:

$$\Delta T = T - T_0 = -\left(\frac{q}{4\pi\lambda}\right)\mathrm{Ei}\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \qquad \text{Eq. II-5}$$

Où :

q : la chaleur produite par unité de longueur par unité de temps (W/m) ;

λ : la conductivité thermique du milieu (W/m.K) ;

Ei : la fonction intégrale exponentielle, et Ei(x) est définie par :

$$Ei(\mathrm{x}) = -\int_{-x}^{\infty}\frac{e^{-t}}{t}dt = \int_{-\infty}^{x}\frac{e^{t}}{t}dt = \gamma + \ln x + \sum_{k=1}^{\infty}\frac{x^k}{k.k!} \qquad \text{Eq. II-6}$$

$$Ei(\mathrm{x}) = -\mathrm{Ei}(-\mathrm{x})$$

Avec γ est la constante d'Euler et γ=0,5772

Donc

$$\Delta T = \left(\frac{q}{4\pi\lambda}\right)\mathrm{Ei}\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) = \left(\frac{q}{4\pi\lambda}\right)\left(-\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4Dt}\right) + \frac{r}{4Dt} - \left(\frac{r^2}{8Dt}\right)^2 + \ldots\right) \qquad \text{Eq. II-7}$$

Lorsque t est grand, les termes d'ordre supérieur peuvent être négligé, on a :

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda}\left(\ln(\mathrm{t}) - \gamma - \ln\left(\frac{-r^2}{4D}\right)\right) \qquad \text{Eq. II-8}$$

Cela montre la relation entre ΔT et ln(t) est linéaire avec une pente $m = \frac{q}{4\pi\lambda}$ (q est calculé grâce à l'énergie électrique appliquée pour chauffer la sonde). Cette relation peut être représentée dans le plan T=f(ln(t)) et permet de calculer la conductivité thermique (Figure II-22) :

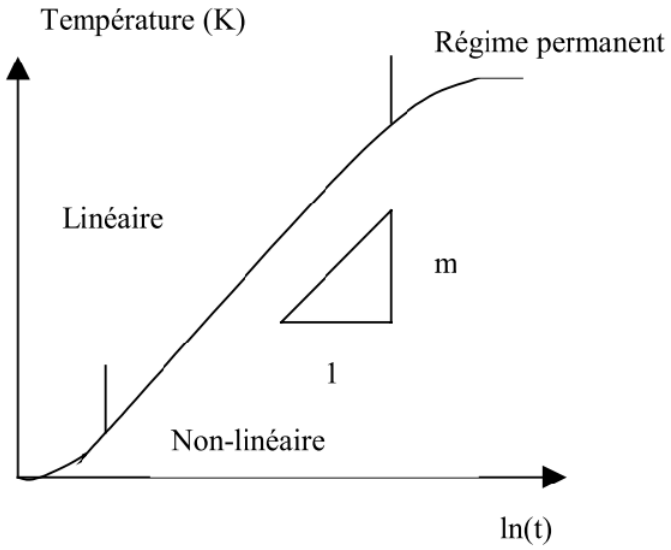



Figure II-22: Résultat expérimental sur la variation de la température du thermocouple dans le temps (A.-M. Tang, 2005)

La mesure de conductivité thermique est donc soumise aux hypothèses suivantes :

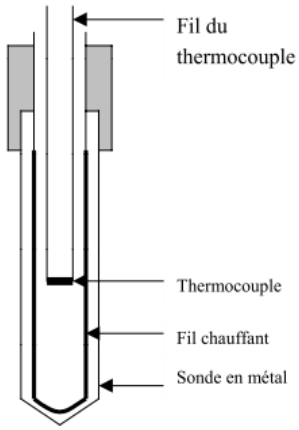
- la source de chaleur linéaire est considérée comme une source de chaleur infiniment longue,
- le milieu est isotrope et homogène,
- la température initiale $T_0$ est uniforme de long du fil

### II.3.2.2. Dispositif de mesure

Dans cette étude, la conductivité thermique a été déterminée à l'aide de l'appareil KD2 Pro (Decagon Devices, INC) (Figure II-23(a)). La dimension des échantillons à étudier doit correspondre à la longueur de l'aiguille car il est nécessaire qu'elle soit complètement immergée pour obtenir une mesure fiable. Cet appareillage permet d'effectuer les mesures rapidement mais, étant donné que la mesure est locale, elle doit être répétée en différents endroits pour obtenir la valeur moyenne pour tout l'échantillon.

Le schéma de principe du capteur à aiguille de l'appareil KD2 est présenté Figure II-23(b). L'aiguille comprend un thermocouple et un fil chauffant. Le fil chauffant, dont la résistance électrique est connue, est traversé par un courant électrique de valeur connue. La variation de température est enregistrée pendant le temps de chauffage grâce au fil du thermocouple et la conductivité thermique est calculée à partir de ces données.

(a)




(b)

Figure II-23: Appareil KD2 Pro (Decagon Devices, INC)

Selon le matériau, quatre capteurs différents peuvent être utilisés afin de mesurer la conductivité thermique des différents matériaux avec le KD2 Pro. Les propriétés et la compatibilité des quatre capteurs sont présentées dans le Tableau II-7. Dans cette étude, il est possible que le sol possède une conductivité supérieure à 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$, ce qui ne permet pas d'utiliser les capteurs KS-1 et SH-1. Il est donc choisi d'utiliser le capteur TR-1 est utilisé grâce une bonne application pour les sols humides et les matériaux granulaires.

Tableau II-7: Spécifications des capteurs du KD2 Pro

| Capteur | TR-1 | RK-1 | KS-1 | SH-1 |
|---|---|---|---|---|
| Durée d'une mesure | 5 minutes | 10 minutes | 60 secondes | 2 minutes |
| Précision | ±10 % de 0,2-4 $W.m^{-1}.K^{-1}$ ±0,02 $W.m^{-1}.K^{-1}$ de 0,01-0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ | ±10% de 0,2-6 $W.m^{-1}.K^{-1}$ ±0,02 $W.m^{-1}.K^{-1}$ de 0,1-0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ | ±5% de 0,2-2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ ±0,01 $W.m^{-1}.K^{-1}$ de 0,02-0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ | ±10% de 0,2-2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ ±0,01 $W.m^{-1}.K^{-1}$ de 0,02-0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| Gamme de mesure | K : 0,01 à 4 $W.m^{-1}.K^{-1}$ | K : 0,1 à 6$W.m^{-1}.K^{-1}$ | K : 0,02 à 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ | K : 0,02 à 2 $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| | R : 25 à 1000 $°C.cm.W^{-1}$ | R : 17 à 1000 $°C.cm.W^{-1}$ | R : 50 à 5000 $°C.cm.W^{-1}$ | R : 50 à 5000 $°C.cm.W^{-1}$ |
| Température | -50°C à +150°C | -50°C à +150°C | -50°C à +150°C | -50°C à +150°C |
| Dim. Aiguilles | 10 cm de long 2,4 mm de diamètre | 6 cm de long 3,9 mm de diamètre | 6 cm de long 1,27 mm de diamètre | 3 cm de long 1,3 mm de diamètre deux aiguilles de 6 cm d'espacement |
| Matériaux adaptés | Liquides à haute viscosité ; sol humide/sec ; poudres ; matériaux granulaires | Sol humide/sec ; poudres ; matériaux granulaires ; béton ; roche ; matériaux solides | Liquides, matériau isolation et isolant | Sol humide/sec ; poudres ; matériaux granulaires ; béton ; roche ; matériaux solides |

Pour réaliser la mesure de conductivité thermique, la norme (ASTM D5334, 2008) sera appliquée. La sonde thermique doit être calibrée avant son utilisation. Il s'agit de comparer les valeurs de conductivité thermique mesurées pour un matériau standard avec les valeurs connues ce qui permet d'obtenir le facteur de calibration (équation II-9) :

$$C = \frac{\lambda_{materiau}}{\lambda_{mesure}} \qquad \text{Eq. II-9}$$

Avec :

- C le facteur de calibration ;
- $\lambda_{matériau}$ la conductivité thermique du matériau standard ($W.m^{-1}.K^{-1}$) ;
- $\lambda_{mesurée}$ = conductivité thermique mesurée avec la sonde thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

Les mesures effectuées sur l'échantillon standard (Figure II-24) ont permis de déterminer le facteur de calibration de la sonde : C ≈ 1,0. Conformément à la norme (ASTM

D5334, 2008), l'échantillon doit avoir une forme cylindrique, un diamètre d'au minimum 10 fois le diamètre de la sonde thermique et une longueur d'au minimum 20 % supérieure à la longueur de la sonde. Donc, les mesures seront effectuées sur des échantillons cylindriques de Ø152 x H152 mm.

Figure II-24 : Mesure sur échantillon standard

Pour effectuer les mesures, il est d'abord nécessaire de percer 9 trous de 2,4 mm de diamètre et de 100 mm de profondeur (dimensions de la sonde) sur l'une des faces de l'échantillon à l'aide d'une perceuse (Figure II-25(a)). L'échantillon doit être pré-percé de façon droite et verticale. Avant d'insérer la sonde thermique à l'intérieur de l'échantillon, une pâte thermique est utilisée pour enrober la surface de la sonde afin qu'il n'y ait pas de lame d'air entre la sonde et l'échantillon. En effet, cette lame d'air possède une certaine conductivité thermique et engendrerais une erreur sur la valeur obtenue. Il est nécessaire de s'assurer que la sonde est complètement insérée (Figure II-25(b)).

La mesure est répétée sur 9 points de manière à obtenir une valeur moyenne sur l'ensemble de l'échantillon. Afin d'obtenir une teneur en eau homogène, l'échantillon sèche pendant une journée dans le laboratoire puis est placé dans un bac hermétique pendant trois jours. Le cinquième jour, la mesure de conductivité thermique est effectuée.

(a)

(b)

Figure II-25 : Protocole expérimental

## II.3.3. Caractéristiques hygrométriques

### II.3.3.1. Courbe isotherme sorption/désorption

Les courbes isothermes de sorption/désorption présentent la relation entre la teneur en eau et l'humidité relative. Elles sont obtenues en imposant une humidité relative (HR) donnée et en suivant la variation de masse de l'échantillon. La quantité d'eau adsorbée par le matériau sec sous une HR fixée peut donc être quantifiée. Selon l'échantillon, la cinétique d'équilibre entre les phases liquide et gazeuses sera plus ou moins longue.

La forme des courbes dépend de la géométrie et de la distribution des pores du matériau. Ces courbes sont déterminées de façon discontinue par paliers successifs d'humidité relative croissante puis décroissante (ou inversement) selon la norme (NF EN ISO 12571, 2013). Pour l'isotherme d'adsorption, l'échantillon de départ est supposé sec après passage à l'étuve. L'état d'humidité de l'échantillon de départ peut changer : soit saturé à haute humidité relative (98 %), soit sec.

Il est également important de fixer la température car cela influencera la teneur en eau du matériau. En effet, une augmentation de la température, pour une humidité relative donnée, produit une diminution de la quantité d'eau adsorbée en raison du caractère exothermique du phénomène d'adsorption (Figure II-26). De plus, cela produit une augmentation du seuil de condensation capillaire au niveau des pores qui entraine, pour une humidité relative donnée, une diminution de la teneur en eau (Merouani, 1987).

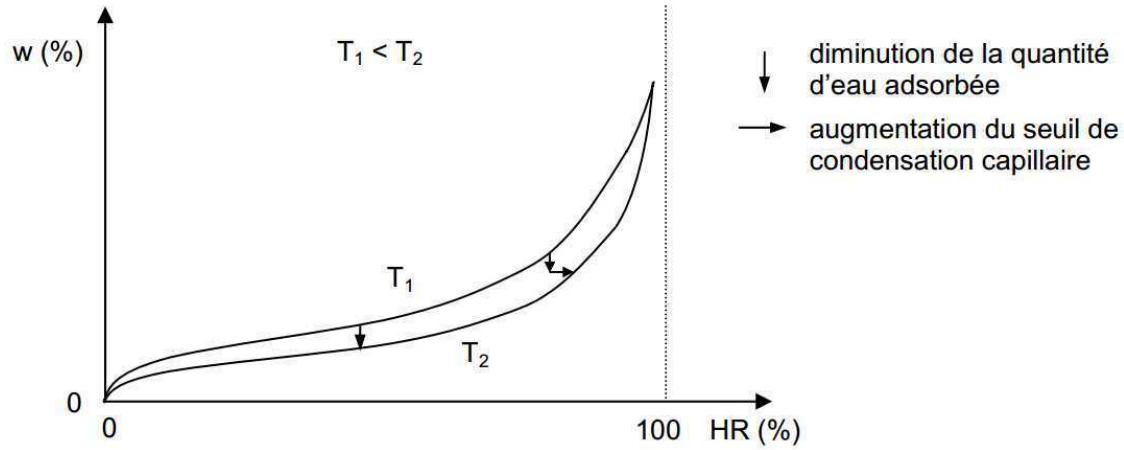



Figure II-26: Effet de la température sur les courbes sorption/désorption (Merouani, 1987)

#### A- Mesure par contrôle de la succion

Pour obtenir une courbe de désorption complète, il est, d'abord, nécessaire de mesurer la succion par papier-filtre dont l'intervalle de succion est situé entre 50 kPa et 10000 kPa, puis la

succion est contrôlée via l'utilisation de solutions salines dont l'intervalle de mesure varie entre 4200 kPa à 325000 kPa.

Pour la mesure de la succion par papier filtre, il est nécessaire de mettre en contact trois papiers filtres en contact avec l'échantillon. Seul le papier filtre du milieu sera utilisé pour les mesures. L'ensemble échantillon-papiers filtres est enveloppé soigneusement par du film plastique pour empêcher les échanges avec l'atmosphère (Figure II-27). La succion est déterminée lorsqu'il y a équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre (environ 3 jours). Elle est calculée via la teneur en eau du papier filtre central à l'aide d'une pesée au 1/10000$^{e}$.

Figure II-27 : Mesure de la succion par papier-filtre

Après chaque mesure, l'échantillon est laissé à l'air libre dans le laboratoire pendant 4h afin que la teneur en eau évolue. Puis, l'échantillon est de nouveau isolé de l'atmosphère ambiant.

Lorsque la succion mesurée est proche de 4200 kPa, les échantillons sont placés dans des dessiccateurs où la succion est contrôlée via l'utilisation de solutions salines saturées. La teneur en eau est ensuite suivie jusqu'à stabilisation (suivi la masse des échantillons au cours du temps, tous les 2 fois par semaine) (Figure II-28). Puis, la solution saline utilisée est remplacée par une solution saline de succion plus importante, en utilisant l'équation la loi de Kelvin, la succion peut être calculée à partir de l'humidité relative appliquée (Tableau II-8).

Figure II-28 : Dessiccateur avec solution saline saturée

Tableau II-8 : Solutions salines utilisées

| Solutions saturées | Température = 20 °C | |
|---|---|---|
| | RH (%) | Succion (Mpa) |
| $K_2SO_4$ | 97 | 4,2 |
| $KNO_4$ | 93 | 9,8 |
| KCl | 86 | 20,4 |
| $NaNO_2$ | 66 | 57,3 |
| $Ca(NO_3)_2$ | 56 | 79,9 |
| $CaCl_2$ | 32 | 157,1 |
| KOH | 9 | 331,9 |

**B- Méthode par sorption dynamique de vapeur**

La sorption dynamique de vapeur est une technique gravimétrique pour la mesure des interactions des vapeurs avec les solides. L'essai est réalisé avec un analyseur de sorption/désorption SPSx-1µ ProUmid (Figure II-29). Cette machine comprend une enceinte dont l'humidité relative et la température sont contrôlées. Les courbes isothermes d'adsorption-désorption sont déterminées à l'aide de la teneur en eau des échantillons pour différents paliers successifs d'humidité relative ambiante croissante puis décroissante.

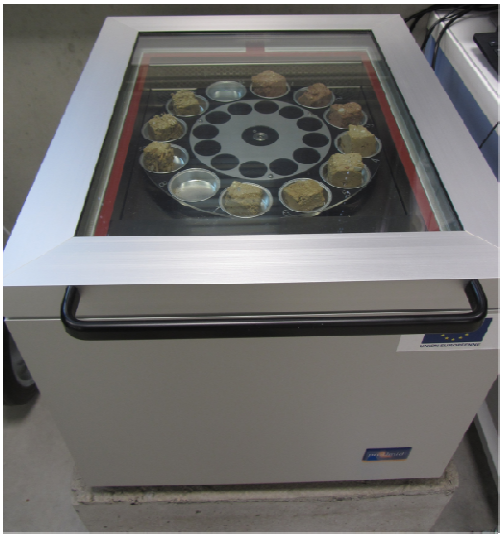


Figure II-29 : Analyseur de sorption/désorption SPSx-1µ ProUmid

Selon la norme (NF EN ISO 12571, 2013), il est nécessaire d'utiliser au minimum quatre atmosphères différentes entre 30 et 90 % d'humidité relative. Ici, pour une plus grande

précision, dix-huit points de mesure ont été effectués entre 5 et 90 % d'humidité relative pour la sorption et la désorption. A la fin de la branche de désorption, un séchage final est effectué.

Selon la norme (NF EN ISO 12571, 2013), l'échantillon atteint l'équilibre lorsque la variation de masse est inférieure à 0,1 % pour trois pesées consécutives effectuées à au moins 24 h d'intervalle. Dans cette étude, il a été considéré que la stabilité était atteinte à partir du moment où l'écart entre deux pesées consécutives à 24 heures d'intervalle était inférieur à 0,01%.

En ce qui concerne les fibres, des échantillons secs de 2,5 cm de longueur ont été utilisés. Pour les échantillons de bauge, ils sont d'une dimension d'environ 40x40x30 mm obtenus à partir d'échantillons cylindriques Ø150 x H60 mm (Figure II-30). Les échantillons sont séchés dans l'étude à 50°C, ensuite, ils sont mis dans une boite hermétique contenant du gel de silice, le but est de refroidir les échantillons et sans laisser les échantillons absorber l'humidité.

Figure II-30 : Echantillons de bauge pour essai sorption/désorption.

La norme (NF EN ISO 12571, 2013) recommande d'utiliser des balances permettant une pesée des échantillons à 0,01 % de leur masse. La balance utilisée pour ces essais est une balance ayant une capacité de 220 g et une précision de 100 µg. Etant donné que la masse des échantillons est d'environ 100 g, la précision de la pesée est donc de 0,0001 %. La température d'essai est de 20°C. Pour chaque type de fibre, 11 échantillons ont été testés et, pour chaque formulation de bauge, 3 échantillons ont été testés (Figure II-31).

(a) Fibres

(b) Formulations de bauge

Figure II-31 : Echantillons de fibre et de bauge

### II.3.3.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

La méthode utilisée pour mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau est la méthode de la coupelle décrite dans la norme (NF EN ISO 12572, 2016) (Figure II-32). Le principe consiste à placer un échantillon d'épaisseur e sous gradient de vapeur constant et unidimensionnel en condition isotherme. Le suivi de la masse de l'échantillon par pesées régulières et la connaissance du flux de vapeur traversant le matériau permet de calculer la perméabilité à la vapeur d'eau.

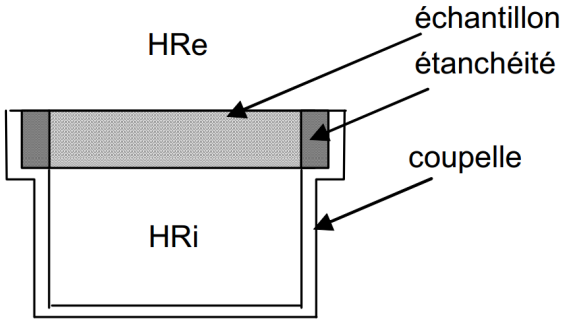



Figure II-32 : Méthode de la coupelle

L'échantillon est installé au-dessus de la coupelle d'essai contenant solution aqueuse saturée (coupelle humide) qui détermine l'humidité relative intérieur (HRi). L'ensemble (échantillon + coupelle) est placé dans une ambiance d'humidité relative extérieure (HRe) différente de HRi. La différence de pression partielle de vapeur régnant dans la coupelle d'essai et dans la chambre entraîne un flux de la vapeur d'eau à travers l'échantillon perméable. L'évolution de la masse de l'échantillon est enregistrée en fonction du temps. En régime permanent, la perméabilité à la vapeur d'eau et le facteur de résistance à la vapeur d'eau sont déterminés à l'aide des équations II-10 et II-11 :

$$\delta = e \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta P_v} \qquad \text{Eq. II-10}$$

Avec :

- $\delta$ la perméabilité à la vapeur d'eau ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$) ;
- e l'épaisseur de l'échantillon (m) ;
- $\Delta m$ la variation de masse de l'assemblage d'essai pendant l'intervalle de temps $\Delta t$ (kg) ;
- $\Delta t$ l'intervalle de temps (s);
- A la surface exposée de l'éprouvette (moyenne arithmétique des surfaces supérieure et inférieure libres) ($m^2$) ;

- $\Delta P_v$ la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les deux faces de l'éprouvette (Pa).

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \qquad \text{Eq. II-11}$$

Avec :

- $\mu$ le facteur de résistance à la vapeur d'eau
- $\underline{\delta}_{air}$ : perméabilité à la vapeur de l'air ($\underline{\delta}_{air} = 1{,}9.10^{-10}$ kg.m$^{-2}$.s$^{-1}$.Pa$^{-1}$) ;
- $\underline{\delta}$ la perméabilité à la vapeur d'eau (kg.m$^{-1}$.s$^{-1}$.Pa$^{-1}$).

La couche d'air située dans la coupelle d'essai entre la base de l'échantillon et la solution saline présente une certaine résistance au flux de vapeur d'eau. Etant donné que cette résistance est très inférieure à celle de l'échantillon, elle est négligée.

Le dispositif expérimental est présenté sur les Figure II-33. Après fabrication des échantillons Ø150x60 mm, les éprouvettes sont stockées à (23±5)°C, (50±5) % d'humidité relative jusqu'à stabilisation de la masse (trois déterminations quotidiennes successives ne divergent pas de plus de 5 %). Les mesures des dimensions sont faites au pied à coulisse électronique avec une précision de 0,01 mm. Les diamètres des surfaces d'échange sont mesurés dans quatre directions, les épaisseurs des échantillons en huit points.

Le bécher utilisé possède un diamètre intérieur de 152 mm ce qui permet de protéger le périmètre extérieur des échantillons par un film plastique imperméable afin d'éviter un contact entre l'HRi et l'HRe (Figure II-33(a)). Le support de l'échantillon est assuré par un joint caoutchouc et une couche de silicone (Figure II-33(b)). Une couche de silicone est également mise au-dessus de l'échantillon pour éviter tout flux de vapeur sur le coté. Puis, l'échantillon est scellé dans le bécher qui contient une solution saline saturée permettant d'imposer une humidité relative contrôlée dans l'atmosphère régnant dans la partie inférieure de l'échantillon (Figure II-33(c)). Le bécher contenant l'échantillon est ensuite suspendu à l'intérieur d'un dessiccateur dans lequel une seconde solution saline a été préalablement placée dans de petits pots, permettant d'imposer une seconde humidité relative dans l'atmosphère qui est en contact avec la partie supérieure de l'échantillon (Figure II-34(a)). L'ensemble bécher/contenu (échantillon et solution saline) est suspendu à une balance de précision permettant de suivre la variation de masse en fonction du temps (Figure II-34(b)). La balance utilisée pour cet essai ayant une portée de 5 kg, une précision de 0,01 g.

(a) Protège d'échantillon (b) Support (c) Ensemble

Figure II-33 : Installation de l'échantillon dans le bécher

a) Dessiccateur (b) Système de pesée d'échantillon

Figure II-34 : Système de suivre la masse des échantillons

Dans cette étude, le gradient d'humidité relative imposée entre les deux faces de l'échantillon est de 88 %, en utilisant une solution saline de sulfate de potassium ($K_2SO_4$) permettant d'imposer une HRi de 97 % sur la face inférieure de l'échantillon, et une solution de hydroxyde de potassium (KOH) permettant d'imposer une HRe de 9 % sur la face supérieure du disque.

## II.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières utilisé dans la fabrication de la bauge. Les matériaux choisis proviennent tous de Normandie. Les sols ont été caractérisés géotechniquement (granulométrie, valeur au bleu, limite d'Atterberg, Proctor). La détermination de ces caractéristiques a permis de sélectionner trois sols pour les différentes formulations de bauge. Concernant les fibres, il a été déterminé qu'elles possédaient un coefficient d'absorption d'eau très élevé (309 % pour la paille et 185 % pour le lin). Cela pourra entrainer des variations volumiques des fibres dans le mélange et engendrer des modifications de l'interface fibres/matrice à l'état sec.

# III. CHAPITRE 3 : ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DE LA BAUGE

Les différentes formulations de bauge adoptées à partir de matériaux naturels locaux ont été présentées au chapitre 2. Ici, différentes propriétés de la bauge vont être étudiées : la capacité de séchage et le comportement mécanique. De plus, une comparaison entre les formulations sera effectuée pour déterminer l'impact du type de fibres et du mélange de sol sur le comportement du matériau.

## III.1. Comportement physique

### III.1.1. Masse volumique apparente

#### III.1.1.1. Influence des fibres

Afin d'étudier l'influence des fibres sur la masse volumique apparente, les formulations 1 à 9 et 13 à 16 ont été utilisées. La réalisation des courbes Proctor a permis de déterminer les différentes teneurs en eau et masses volumiques à utiliser pour la fabrication des différents échantillons. Les essais Proctor ont été réalisés à l'aide d'un moule Proctor selon la norme (NF P94-093, 2014).

Les résultats obtenus pour le mélange A renforcé par du lin (formulation A-1, 2, 3, 4, 5) et par de la paille (formulation A-1, 6, 7, 8, 9) montrent que plus l'ajout de fibres est important (0 ; 0,5 ; 1 %), plus la masse volumique apparente diminue (Tableau III-1). Cette diminution de masse volumique est due à l'introduction d'une porosité supplémentaire quasiment proportionnelle à la teneur en fibre (Calame, 1985; Laurent, 1986). De plus, il est intéressant de noter que la masse volumique des formulations à base du mélange B est toujours plus importante que celles à base du mélange A.

Tableau III-1 : Masse volumique apparente à $W_{OPN}$ des différentes formulations

| Formulation | $W_{OPN}$ (%) | $\rho_{dOPN}$ (kg.m$^{-3}$) | Formulation | $W_{OPN}$ (%) | $\rho_{dOPN}$ (kg.m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| A-1 | 12 | 1959 | B-1 | 10 | 2011 |
| A-2 | 11,5 | 1904 | B-2 | 10 | 1945 |
| A-3 | 11,5 | 1823 | B-3 | 10 | 1954 |
| A-4 | 11,5 | 1869 | B-4 | 10 | 1917 |
| A-5 | 11,5 | 1803 | B-5 | 10 | 1921 |
| A-6 | 12 | 1887 | B-6 | 10 | 1950 |
| A-7 | 11,7 | 1909 | B-7 | 10 | 1941 |
| A-8 | 12 | 1850 | B-8 | 10 | 1875 |
| A-9 | 11,5 | 1827 | B-9 | 12 | 1843 |

Le Tableau III-2 présente les résultats obtenus pour les mélange A et B (formulation A-13 à 16, formulation B-13 à 16). Ils montrent également ce phénomène de diminution de la masse volumique apparente avec l'ajout de fibre excepté pour le mélange A-15 qui montre une densité plus importante que le mélange A-14. Cela peut être dû à la méthode de fabrication manuelle susceptible d'engendrer des variations de compactage par rapport à un compactage Proctor automatique.

Tableau III-2 : Masse volumique apparente à la $W_{BAU}$ des différentes formulations

| Formulations | $W_{initiale}$ (%) | $\rho_d$ (kg.m$^{-3}$) |
|---|---|---|
| A-13 | 18 | 1734 ± 15 |
| A-14 | 18 | 1635 ± 18 |
| A-15 | 18 | 1686 ± 30 |
| A-16 | 18 | 1462 ± 5 |
| B-13 | 16 | 1836 ± 16 |
| B-14 | 16 | 1678 ± 7 |
| B-15 | 16 | 1652 ± 1 |
| B-16 | 18,5 | 1487 ± 8 |

#### III.1.1.2. Influence de la teneur en eau initiale

Des échantillons cubiques (15 x 15 x 15 cm) sont fabriqués pour les formulations (A-10 à 12, B-10 à 12) afin d'étudier l'influence des différentes teneurs en eau initiales sur la masse volumique de la bauge. Pour ces formulations, la quantité de paille ajouté est constante (1 % de 10cm). Les différentes teneurs en eau initiales et les masses volumiques correspondantes sont présentées dans le Tableau III-3. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en eau de départ engendre une diminution de la masse volumique apparente. Ces résultats sont logiques étant donné que la teneur en eau augmente progressivement de la teneur en eau à l'optimum Proctor à la teneur en eau usuelle pour la bauge. Cependant, il est à noter que la masse volumique obtenue par compactage manuel pour le mélange A est supérieure à celle obtenue par compactage Proctor dans un moule cylindrique (entre les formulations 9 et 10), cela peut être dû à la méthode fabrication manuelle dont l'énergie de compactage n'est pas identique à celle du compactage Proctor. Il est intéressant de noter que, contrairement à la partie précédente, le mélange A est toujours plus dense que mélange B pour les différentes formulations.

Tableau III-3 : Masses volumiques apparentes pour différentes teneur en eau initiale

| Formulations | $W_{initiale}$ (%) | $\rho_d$ (kg.m$^{-3}$) |
|---|---|---|
| A-10 | 11,5 | 1873 ± 10 |
| A-11 | 14,5 | 1808 ± 5 |
| A-12 | 17,5 | 1735 ± 8 |
| B-10 | 12 | 1833 ± 10 |
| B-11 | 15 | 1807 ± 1 |
| B-12 | 18 | 1708 ± 3 |

### III.1.2. Cinétique de séchage

La capacité de séchage de la bauge correspond à la vitesse de séchage des échantillons. Dans cette étude, elle est calculée à partir de la variation moyenne de la teneur en eau par jour pendant une période de séchage déterminée (7 jours ou 14 jours). Elle sera déterminée pour différentes formulations afin d'étudier l'influence des fibres, des conditions de cure et du mélange sur la capacité de séchage de la bauge.

### III.1.2.1. Influence des fibres et de la condition de cure

Les échantillons seront notés X_Y_Zj avec X la formulation, Y la condition de cure et Z le nombre de jour de cure.

Pour chaque mélange de sol, deux formulations ont été utilisées : sans fibre (formulation 1) et avec 1 % de paille de 10 cm (formulation 9). De plus, la formulation 9 a été soumise à deux conditions de cure : C1 (21°C, 60%HR) et C2 (50°C) afin d'étudier l'influence de la forte température sur la capacité de séchage ainsi que sur la résistance mécanique de la bauge.

Les résultats montrent que l'ajout de fibre semble accélérer légèrement la vitesse de séchage des échantillons (Tableau III-4). De plus, il a été constaté que la vitesse de séchage est plus élevée pour les 7 premiers jours par rapport à celle obtenue pour les 14 premiers jours. Cette différence est due à l'évaporation de l'eau à la surface des échantillons qui a lieu dès le début du séchage dont la cinétique est plus grande que celle du transport de l'eau du centre de l'échantillon à l'extérieur. Il est intéressant de noter, qu'à 7 jours, la vitesse de séchage de la formulation B-1_C1 est plus faible que la formulation A-1_C1. Cela semble être dû à la teneur en eau de départ plus faible pour le mélange B. Les Figure III-1 et Figure III-2 présentent la variation de la teneur en eau au cours du temps de séchage du mélange A et B. Il est à noter que le mélange A présente une teneur en eau initiale inférieure lors de l'ajout de fibre alors que le contraire est observé pour le mélange B. Pour le mélange A, la différence de teneur en eau est de 0,5 % au départ, 0,7 % après 7 jours et 1,7 % après 14 jours. Pour le mélange B, la différence de teneur en eau est de 1,9 % au départ, 0,9 % après 7 jours et 0,5 % après 14 jours. Les résultats montrent également une vitesse de séchage supérieure pour les mélanges avec fibre par rapport aux mélanges sans fibre. L'hypothèse est que les fibres aident au transport de l'eau retenue au centre de l'échantillon vers l'extérieur (Hibouche, 2013).

Les résultats concernant la deuxième condition de cure (C2) montrent que la vitesse de séchage est très rapide les 3 premiers jours (1,57 %/jour) puis diminue graduellement jusqu'à séchage complet de l'échantillon. Ces résultats peuvent s'expliquer par la plus grande facilité évaporation de l'eau sur les bords extérieurs qu'au centre de l'échantillon. Le parcours de l'eau du centre vers l'extérieur ralentit la vitesse de séchage de l'échantillon.

Tableau III-4 : Vitesse de séchage des différentes formulations

| Formulations | Vitesse de séchage (%/jour) | Formulations | Vitesse de séchage (%/jour) |
|---|---|---|---|
| A-1_C1_7j | 0,56 | B-1_C1_7j | 0,47 |
| A-1_C1_14j | 0,43 | B-1_C1_14j | 0,43 |
| A-9_C1_7j | 0,62 | B-9_C1_7j | 0,62 |
| A-9_C1_14j | 0,5 | B-9_C1_14j | 0,53 |

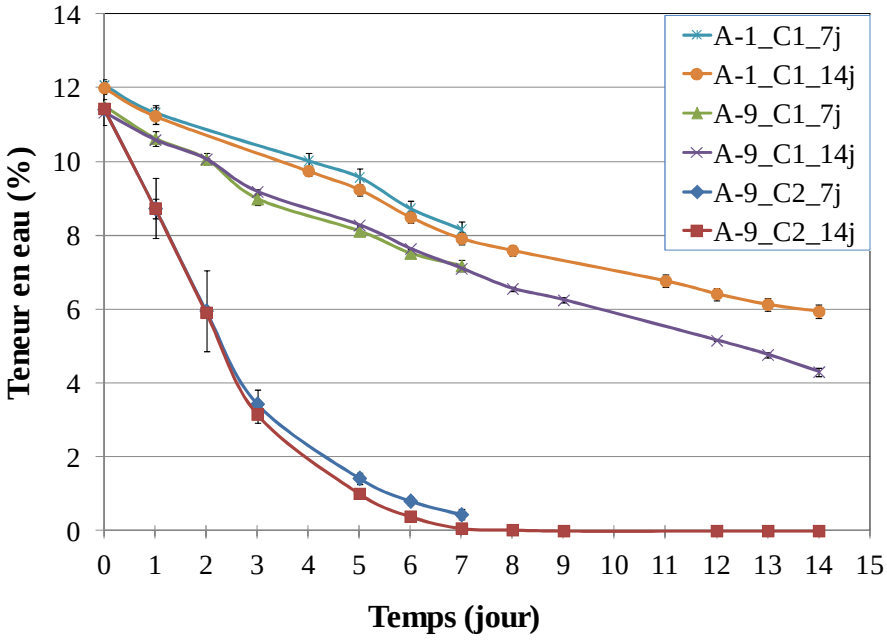



Figure III-1 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage du mélange A

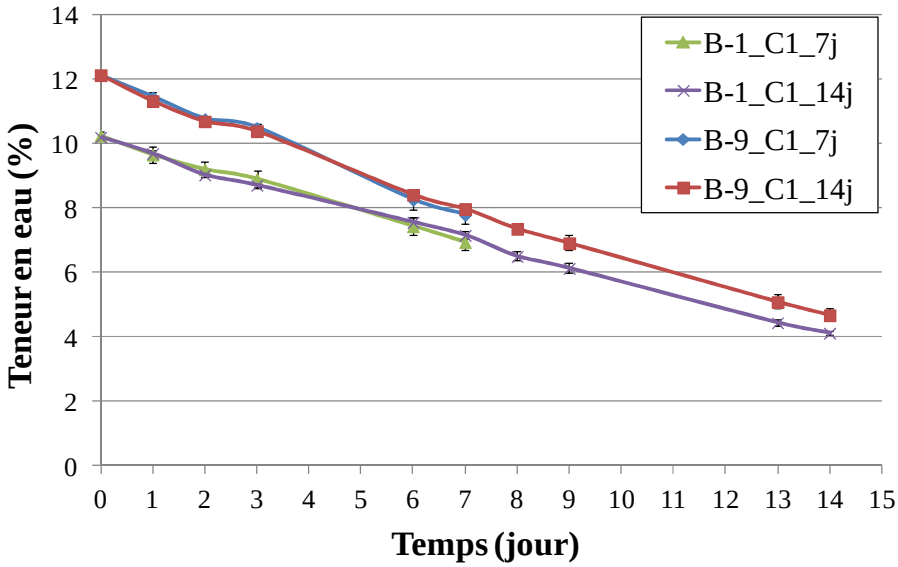



Figure III-2 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage du mélange B

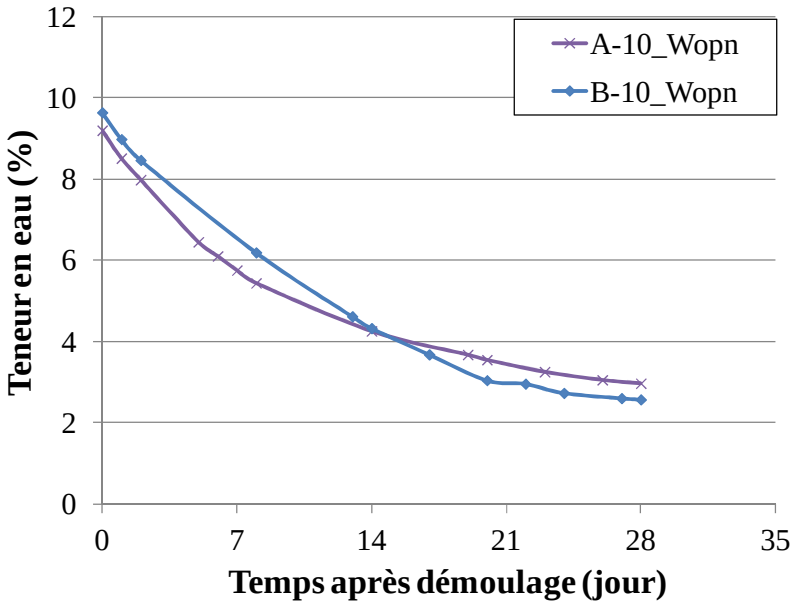
### III.1.2.2. Influence du mélange de sol

Les échantillons seront notés X_W avec X la formulation (10-12 pour les deux mélanges), W la teneur en eau de départ de l'échantillon ($W_{OPN}$, $W_{INT}$, $W_{BAU}$).

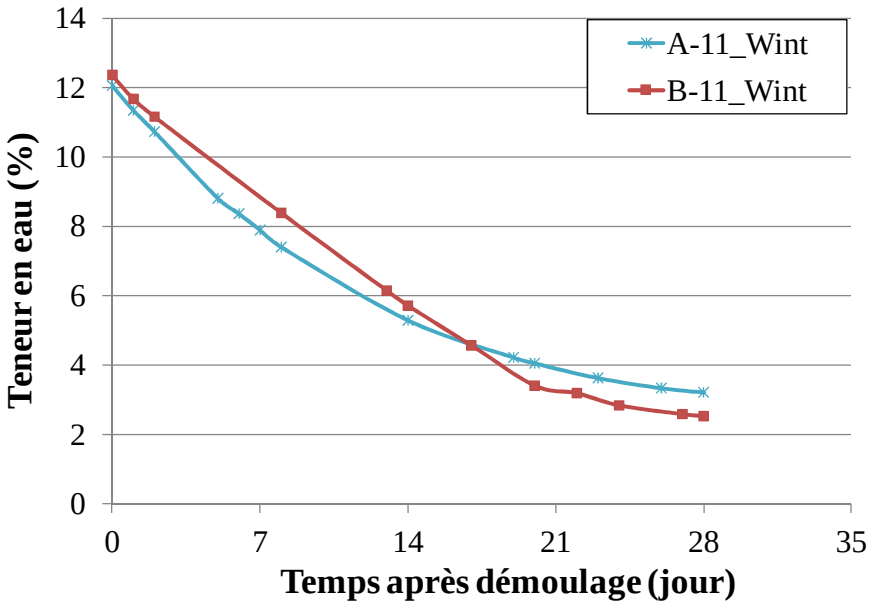
Dans le paragraphe précédent, la capacité de séchage a été étudiée pour les deux mélanges de sol préparés à la teneur en eau à l'optimum Proctor pour différentes teneur en

paille (0 et 1 %). Ici, l'influence du mélange du sol (A et B) sur la capacité de séchage est étudiée avec un ajout de 1 % de paille de 10 cm. Etant donné que les échantillons ne sont démoulés qu'au bout de 7 jours pour le mélange A ou 14 jours pour le mélange B, les courbes présentées ne prendront pas en compte cette première partie (Figure III-3).

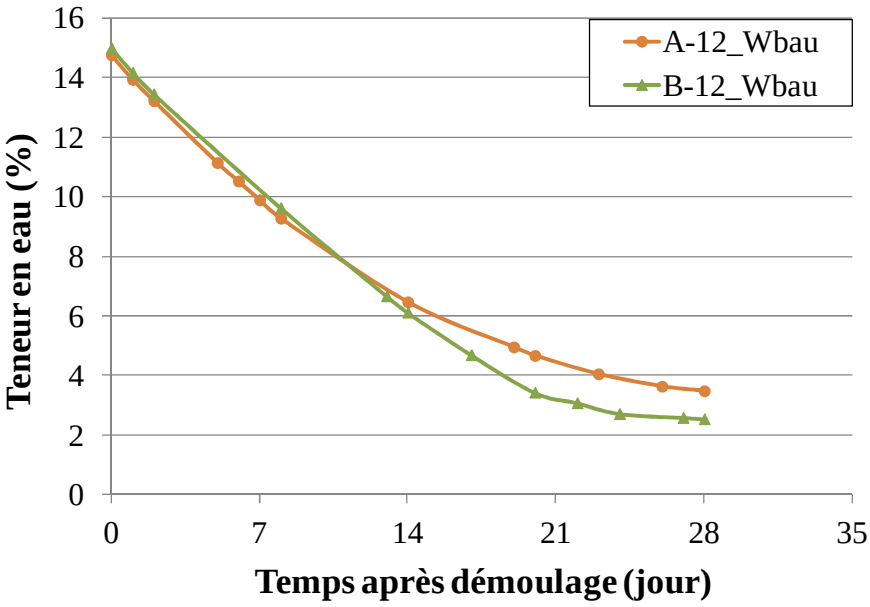
Les résultats montrent que les formulations à base du mélange A sèchent plus vite que celles à base du mélange B au début du séchage, puis un croisement des courbes est observé pour une teneur en eau entre 4 et 8 % selon la teneur en eau du mélange. Cela peut être dû à une succion plus forte du mélange A par rapport au mélange B. Cela pourra être vérifié par l'obtention de la courbe de rétention d'eau obtenue par l'essai de sorption/désorption dans le chapitre IV. Avec une humidité relative de 60 % en salle de conservation, après 5 semaines, la teneur en eau est constante autour de 2,5 % pour le mélange B et autour de 2,8 % pour le mélange A.




(a) A $W_{OPN}$




(b) A $W_{INT}$




(c) A $W_{BAU}$

Figure III-3 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps après démoulage des échantillons cubiques

## III.2. Analyse de la courbe contrainte-déformation

### III.2.1. Comportement en compression

La ductilité correspond à la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant de se rompre, plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. Afin d'étudier cette caractéristique pour la bauge, la courbe contrainte-déformation (σ-ε) est analysée pour évaluer l'influence de différents paramètres : teneur en fibre, teneur en eau et direction de chargement.

#### III.2.1.1. Rôle des fibres

La Figure III-4 présente les courbes (σ-ε) du mélange A avec 1 % de paille et sans paille à la $W_{OPN}$ (formulation A-1 et A-5). Ces courbes montrent que l'incorporation des fibres confère au matériau une ductilité plus grande que celui non fibré. Cela peut être dû aux liens entre les fibres et le sol qui nécessite une quantité d'énergie plus grande pour la rupture.

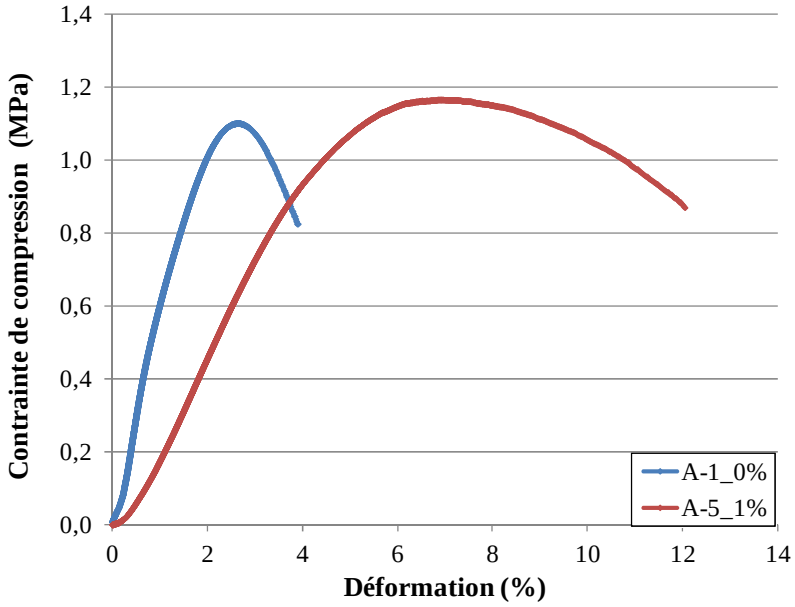



Figure III-4 : Courbe contrainte-déformation du mélange A sans et avec 1 % de fibre à la $W_{OPN}$

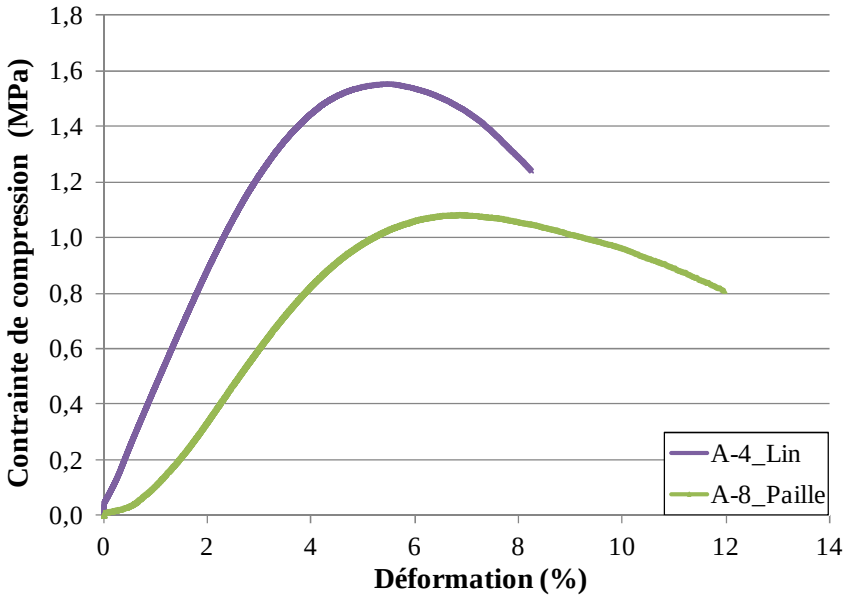



Figure III-5 : Courbe contrainte-déformation du mélange A renforcé par 1 % de fibre de paille et de lin à la $W_{OPN}$

Selon les caractéristiques intrinsèques des fibres, l'incorporation de différents types de fibres peuvent plus ou moins modifier la structure de la bauge. La Figure III-5 présente les courbes (σ-ε) du mélange A avec un ajout de 1% de fibre de lin et de paille (formulation A-4 et A-8). Cette figure montre que la ductilité obtenue par l'ajout de fibre est plus important pour la paille que pour le lin. La bauge renforcée par du lin atteint une résistance maximum pour 5,4 % de déformation alors qu'elle est de 6,7 % dans le cas de la paille. Cela peut être expliqué par les caractéristiques mécaniques des fibres. Dans le chapitre précédent, il a été déterminé que le lin possède une résistance en traction quatre fois plus grande et un module d'élasticité trois fois plus grand que ceux obtenus par la paille (Figure II-11). L'hypothèse serait donc que le lin se déforme moins que la paille.

Les courbes contrainte-déformation des formulations avec le mélange B sont présentées sur la Figure III-6 (formulation B-13 → B-16). Comme dans la bibliographie (Hibouche, 2013), ces courbes contrainte-déformation présentent quatre domaines bien distincts :

- Un premier domaine au voisinage de l'origine qui présente une forme concave, caractéristique des matériaux poreux. Ceci est dû à deux facteurs : le premier est l'homogénéité du contact entre l'échantillon et le dispositif de chargement composé d'une plaque métallique plane et du piston de la presse; le second est la fermeture des microfissures présentes naturellement dans l'échantillon.

- Un second domaine où la pente de la courbe contrainte-déformation atteint son maximum. Ceci correspond à une déformation approximative de 1,5 %. Ce domaine permet de

déduire le module de déformation. Notons qu'il s'agit d'un module mesuré en grandes déformations.

- Un troisième domaine correspondant à une plastification poussée du matériau qui se caractérise par une pente contrainte-déformation qui s'adoucie continuellement jusqu'à la valeur maximale de contrainte correspondant à la résistance à la compression simple.

- Un quatrième domaine, dit domaine post-pic de résistance, qui correspond au comportement du matériau après l'apparition de la rupture décrite auparavant. On remarque que la rupture est de type « ductile » pour le sol fibré, ce qui met en évidence, entre autre, l'effet des fibres qui maintiennent une certaine cohésion post-rupture.

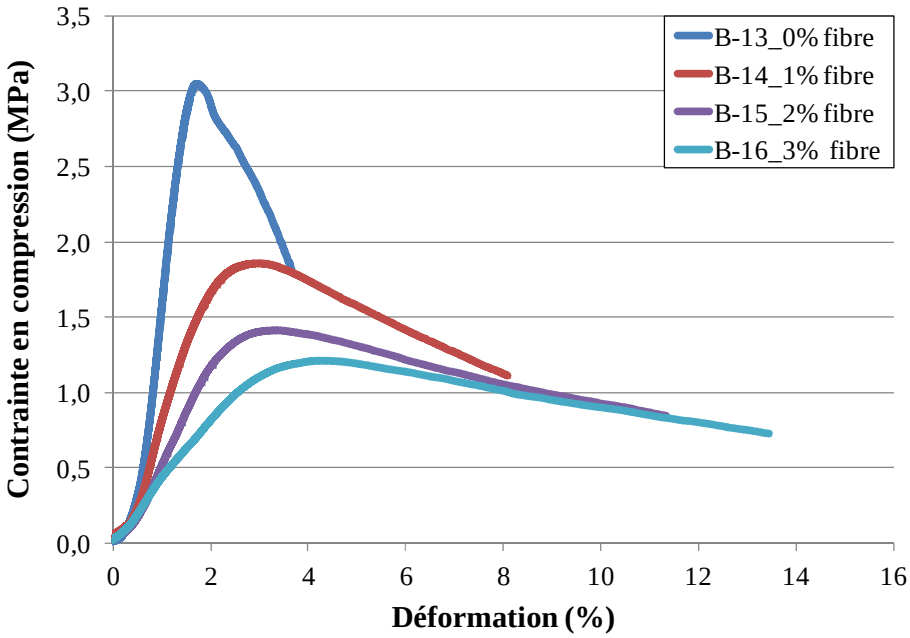



Figure III-6 : Courbes contrainte-déformation des différentes formulations du mélange B à $W_{BAU}$

### III.2.1.2. Rôle des teneurs en eau initiales

La Figure III-7 présente les courbes contrainte-déformation des formulations 10 à 12 pour les deux mélanges. Il est observé que les mélanges A et B à une teneur en eau initiale $W_{OPN}$ possèdent une rigidité proche et présentent tous deux une grande différence entre la résistance à rupture et celle à 2 % de déformation. Il est intéressant de noter que lorsque la teneur en eau initiale augmente, la rigidité du mélange A diminue alors que celle du mélange B augmente.

Il est observé qu'un ajout d'eau supplémentaire rend le matériau plus ductile étant donné l'homogénéité du mélange terre-fibre. Cela est dû au fait que l'eau augmente la maniabilité du mélange terre-fibre et permet au sol de mieux recouvrir l'ensemble de la surface des fibres ce

qui engendre une plus grande liaison terre-fibre. Par contre, l'ajout d'eau engendre une diminution de la densité du matériau et donc une diminution de la résistance maximale en compression.

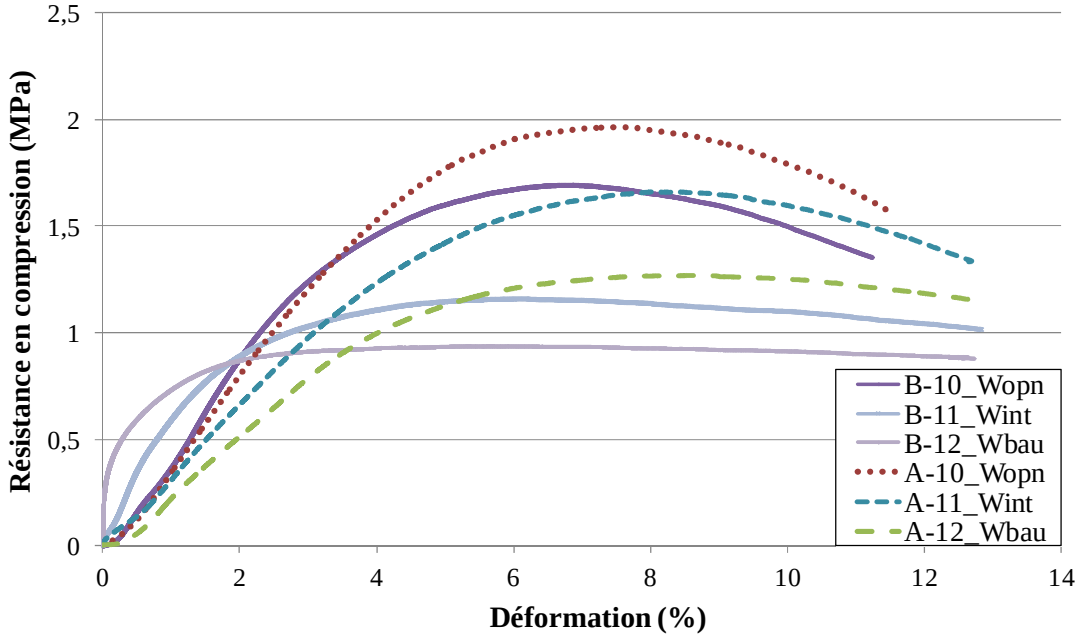



Figure III-7 : Courbe contrainte-déformation des deux mélanges à différentes teneurs en eau initiales

### III.2.1.3. Influence de la direction de chargement

Pour étudier l'influence de l'application de la charge dans le sens du compactage ou à la perpendiculaire du sens de compactage, les morceaux obtenus après réalisation de l'essai de flexion sur les échantillons 7x7x28 cm sont testés selon deux directions de chargement.

La Figure III-8 présente les courbes contrainte-déformation des échantillons obtenus pour la formulation A-14. Les échantillons « R1 » sont ceux testés par une application de la charge dans la direction perpendiculaire à la direction de compactage et les échantillons « R2 » correspondent au chargement dans la direction de compactage. Les résultats montrent que les échantillons « R2 » possèdent une résistance et une ductilité plus importante que les échantillons « R1 ». Ces essais montrent que lorsque les fibres sont sollicitées en traction, elles apportent une résistance supplémentaire au matériau fibré.

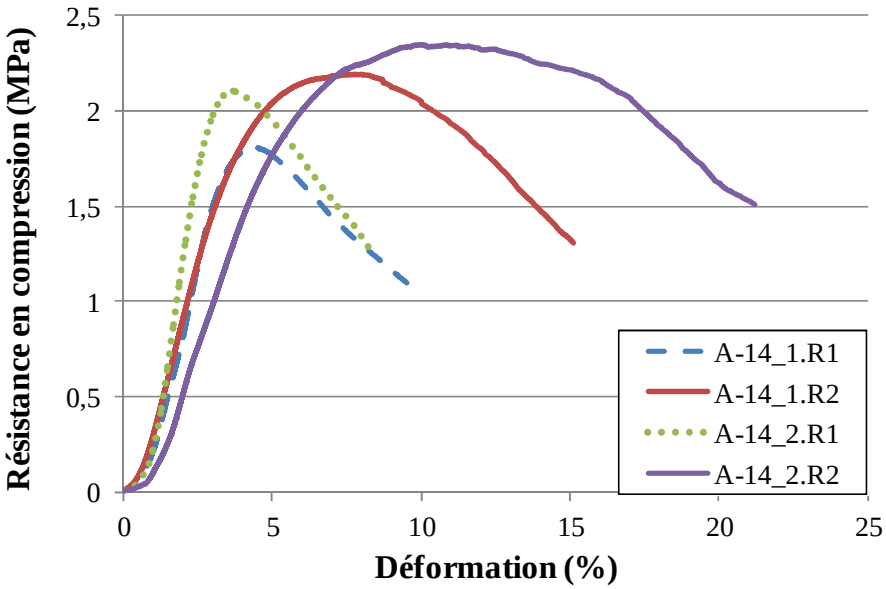



Figure III-8 : Courbes contrainte-déformation des deux échantillons de la formulation A-14 avec un ajout de 1 % de paille sollicités dans le sens et à la perpendiculaire du compactage

Les Figure III-9 et Figure III-10 présentent les courbes contrainte-déformation et les faciès de rupture des échantillons de formulation A-13 sans fibre et A-14 avec 1 % de paille de 5 cm. Ces résultats montrent que l'analyse de l'évolution de la ductilité dépend du sens de chargement de l'éprouvette. En effet, la ductilité augmente de manière plus importante pour l'échantillon testé dans le sens de compactage comme précédemment.

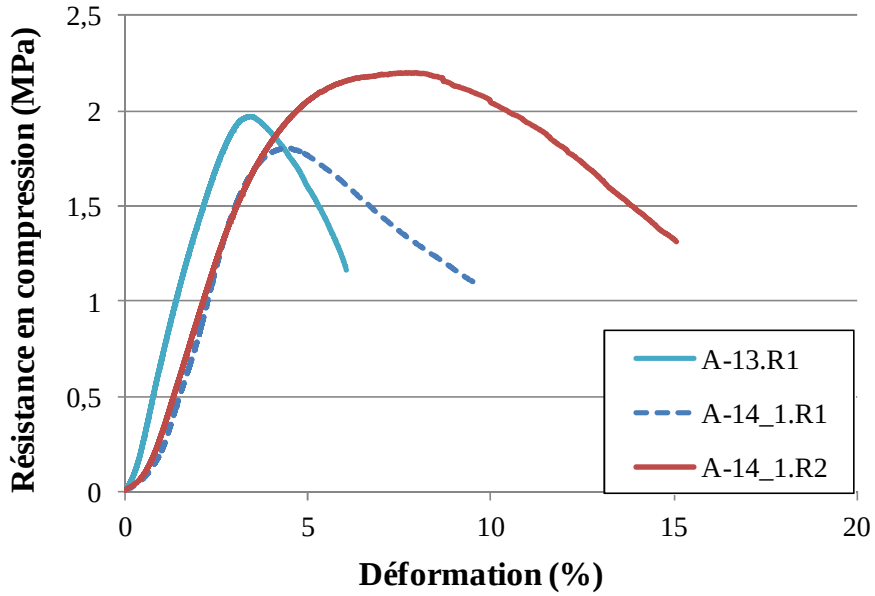
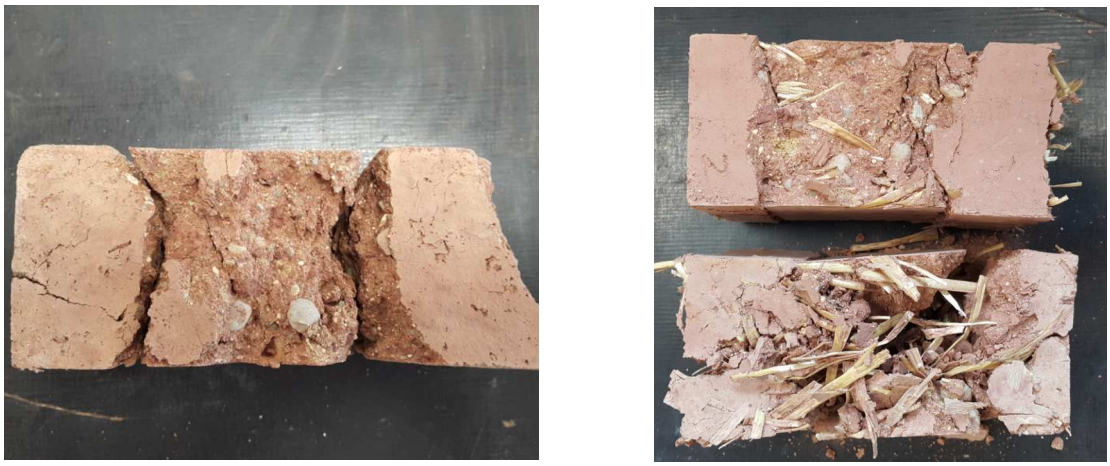



Figure III-9 : Courbes contrainte-déformation du mélange A sans fibre et avec 1 % de paille de 5 cm selon la direction ou la perpendiculaire du compactage

Les faciès de rupture montrent bien le caractère fragile de l'échantillon de sol sans fibre (Figure III-10(a)) et le rôle des fibres selon la direction de compactage (Figure III-10(b)). Ce phénomène doit donc être pris en compte dans l'analyse des résultats obtenus.



(a) (b)

Figure III-10 : Faciès de rupture de l'échantillon du mélange A sans fibre (a) et avec 1 % de paille de 5 cm (b - type R1 en haut et R2 en bas)

Ces essais ont également été effectués avec un ajout de 3 % de fibre pour les deux mélanges (formulation A-16 et B-16) (Figure III-11). Les courbes obtenues montrent un comportement très différent selon le sens de compression. En effet, les courbes obtenues pour une compression dans le sens perpendiculaire au compactage sont caractéristiques d'un matériau ductile avec un pic à la contrainte de rupture. Pour celles dans le sens du compactage, aucun pic de rupture n'a pu être enregistré avant la fin de course du capteur de déplacement. La différence de comportement selon le sens de sollicitation est similaire à celui observé pour un ajout de 1 % de fibre excepté que l'ajout de 3 % de fibre augmente de manière importante le phénomène. Il est à noter que le volume de fibre pour un ajout massique de 3 % est semblable à celui du mélange de sol utilisé.

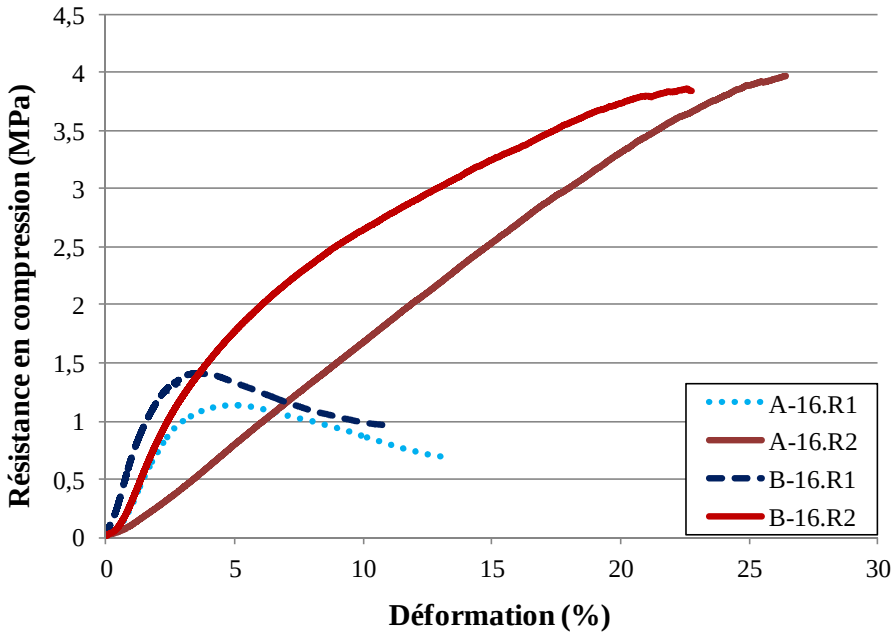


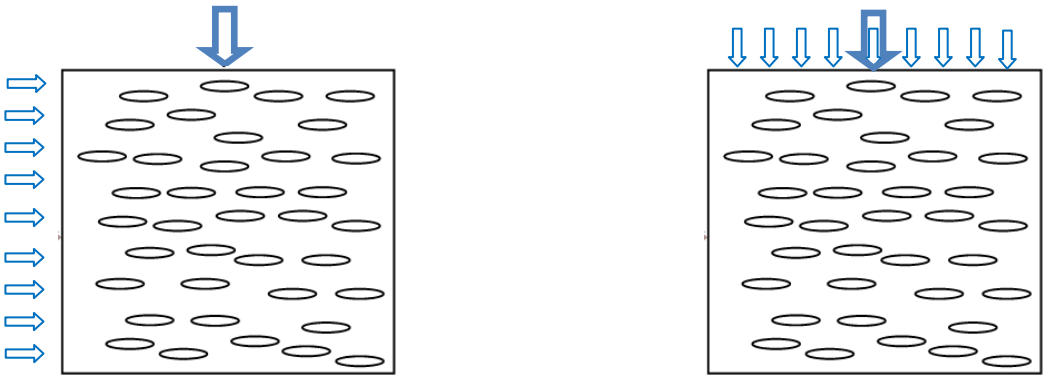

Figure III-11 : Courbes contrainte-déformation des deux mélanges à 3 % de fibre dans deux directions de chargement différentes

Les faciès de rupture observés (Figure III-12) montrent que les fibres, quelque peu aplanies lors de la confection, sont complètement planes après essai de compression (la flèche présente la direction de compactage).

(a) Vu au dessus (b) Vu à coté

Figure III-12 : Surface de rupture après essai de flexion d'un échantillon de mélange B avec 2 % de fibre (formulation B-15)

La Figure III-13 schématise la coupe transversale d'un échantillon 7x7x28 en considérant que les fibres sont quelques peu aplanies au départ. Ce schéma montre que lorsque le chargement (flèches réparties) est effectué dans le sens du compactage (grande flèche) (Figure III-13(b)), les fibres vont s'aplanir très vite, le squelette de sol reprendra l'effort avec les fibres qui travailleront en traction. Dans le cas d'une compression dans le sens perpendiculaire du compactage, le phénomène d'écrasement des fibres sera beaucoup plus long, engendrera des porosités supplémentaires dans le matériau et la liaison terre-fibre engendre un moindre travail en traction des fibres (Figure III-13(a)).



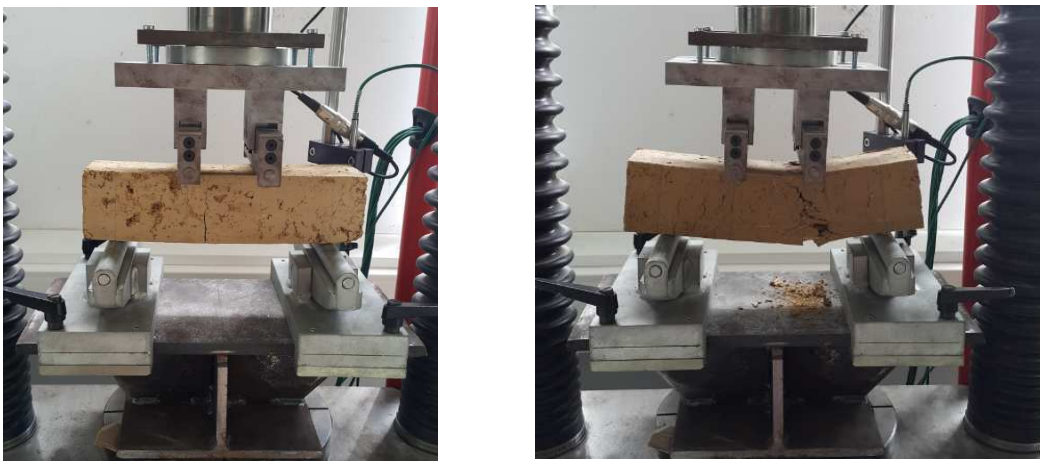
a) Chargement type R1 (b) Chargement type R2

Figure III-13 : Schéma d'une coupe transversale d'un échantillon 7x7x28 cm selon les deux types de chargement

## III.2.2. Courbe contrainte-déformation en flexion de la bauge

### III.2.2.1. Rôle des fibres

La Figure III-14 présente les échantillons de formulations B-13 (sans fibre) et B-15 (ajout de 2 % de fibre) à la rupture. Visuellement, il est observé que la présence de fibre permet une déformation plus importante avant rupture. Il est également observé que la rupture des échantillons sans fibre est soudaine avec une seule fissure au milieu et une séparation complète des spécimens en deux moitiés alors les échantillons avec fibres montrent plusieurs fissures plus fines.



(a) Mélange B sans fibre (b) Mélange B avec 2 % de fibre

Figure III-14 : Dispositif de flexion 4 points du mélange B avec ou sans fibres

La Figure III-15 présente les résultats d'essais de flexion quatre points en fonction de la déformation au cours de la mesure pour différentes formulations du mélange B (B-13→16) pour des éprouvettes 7x7x28 cm.

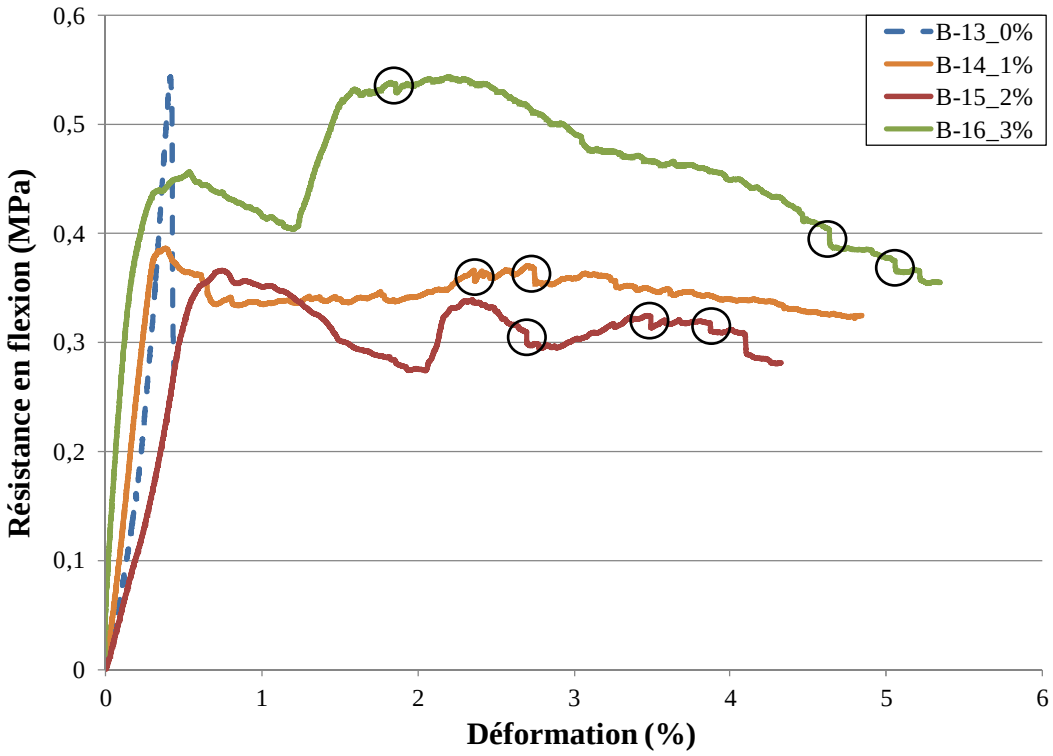



Figure III-15 : Courbe contrainte-déformation du mélange B avec différentes teneuses en fibre

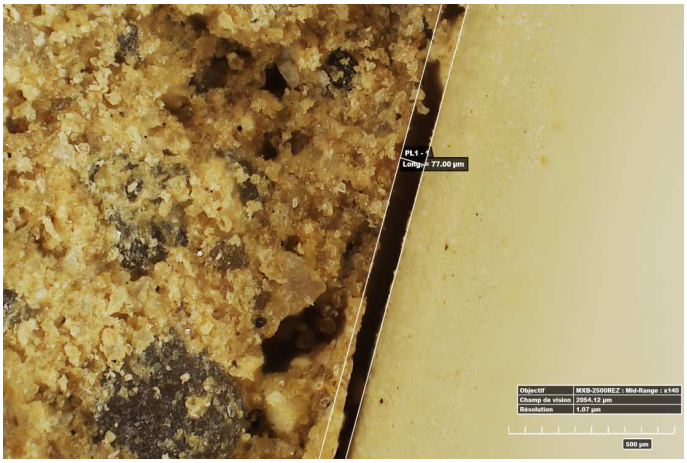
Pour ces quatre formulations, le comportement linéaire en phase élastique montre une pente relativement semblable pour les quatre courbes. Ceci confirme qu'avant macro-fissuration

de la matrice de terre, les fibres n'interviennent pas ou peu dans le comportement du matériau, qui est principalement gouverné par les propriétés de la matrice de terre. En revanche, la limite d'élasticité apparait influencée par la présence des fibres et dépend de la teneur en fibre. Pour un échantillon sans fibre, le matériau se caractérise par un comportement linéaire et fragile avant rupture. Concernant les échantillons avec fibre (1 % ; 2 %), il est possible de distinguer deux zones correspondant à un comportement linéaire jusqu'à la résistance maximal puis à un plateau à charge constante. Les échantillons avec 3 % de fibre montrent trois différentes zones avec l'apparition d'une reprise de charge due à la quantité de fibres présentes après la chute de résistance.

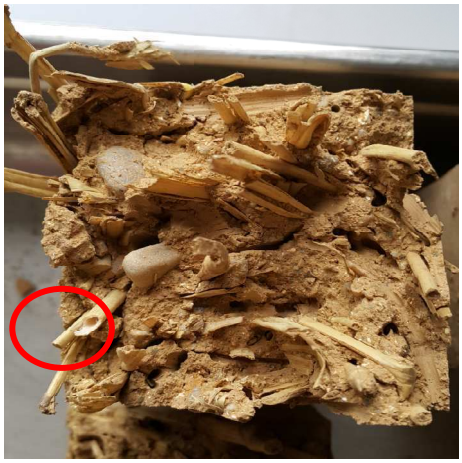
Concernant plateau à charge constante, une chute de 13 % à 20 % avec un ajout de 1 à 2 % de fibre est observée. Cette différence par rapport au mélange seul peut s'expliquer par la plus forte concentration en fibres qui participe à supporter la charge et empêcher la propagation des fissures. Avec 3 % de fibre en renfort, la quantité de fibre permet au matériau de remonter en charge après une première fissuration.

Contrairement à un béton fibré (Sedan, 2007), aucun lien physico-chimique n'a été créé entre la paille et le sol, ce qui ne permet pas une reprise de charge après rupture de la matrice mais plutôt une tenue à la charge. Cette interface terre/fibre peut être observée au microscope numérique (Figure III-16(a)). L'espace entre la fibre et le sol (≈77µm) (soit 23 % de l'épaisseur de la fibre (337µm)) est probablement dû à l'absorption d'eau par la fibre qui, après séchage, se rétracte.

La reprise de charge constatée avec l'ajout de 3 % de fibre peut être due au volume important de fibre dont la compression avec la matrice de terre affaiblit le gonflement volumique et permet d'obtenir une liaison suffisamment importante pour permettre cette reprise de charge. Sur la surface de rupture du matériau, il est observé que la plupart des fibres se sont déchaussées à quelques exceptions près où la fibre est cassée (cercle rouge sur la Figure III-16(b)). La rupture de fibres est visible sur la courbe contrainte/déformation par de légères chutes abruptes (zones entourés dans la Figure III-16(b)).



(a) Espace entre fibre et la terre



(b) Fibre cassée

Figure III-16 : Espace entre la fibre et la terre au sein de la bauge (a) et fibre rompue sur la surface de rupture (b)

### III.2.2.2. Influence du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon

Afin d'étudier l'influence du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon, des échantillons 14x14x56 cm ont été réalisés en gardant la longueur des fibres (5 cm). Donc, les formulations B-13 à 15 ont été fabriquées avec deux tailles différentes (7x7x28 et 14x14x56 cm). La Figure III-17 présente le comportement en flexion des échantillons 14x14x56 cm du mélange B avec 0, 1 et 2 % de fibre.

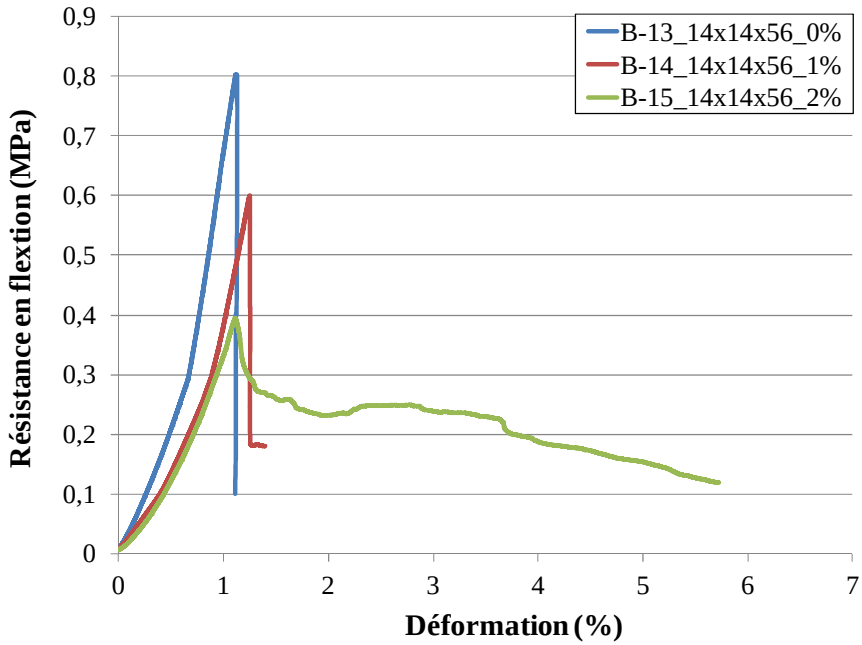



Figure III-17 : Résistance en flexion des échantillons 14x14x56 cm avec différentes teneurs en fibre

Sans fibre, le comportement évolue peu, un comportement linéaire et fragile avant rupture et une chute immédiate très forte de la résistance jusqu'à rupture totale. Avec un ajout de 1% de fibre, il est constaté une évolution de comportement avec une chute très forte de 0,6 à 0,19 MPa, puis un plateau après la chute. Avec un ajout de 2 % de fibres, le comportement observé est similaire à celui des échantillons 7x7x28 cm. Cependant, il est à noter que, pour l'échantillon 14x14x56 cm, toutes les fibres ont déchaussées (Figure III-18). Ce comportement peut-être dû à la faible liaison terre/fibre dans les échantillons 14x14x56 cm étant donné le ratio longueur des fibres/taille des échantillons est plus faible (0,36 au lieu de 0,71).

Figure III-18 : Surface de rupture d'un échantillon 14x14x56 cm avec 2 % de fibre

## III.3. Comportement en compression

### III.3.1. Influence des conditions de cure, du mélange et des fibres

Les formulations 1 à 9 pour les deux mélanges de sol vont permettre d'étudier l'influence du séchage selon les conditions de cure ainsi que l'influence de la fibre (type, longueur et teneur) et du mélange. Afin d'étudier l'influence de la teneur en eau initiale, les formulations 10 à 12 pour les deux mélanges seront utilisées.

#### III.3.1.1. Influence des conditions de cure

Les formulations utilisées sont à base des mélanges A ou B sans fibres ou avec un ajout de 1 % de paille de 10 cm (A-1,9 ; B-1,9). Concernant sur la condition de cure C1, les échantillons sont conservés dans la chambre de conservation 7, 14, 28 jours avant de réaliser l'essai. Le but est d'évaluer la résistance en compression en fonction de la teneur en eau. Cependant, seules des conservations de 7 et 14 jours ont été appliqués pour la formulation A-9, car, après 14 jours à l'étuve, l'échantillon est complètement sec.

La Figure III-19 présente les résultats obtenus pour les différentes formulations en fonction de la teneur en eau obtenue pour différents échéances. La résistance en compression

est la valeur maximale obtenue pendant l'essai. Les résultats montrent que, quelque soit la formulation ou la condition de cure, la résistance en compression augmente lorsque la teneur en eau diminue. Il est à remarquer que les résultats obtenus pour les échantillons en chambre de conservation (C1) et ceux à l'étuve (C2) ne montrent pas de tendance commune. En effet, les échantillons en salle de conservation semblent arriver à un palier d'environ 1,2 MPa alors que les échantillons en étuve ont une résistance entre 1,35 et 1,55 MPa. Cette différence peut-être due au développement observé de champignons autour des fibres de paille et sur l'extérieur des échantillons à cause l'absence de rayons de soleil dans la salle de conservation. L'augmentation constatée concernant la résistance des échantillons à l'étuve peut être due au fait que l'absence totale d'eau dans l'échantillon diminue de manière importante la quantité de défauts présents dans le matériau.

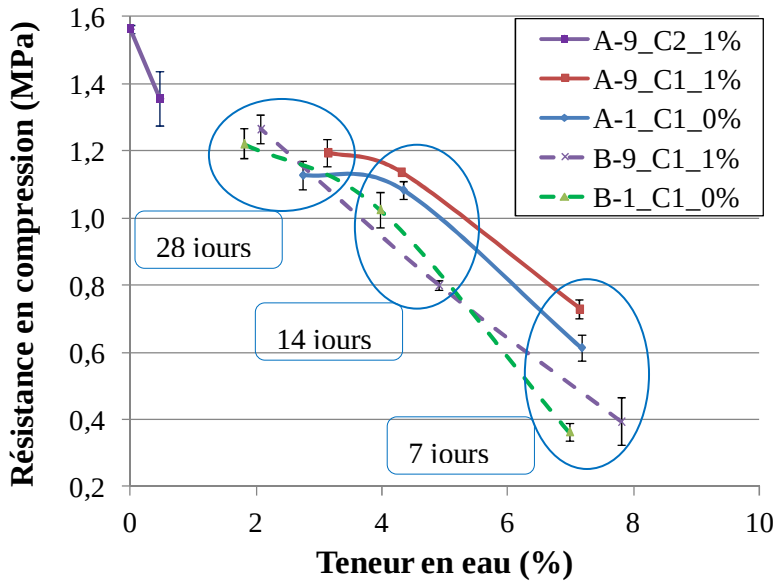



Figure III-19 : Résistance en compression par rapport à la teneur en eau du mélange A, B

Concernant la résistance en compression, à 28 jours, les formulations avec le mélange B montrent une résistance plus importante que celles avec le mélange A. Cela est dû à la densité plus élevée et à la teneur en eau plus faible des formulations avec le mélange B (Tableau III-5).

Tableau III-5 : Caractéristiques des échantillons et teneur en eau à 28j

| | A-1_C1_0% | A-1_C1_1% | B-1_C1_0% | B-1_C1_1% |
|---|---|---|---|---|
| $W_{OPN}$ (%) | 12 | 11,5 | 10 | 12 |
| Densité sèche $\rho_d$ (kg.m$^{-3}$) | 1959 | 1829 | 2011 | 1843 |
| $W_{28j}$ (%) | 2,7 | 3,1 | 1,8 | 2,1 |

### III.3.1.2. Influence du mélange

Pour étudier l'influence du mélange de sol, les formulations 2 à 9 seront utilisées pour deux mélanges. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figure III-20 et Figure III-21. Les résultats montrent que, pour chaque formulation, le mélange B possède des caractéristiques supérieures au mélange A quelque soit le type de fibre. Cela peut être dû soit à la densité du mélange B qui est supérieure au mélange A (Tableau III-1), soit à la teneur en eau finale plus faible du mélange B par rapport au mélange A (Tableau III-6, Tableau III-7).

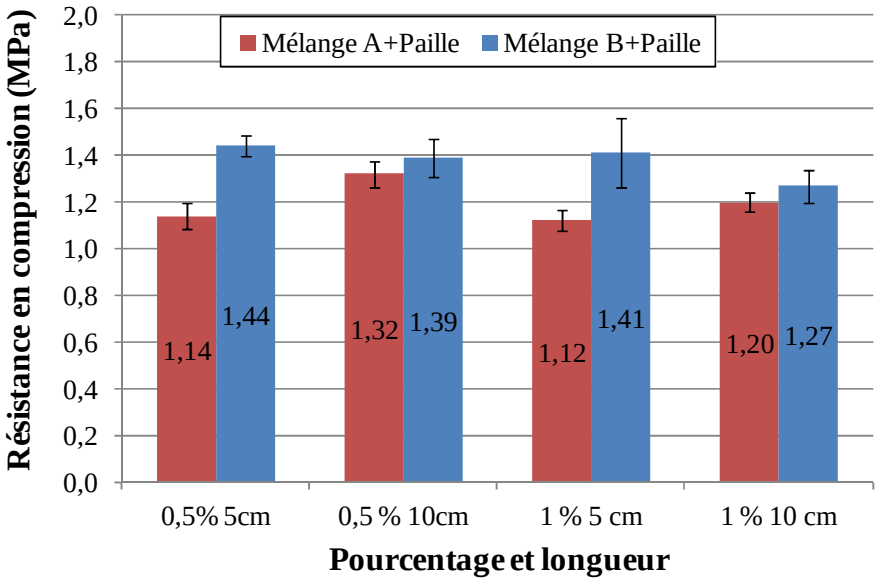



Figure III-20 : Résistance en compression des mélanges A et B avec différentes formulations de paille

Tableau III-6 : Teneur en eau à la rupture des différentes formulations avec paille

| W final | 0,5 % - 5 cm (formulation 6) | 0,5 % - 10 cm (formulation 7) | 1 % - 5 cm (formulation 8) | 1 % - 10 cm (formulation 9) |
|---|---|---|---|---|
| Mélange A | 3,00 | 3,07 | 3,00 | 3,13 |
| Mélange B | 1,93 | 1,83 | 1,87 | 2,07 |

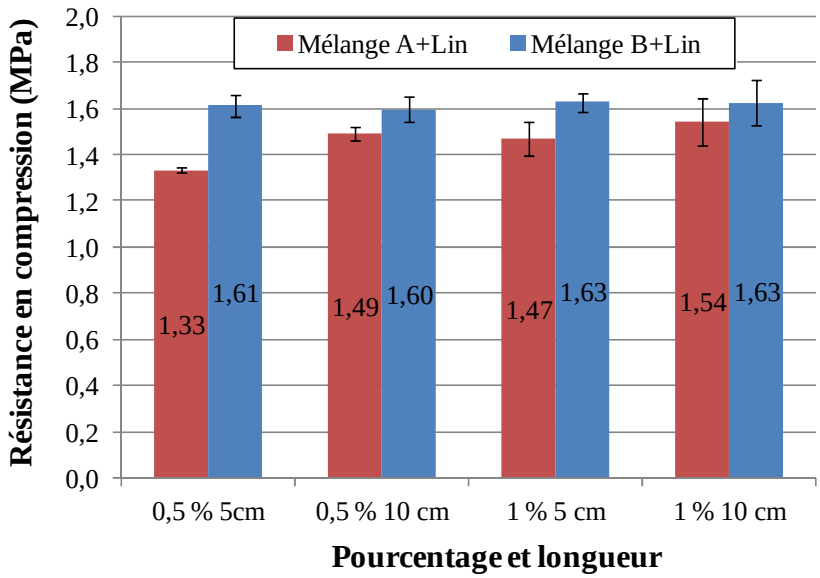



Figure III-21 : Résistance en compression des mélanges A et B avec différentes formulations de lin

Tableau III-7 : Teneur en eau à la rupture des différentes formulations avec lin

| W final | 0,5 % - 5 cm (formulation 2) | 0,5 % - 10 cm (formulation 3) | 1 % - 5 cm (formulation 4) | 1 % - 10 cm (formulation 5) |
|---|---|---|---|---|
| Mélange A | 2,70 | 2,50 | 2,77 | 2,70 |
| Mélange B | 1,93 | 1,93 | 1,97 | 1,97 |

### III.3.1.3. Influence de l'incorporation des fibres

Dans les cas des échantillons cylindriques, les résultats obtenus (II.3.1.1) montrent que le matériau fibré possède une résistance à la compression supérieure au matériau sans fibre (Figure III-19). Cette différence peut être due aux fibres qui supportent une partie de la charge sous forme de traction. Ce chargement en traction peut s'expliquer par le mode de rupture en compression (Figure III-22). Pour les deux premiers types de rupture (A et B), il y a apparition de l'effet de frettage qui entraine l'apparition de deux cônes aux extrémités de l'échantillon rompu. En effet, la pression exercée par les plateaux de la presse à la liaison avec l'échantillon empêche les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la déformation transversale est libre : il en résulte des contraintes de traction (symbolisées par les flèches notées sur la Figure III-22(A)) perpendiculaires à la compression. Ce sont ces contraintes de traction qui domine dans la zone centrale de l'échantillon, puis à sa rupture. Les zones extrêmes, protégées par le frettage créé par les plateaux, ne sont pas détruites (Figure III-22(B)). Le

frettage peut être limité en graissant les zones de jonction plateaux/éprouvettes et la rupture est alors du type de celle indiquée sur la Figure III-22(C). Dans ce cas là, la traction s'applique sur toute la longueur de l'échantillon. Donc, qu'il y ait frettage ou non, de la traction est toujours présente dans la zone centrale de l'échantillon au cours de l'essai de compression.

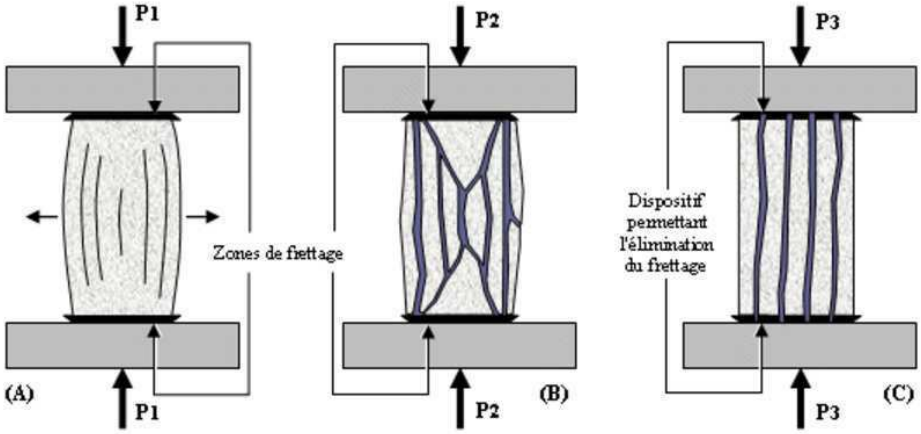



Figure III-22 : Différents types de rupture du matériau composite en compression

Pour la bauge, dans la partie centrale, les fibres en position transversale s'opposent à la propagation des fissures dues aux contraintes de traction et augmente, donc, la résistance en compression de l'échantillon (Figure III-23). De la même manière, les mêmes observations ont été constatées en ce qui concerne la rupture des fibres dans les échantillons cubiques (Figure III-24).

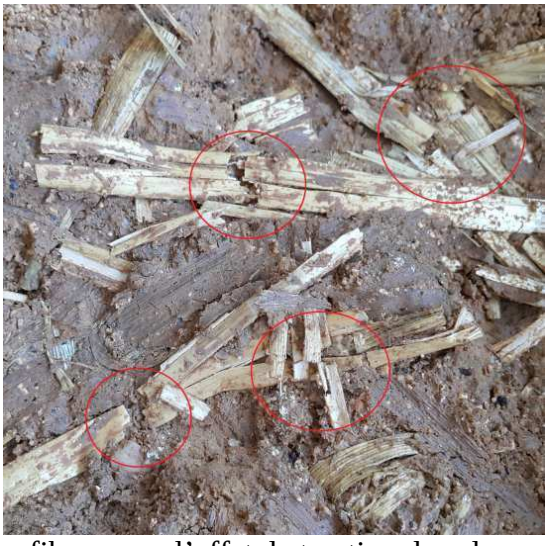


Figure III-23 : Rupture des fibres sous l'effet de traction dans la zone centrale des échantillons cylindriques

Figure III-24 : Rupture des fibres dans la zone centrale sous l'effet de traction des échantillons cubiques à $W_{OPN}$

Les résultats présentés dans la partie III.3.1.2 montrent également l'influence de la taille des fibres pour différentes teneurs en fibres et différents mélanges de sol (Figure III-20, Figure III-21).

Les résultats obtenus avec les fibres de paille ne montrent pas de tendance claire. En effet, pour le mélange A, l'augmentation de la taille de fibre entraine une augmentation de la résistance à compression alors que le contraire est observé pour le mélange B. De plus, pour les fibres de 5 cm, un ajout de 0,5 ou 1 % de fibre ne modifie pas les résultats obtenus alors que, pour les fibres de 10 cm, il y a une faible diminution de la résistance à compression.

En ce qui concerne les mélanges avec fibre de lin, de même qu'avec la paille, aucune tendance ne peut être établie. En effet, pour le mélange A, l'augmentation de la taille des fibres entraine une légère augmentation de la résistance à compression alors que qu'aucune évolution n'est observée pour le mélange B.

### III.3.1.4. Influence du type de fibre à la $W_{OPN}$

Deux types de fibre sont utilisés ici : la paille et le lin (formulation 2→9 pour les 2 mélanges). La paille est la fibre utilisée traditionnellement pour la construction en bauge. Il a été choisi d'utiliser le lin, d'une part, pour sa grande disponibilité en Normandie et, d'autre part, pour sa bonne résistance mécanique. En effet, les résultats du Tableau II-5 montrent que le lin possède une résistance à la traction 3 à 4 fois supérieure à la paille. De plus, une autre caractéristique permet de différencier la paille et le lin : le coefficient d'absorption d'eau. Ce coefficient d'absorption d'eau est de 309 % pour la paille et de 185 % pour le lin (II.1.2.3).

D'après les Figure III-20 et Figure III-21, les résultats montrent que, quelque soit la formulation et le mélange de sol, l'utilisation du lin permet d'obtenir une plus grande résistance mécanique que l'utilisation de la paille. Ici, la teneur en eau finale ne semble pas être à l'origine

de cette différence étant donné que la différence est inférieure à 0,3 %. Il semble que l'absorption d'eau lors de la confection est à l'origine de ces résultats. En effet, lors de la fabrication, les fibres absorbent l'eau présente dans le mélange et gonflent. Puis, lors du séchage, le volume des fibres se réduit et laisse un espace entre les fibres et le sol. Cela engendre une diminution de la liaison terre-fibre et donc diminue la résistance en compression du matériau (Hejazi et al., 2012). Etant donné que le lin possède un coefficient d'absorption plus faible que la paille, la liaison lin/sol à l'état sec semble supérieure à la liaison paille/sol.

### III.3.1.5. Influence de teneur en fibre à la $W_{BAU}$

L'influence de teneur en fibre est analysé grâce les formulations 13 à 16 pour les deux mélanges de sol. L'essai est réalisé lorsque la masse de l'échantillon est stable (condition de cure C3). Les résistances en compression à la rupture des différentes formulations pour les mélanges A et B sont présentées sur la Figure III-25. Il est observé que la résistance en compression diminue lorsque la teneur en fibre augmente pour les deux mélanges. Cependant, il est à noter que l'évolution est différente selon le mélange. Cela peut s'expliquer par une faible adhérence de la paille avec la matrice de terre, ce qui peut engendrer un glissement au début du chargement et entraine une diminution de la résistance en compression (Avrami et al., 2008; Bouhicha et al., 2005; Piattoni et al., 2011; Quagliarini et Lenci, 2010). De plus, un ajout de fibre diminue la densité du mélange terre-fibre, ce qui joue un rôle défavorable sur la résistance en compression.

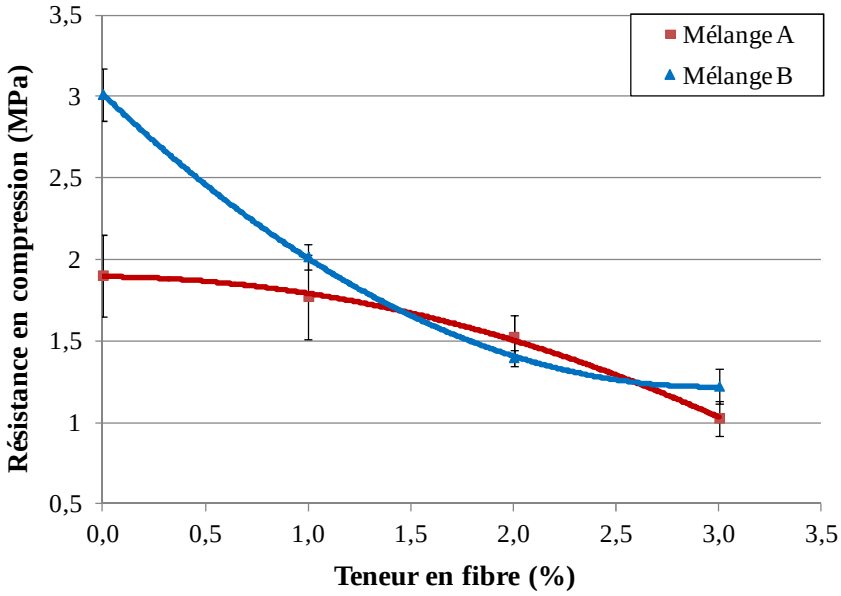



Figure III-25 : Résistance en compression en fonction de la teneur en fibre pour les mélanges A et B

Il est constaté que, dans le cas du mélange B, le matériau perd en moyenne 32 % de sa résistance lorsque l'ajout de fibre est de 1 %, 53 % pour un ajout de 2 % et 62 % pour un ajout de 3 %. Pour le mélange A, la diminution de $R_c$ est de 10 % pour un ajout de 1 %, 22 % pour un ajout de 2 % et 47 % pour un ajout de 3 % (Tableau III-8).

Tableau III-8 : Résistance en compression à la rupture de différentes formulations avec les mélanges A et B

| Formulations | Teneur en fibre (%) | $R_c$ mélange B (Mpa) | $R_c$ mélange A (Mpa) |
|---|---|---|---|
| 13 | 0 | 3,01 ± 0,16 | 1,94 ± 0,19 |
| 14 | 1 | 2,05 ± 0,26 | 1,75 ± 0,18 |
| 15 | 2 | 1,40 ± 0,05 | 1,52 ± 0,03 |
| 16 | 3 | 1,22 ± 0,11 | 1,02 ± 0,11 |

Excepté pour 2 % de fibre, les formulations avec le mélange B possèdent une résistance supérieure à celles avec le mélange A. Cela est dû à la densité plus importante des formulations avec le mélange B. Théoriquement, quelle que soit la teneur en fibre, les formulations sont plus denses avec le mélange B qu'avec le mélange A. Mais, la technique de fabrication manuelle pour ces échantillons a engendrée une masse volumique différente de celle obtenue par l'essai Proctor. Pour un ajout de 2 % de fibre, le mélange A possède une densité supérieure au mélange B (Tableau III-2). Cela montre donc que la densité influence fortement la résistance en compression du sol fibré. La Figure III-26 permet d'illustrer ce phénomène avec les différentes formulations des mélanges A et B.

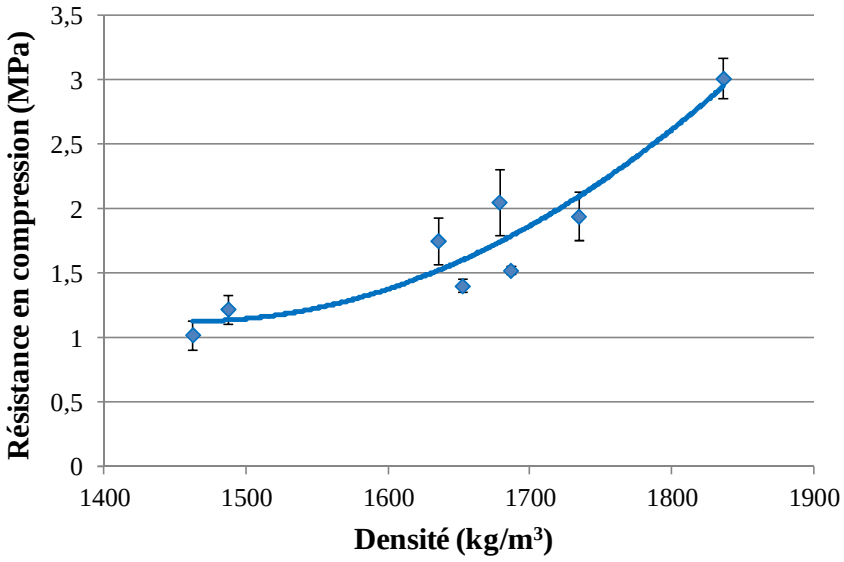



Figure III-26 : Relation entre la résistance en compression et la densité de différentes formulations

Ces résultats sont différents de ceux obtenus par (Quagliarini et Lenci, 2010) sur de l'adobe. Cette étude a montré que l'ajout de fibre engendrait une augmentation de la résistance en compression. Un ajouté de 0,2 % ; 0,3 % ; 0,5 % en masse de fibre de paille est effectué. Les résultats montrent une résistance en compression de 2,14 MPa ; 2,44 MPa et 2,52 MPa avec 0,2 % ; 0,3 % et 0,5 % de fibre. Cette valeur est en accord avec celles recommandées par (Binici et al., 2005; Bouhicha et al., 2005; Houben et Guillaud, 1994), soit environ 2 MPa.

Lors des essais, il est observé que la déformation à la résistance maximale est importante. Etant donné qu'une telle déformation n'est pas envisageable pour un matériau en conditions réelles, il a été choisi de fixer une déformation limite pour évaluer la résistance en compression. D'après la bibliographie sur le béton fibré et la terre-fibre, une déformation limite de 2 % a été choisie (Page, 2017; Simons et al., 2015). Le Tableau III-9 présente la résistance en compression à 2 % de déformation des différentes formulations des mélanges A et B. Le résultat montre que, à 2 % de déformation, pour toutes les formulations, le mélange B possèdent une résistance supérieure à celles du mélange A. Dans le cas du mélange A, dès que des fibres sont ajoutées, la résistance diminue de manière importante (environ 46%). Puis, cette diminution est plus faible pour chaque pourcentage de fibre ajouté. De même pour le mélange B, la diminution de résistance à compression est importante lors de l'ajout de fibres (environ 45%). Puis, cette diminution est plus faible pour chaque pourcentage de fibre ajoutée. Cependant, cette diminution est plus importante pour le mélange B que pour le mélange A. Les résultats obtenus pour un ajout de fibre de 3% sont similaire à ceux de l'étude de (Simons et al., 2015) dont la valeur de résistance en compression se situait autour de 0,7 MPa à 2% de déformation.

Tableau III-9 : Résistance en compression à 2% de déformation de différentes formulations pour les mélanges A et B

| Formulations | Teneur en fibre (%) | $R_c$ mélange B (Mpa) | $R_c$ mélange A (Mpa) |
|---|---|---|---|
| 13 | 0 | 3,01 ± 0,16 | 1,53 ± 0,20 |
| 14 | 1 | 1,66 ± 0,08 | 0,82 ± 0,25 |
| 15 | 2 | 1,18 ± 0,09 | 0,78 ± 0,14 |
| 16 | 3 | 0,81 ± 0,13 | 0,75 ± 0,15 |

### III.3.2. Influence des teneurs en eau initiales

Le but est d'évaluer l'influence de la teneur en eau initiale sur la résistance mécanique du matériau pour les formulations 10 à 12 des deux mélanges de sol. Les Figure III-27 et Figure III-28 présentent les résultats de résistance en compression des deux mélanges A et B en

fonction de leur densité. Une déformation limite de 2 % a été choisie comme dans la partie précédente.

Pour le mélange A, les résultats montrent que la résistance maximale et la résistance à 2 % de déformation diminuent lorsque la teneur en eau de départ augmente. Il est à noter que cette évolution semble linéaire. Concernant le mélange B, l'évolution de la résistance maximale et de la résistance à 2 % de déformation n'est pas similaire. En effet, la résistance à 2 % de déformation montre une faible augmentation lorsque la teneur en eau de départ diminue. Alors que pour la résistance maximale, il est observé une augmentation non linéaire avec la diminution de la teneur en eau de départ.

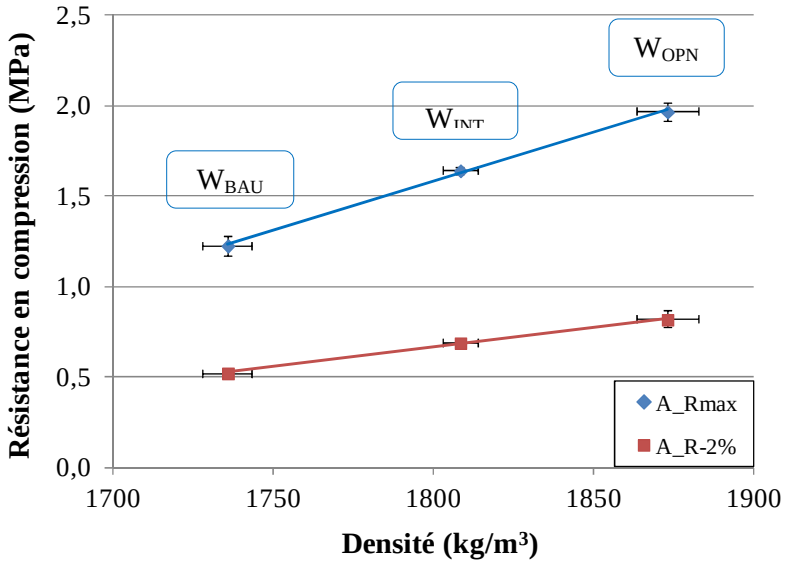



Figure III-27 : Résistances en compression en fonction des densités des mélanges A

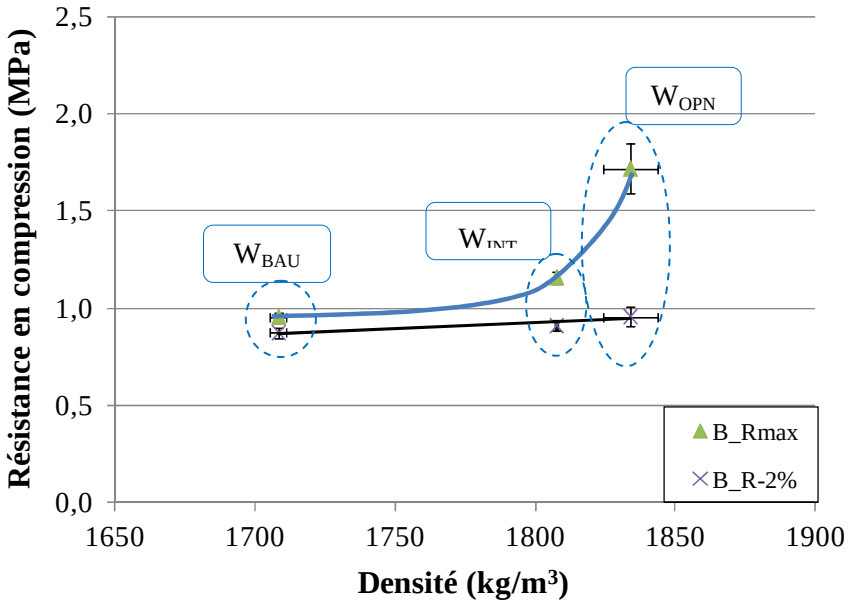



Figure III-28 : Résistances en compression en fonction des densités des mélanges B

Il a été observé que la paille à l'intérieur des échantillons concernant le mélange B présente des marques de décomposition dues probablement à une immersion prolongée dans un milieu très humide (échantillons démoulés après 7 jours pour les formulations A-10→12 et après 14 jours pour les formulations B-10→12). La Figure III-29 montre les différences de couleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un échantillon du mélange B. La paille à l'extérieur garde la couleur jaune originelle alors que la paille à l'intérieur brunit. Cela peut jouer sur la résistance de la paille qui peut donc être plus faible, donc, entrainer une diminution de la résistance du matériau.

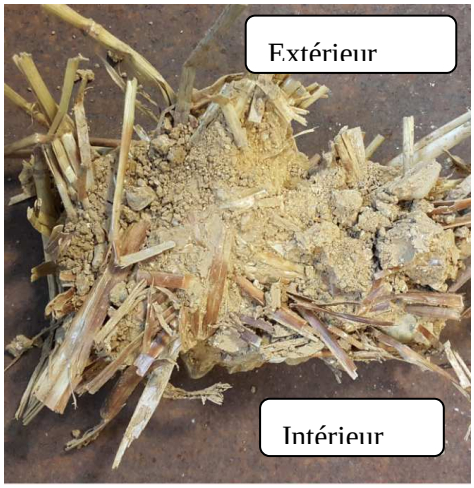



Figure III-29 : Couleurs de la paille de l'échantillon cubique du mélange B fabriqué à $W_{BAU}$

D'après ces résultats, il est observé que le mélange A possède une résistance maximale supérieure à celle du mélange B. Au contraire, à 2 % de déformation, la résistance du mélange B est plus élevé que celle du mélange A. Cette valeur varie entre 0,5 MPa et 0,87 MPa pour le mélange A et entre 0,85 MPa et 0,99 MPa pour le mélange B. Cette différence entre les deux mélanges peut être due à la rigidité plus importante du mélange B par rapport au mélange A (Figure III-7).

Il est également possible de comparer les résultats entre les échantillons cylindriques et cubiques. En effet, pour ces deux types d'échantillons, les formulations 9 et 10 ont été étudiées. Les résultats montrent que les échantillons cubiques possèdent une résistance supérieure aux échantillons cylindriques (Tableau III-10). Il est à noter que le ratio $R_2/R_1$ est plus important pour le mélange A que pour le mélange B. Cela peut être dû au fait que la densité des échantillons cubiques (1873 $kg.m^{-3}$) du mélange A est supérieure à celles des échantillons cylindriques (1827 $kg.m^{-3}$) alors qu'elles sont similaires pour le mélange B (1833 et 1843 $kg.m^{-3}$).

Tableau III-10 : Résistance en compression à la rupture des échantillons cylindriques et cubiques avec 1 % de fibre de paille de 10 cm à la teneur en eau Proctor.

| | $R_c$ des échantillons cylindrique - $R_1$ (MPa) | $R_c$ des échantillons cubiques - $R_2$ (MPa) | Ratio $R_2/R_1$ |
|---|---|---|---|
| A | 1,20 | 1,97 | 1,64 |
| B | 1,27 | 1,72 | 1,35 |

### III.3.3. Influence de la taille d'échantillon

Des échantillons 7x7x28 et 14x14x56 cm ont été réalisés pour les formulations B-13 à 15. La Figure III-30 présente les résultats de résistance en compression en fonction de la teneur en fibre ajoutée pour les échantillons 7x7x28 et 14x14x56 cm. Ces résultats montrent que la résistance à rupture obtenue est plus importante pour les échantillons 14x14x56 cm que pour les 7x7x28 cm. Cela peut-être dû aux directions des fibres qui sont plus aléatoires pour les échantillons 14x14x56 cm que pour les 7x7x28 cm. En effet, lors de la fabrication des éprouvettes, étant donné que les fibres utilisées ont une taille de 5 cm, la proportion de fibre étant dirigée dans le sens de la longueur est plus importante pour les 7x7x28 cm que pour les 14x14x56 cm.

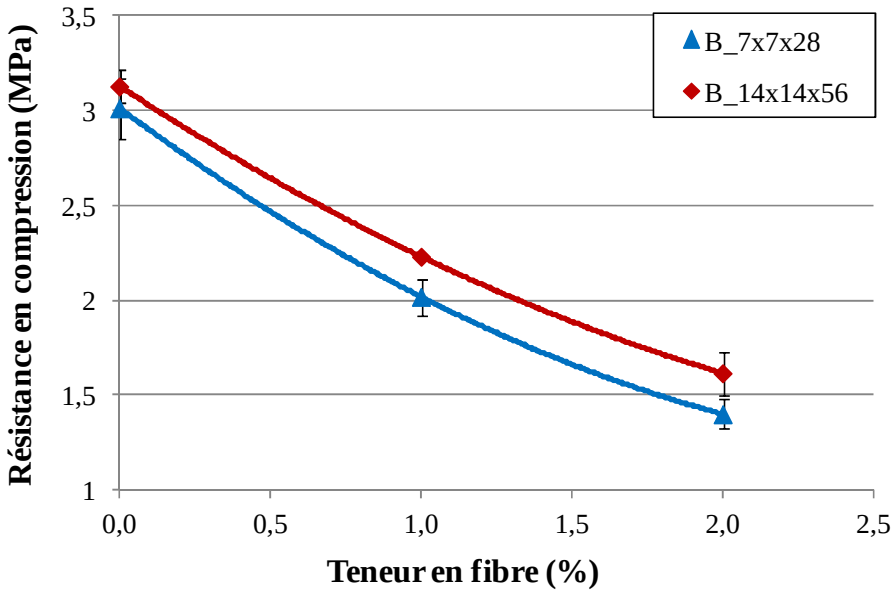



Figure III-30 : Résistance en compression des échantillons du mélange B de différentes tailles en fonction de la teneur en fibre ajoutée

Le Tableau III-11 résume les résistances en compression des échantillons 14x14x56 cm en comparant aux échantillons 7x7x28 cm avec les différentes teneurs en fibres. A partir des

résultats de résistance en compression, le coefficient de conversion entre les deux tailles d'échantillon peut être calculé (Tableau III-11). Il est à remarquer que plus la quantité de fibre augmente, plus ce coefficient est important. Cela peut être dû à une hétérogénéité d'orientation des fibres plus forte étant donné leur nombre plus important.

Tableau III-11 : Coefficient de corrélation entre les deux tailles d'échantillon

| Formulations | Teneur en fibre (%) | $R_c$ des échantillons 7x7x28 cm - $R_1$ (MPa) | $R_c$ des échantillons 14x14x56 cm - $R_2$ (MPa) | Coefficient de corrélation $R_2/R_1$ |
|---|---|---|---|---|
| B-13 | 0 | 3,01 ± 0,16 | 3,13 ± 0,09 | 1,04 |
| B-14 | 1 | 2,05 ± 0,26 | 2,23 ± 0,01 | 1,09 |
| B-15 | 2 | 1,40 ± 0,05 | 1,61 ± 0,12 | 1,15 |

## III.4. Comportement en flexion de la bauge

### III.4.1. Influence des fibres

La Figure III-31 présente les résultats de résistance en flexion en fonction de la teneur en fibre ajoutée des deux mélanges (formulations 13→16).

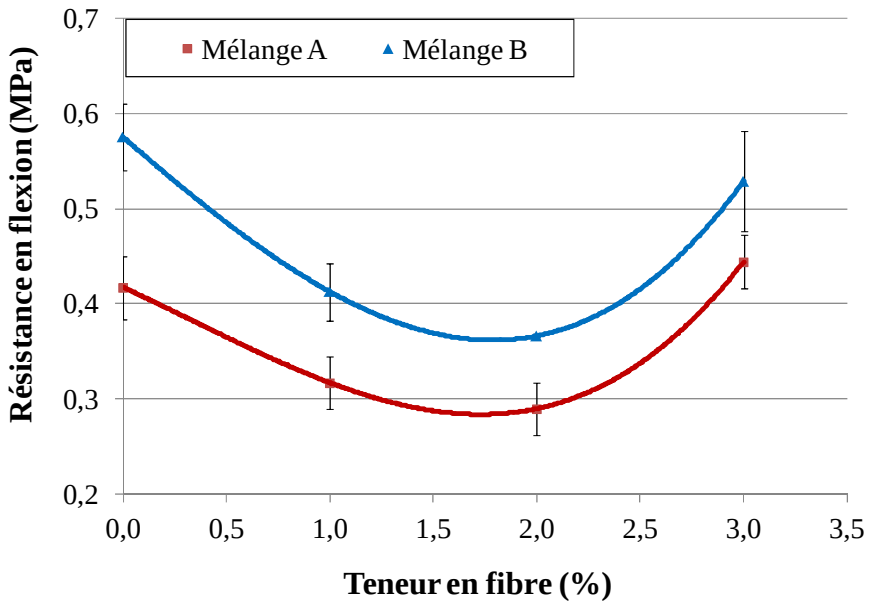



Figure III-31 : Résistance en flexion pour différentes formulations des deux mélanges

Les résultats montrent que le mélange B présente un comportement mécanique supérieur au mélange A pour chaque formulation grâce une densité plus importante que le mélange A. Il

est intéressant d'observer que, jusqu'à une teneur en fibres inférieur ou égale à 2 %, la résistance en flexion diminue progressivement selon la teneur en fibres ajoutée et, qu'ensuite, cette résistance augmente de nouveau pour un ajout de 3 % de fibre. En effet, la résistance en flexion diminue de 36 % pour un ajout de 2 % de fibre au mélange B et de 19 % pour le mélange A. Cependant, à 3 % de fibre, la résistance augmente de 22 % pour le mélange A et diminue seulement de 8 % pour le mélange B par rapport au sol sans fibre.

### III.4.2. Influence du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon

Pour les échantillons 7x7x28 cm, des fibres de 5 cm de longueur ont été utilisées, ce qui engendre un ratio taille de fibre/taille des échantillons de 0,7 qui favorise la direction des fibres dans la longueur de l'échantillon. Pour palier à cela, des échantillons 14x14x56 cm sont réalisés (formulation B-13→15) afin de permettre une plus grande hétérogénéité de direction des fibres, qui correspond un ratio taille de fibre/taille des échantillons de 0,35 (Figure III-32).

(a) Echantillon 14x14x56 cm dans son moule

(b) L'essai flexion quatre points

Figure III-32 : Echantillon 14x14x56 cm et dispositif de l'essai flexion quatre points

La Figure III-33 présente la courbe contrainte de flexion à rupture en fonction de la teneur en fibre ajoutée des échantillons 14x14x56 cm et 7x7x28 cm pour différentes formulations du mélange B. Ces résultats montrent que la contrainte à rupture obtenue pour les échantillons 14x14x56 cm est supérieure aux 7x7x28 cm. Il est à remarquer que plus l'ajout de fibre est important, plus la différence de résistance entre les tailles d'échantillons diminue. Le comportement sans fibre peut être influencé par la taille maximale des granulats qui est de 20 mm pour les deux types d'échantillons. Pour les échantillons 7x7x28 cm, cela peut engendrer

des défauts importants qui vont engendrer des concentrations de contraintes supérieures à celles sur les échantillons 14x14x56 cm. De plus, le rapprochement des deux courbes montre que seules les fibres dont la direction est parallèle à la longueur contribuent à la résistance en flexion.

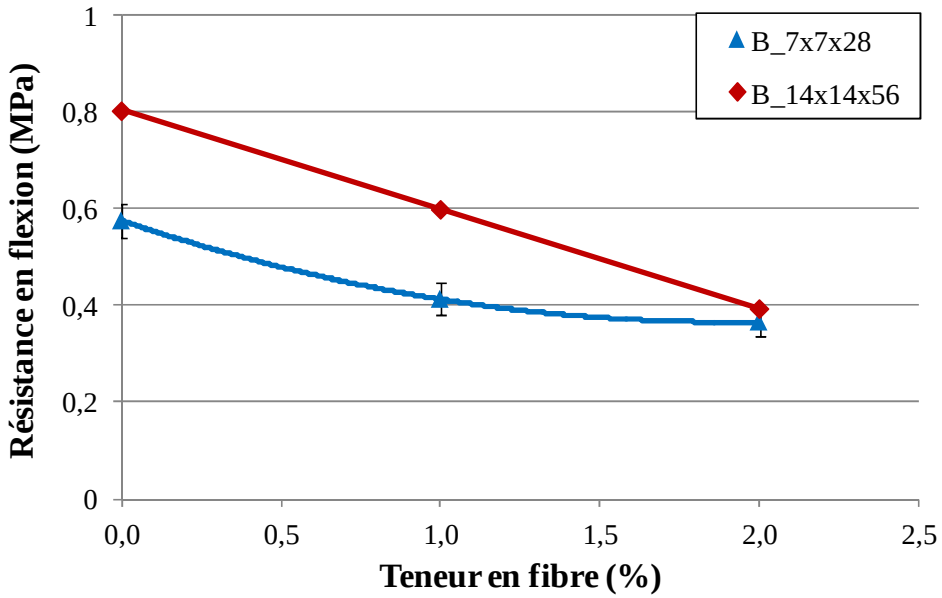



Figure III-33 : Courbe contrainte de flexion en fonction de la teneur en fibre des échantillons de deux tailles différentes

La résistance en flexion des échantillons 14x14x56 cm et des échantillons 7x7x28 cm est présentée sur le Tableau III-12. A partir de ces résultats, il est possible de calculer le coefficient d'étalonnage entre les deux tailles d'échantillon. Contrairement à ceux obtenus pour la résistance en compression, les coefficients d'étalonnage en flexion ne montrent pas de logique claire.

Tableau III-12 : Coefficient d'étalonnage entre deux tailles d'échantillons

| Formulations | Teneur en fibre (%) | $R_f$ des échantillons 7x7x28 cm – $R_1$(Mpa) | $R_f$ des échantillons 14x14x56 cm –$R_2$ (Mpa) | Coefficient d'étalonnage $R_2/R_1$ |
|---|---|---|---|---|
| B-13 | 0 | 0,58 ± 0,030 | 0,8 | 1,38 |
| B-14 | 1 | 0,41 ± 0,030 | 0,6 | 1,46 |
| B-15 | 2 | 0,37 ± 0,001 | 0,4 | 1,08 |

## III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, le comportement physico-mécanique de mélanges du sol avec différentes de teneur en fibres a été déterminé et analysés en tenant compte de l'influence de différents paramètres (mélange de sol ; type de fibre ; longueur de fibre ; teneur en fibre et teneur en eau initiale). D'un point de vue général, les résultats obtenus montrent que, selon la direction de compression, l'incorporation de fibres végétale vont contribuer à l'augmentation ou à la diminution des performances mécaniques du sol.

Il a été montré que la présence de fibres permet un séchage plus rapide de par un transport facilité de l'intérieur vers l'extérieur de l'échantillon grâce les fibres. De plus, l'activité argileuse semble jouer sur la vitesse de séchage. En effet, lorsque l'activité argileuse augmente, il semblerait que la succion du mélange augmente.

L'incorporation de fibres améliore la ductilité du matériau. Cela peut être dû à la liaison terre-fibre qui nécessite une quantité d'énergie plus grande pour la rupture. De plus, l'utilisation de lin permet d'obtenir une ductilité et une résistance plus importante que l'utilisation de la paille de par sa résistance en traction quatre fois supérieure et son module d'élasticité trois fois supérieur.

La contribution des fibres au comportement en compression de la bauge dépend du sens de compression. Elle contribue à l'augmentation si l'application de la charge est dans la direction de compactage car les fibres s'opposent à la propagation des fissures dues aux contraintes de traction. Et à l'inverse, elle diminue la résistance en compression si l'application de charge est dans la direction perpendiculaire à la direction de compactage. Le sol sans fibre se caractérise par un comportement en flexion linéaire et fragile avant rupture. Par contre, pour le sol fibré, il est possible de distinguer deux zones correspondant à un comportement linéaire jusqu'à la résistance maximal puis à un plateau à charge constante. De plus, les échantillons à forte teneur en fibre (3 %) montrent trois différentes zones avec l'apparition d'une reprise de charge due à la quantité de fibres présentes après la chute de résistance. Avec une teneur en fibres inférieur ou égale à 2 %, la résistance en flexion diminue progressivement selon la teneur en fibres ajoutée et, qu'ensuite, cette résistance augmente de nouveau pour un ajout de 3 % de fibre. L'augmentation du ratio longueur de fibre/taille d'échantillon augmente la liaison terre/fibre donc augmente la ductilité du matériau.

# IV. CHAPITRE 4 : COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE

Dans chapitre précédent a permis de mettre en évidence le rôle des fibres et des types de sols sur le comportement mécanique de la bauge. L'autre caractéristique essentielle pour le matériau bauge est le comportement hygrothermique qui va être étudié dans ce chapitre. Contrairement aux travaux sur le comportement mécanique, peu d'études ont été effectuées sur le comportement hygrothermique de la bauge.

Pour cela, des mesures de conductivité thermique, retrait et de sorption/désorption seront effectuées pour différentes formulations des mélanges de sols. De même que pour le chapitre précédent, la comparaison entre les formulations permettra de déterminer l'impact du type de fibres et du mélange de sol sur le comportement du matériau. De plus, l'influence de l'humidité relative sur les propriétés thermiques permettra d'évaluer le comportement du matériau en conditions réelles.

## IV.1. Conductivité thermique

Les résultats obtenus pour la conductivité thermique concernant différentes formulations (13→16 pour les mélange A et B) sont présentés sur les Figure IV-1 et Figure IV-2. Les valeurs de la conductivité thermique obtenues pour les mélanges A et B avec un ajout de 3 % de fibres sont de 0,65 et de 0,59 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour des densités de 1415 et 1443 $kg.m^{-3}$. Ces valeurs sont proches de mesures effectuées sur une maison en bauge du $19^{ème}$ siècle par (Laurent, 1986) dont la conductivité thermique a été évaluée à 0,76 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et la densité à 1660 $kg.m^{-3}$ (Laurent, 1986).

Les résultats montrent également que la diminution de la teneur en eau des échantillons entraine une diminution de la conductivité thermique. Cela est dû à l'évaporation de l'eau qui est remplacé par de l'air étant donné que l'air possède une conductivité thermique (0,025 $W.m^{-1}.K^{-1}$) plus faible que l'eau (0,6 $W.m^{-1}.K^{-1}$) (Hibouche, 2013; Tang, 2005). Il est à noter que, pour chaque courbe, deux parties distinctes semblent être présentes (plus particulièrement pour les formulations à faible teneur en fibre) : une première partie pour les plus grandes teneurs en eau où la conductivité thermique évolue peu et une seconde partie pour les teneurs en eau plus faible où la conductivité thermique évolue de manière significative.

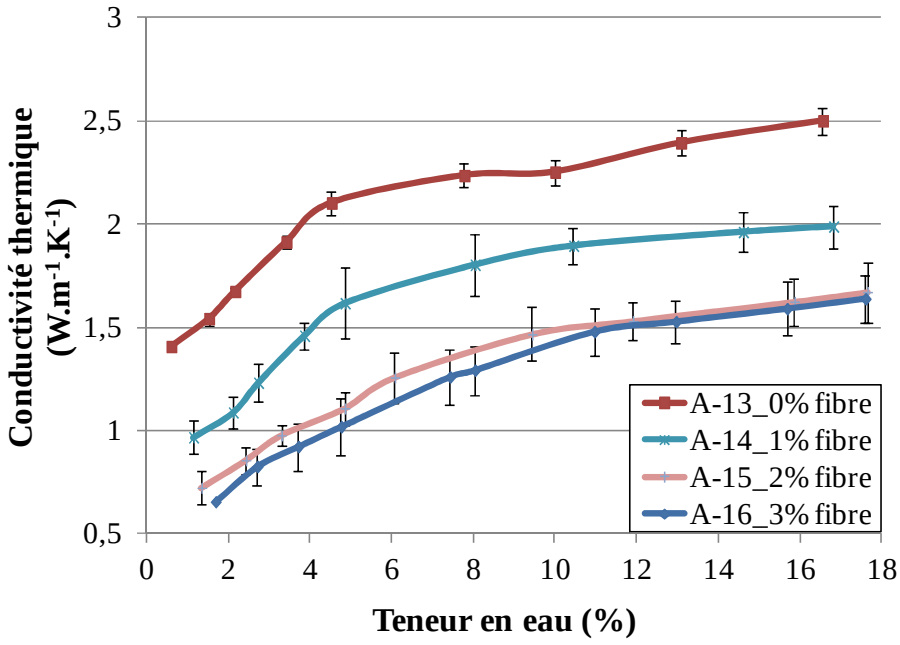



Figure IV-1 : La conductivité thermique en fonction de la teneur en eau avec les différentes teneurs en fibre du mélange A

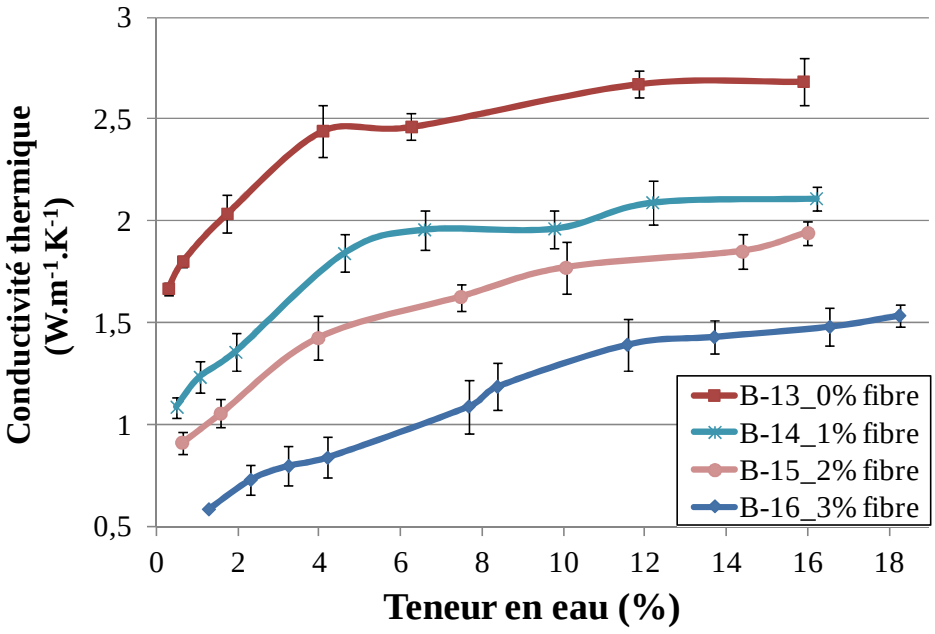



Figure IV-2 : La conductivité thermique en fonction de la teneur en eau avec les différentes teneurs en fibre du mélange B

De plus, les résultats montrent que l'ajout de fibre engendre une diminution de la conductivité thermique. Cela est dû à deux phénomènes : la diminution de la densité du matériau et la faible conductivité de la paille (0,055 - 0,065 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour une densité de 110-

130 kg.m$^{-3}$) (Al Rim et al., 1999; Khedari et al., 2005; Ledhem et al., 2000; Sutton et al., 2011). Cependant, il est à noter que la conductivité thermique de la paille dépend également de la direction du flux de chaleur appliqué (direction parallèle ou perpendiculaire aux faisceaux de paille). Cela peut expliquer les fluctuations des mesures effectuées sur les mélanges terre-paille. La diminution de la densité signifie que la porosité du matériau augmente. Cette évolution est quasiment proportionnelle au pourcentage de fibre (Figure IV-3) comme cela a été constaté par (Laurent, 1986). Par conséquent, la diminution de la densité entraine une diminution de la conductivité thermique de la bauge Figure IV-4. De plus, au cours de séchage, le phénomène de retrait entraine une diminution du volume du matériau et entraine donc une variation de la densité. Il semble donc intéressant d'étudier ce phénomène afin d'en déterminer son impact sur la conductivité thermique.

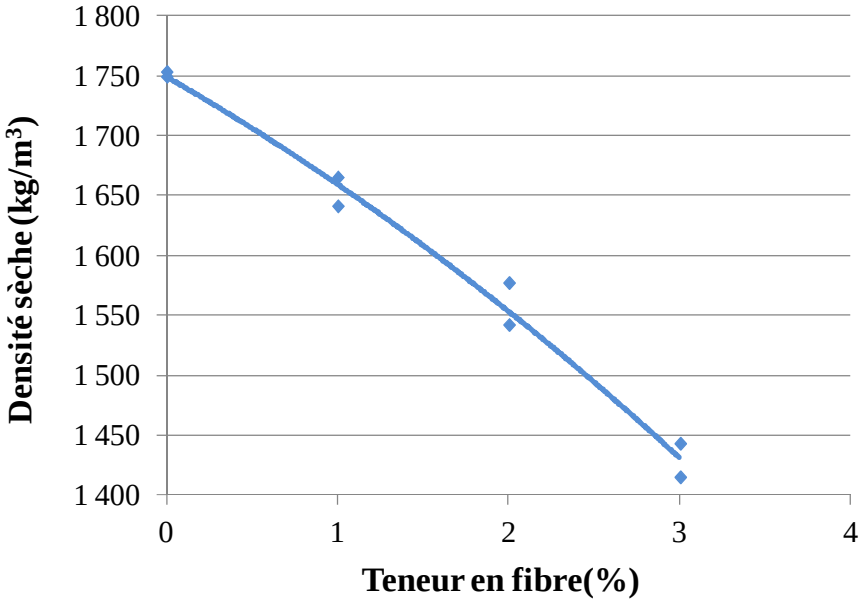



Figure IV-3 : Relation densité sèche/teneur en paille

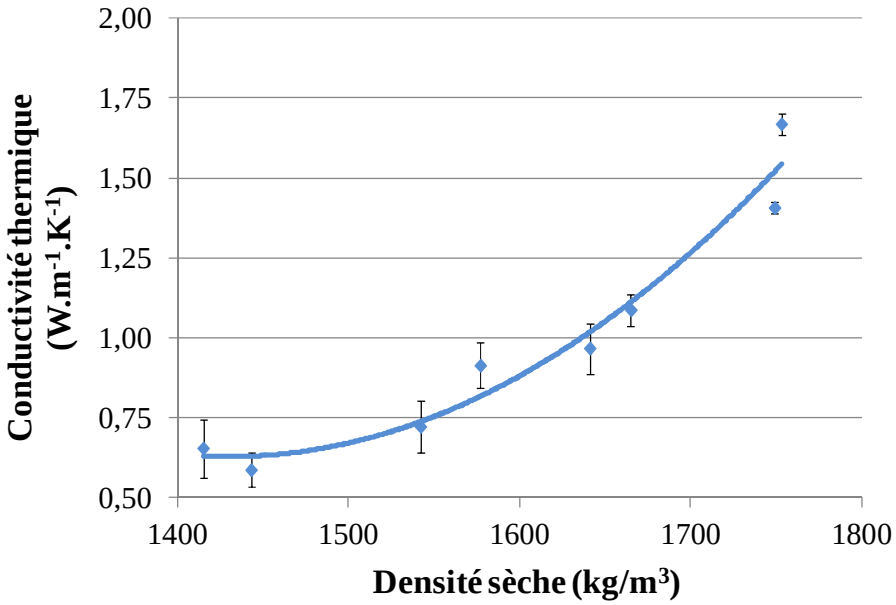



Figure IV-4 : Variation de la conductivité thermique par rapport à la densité sèche des deux mélanges

## IV.2. Retrait

Les Figure IV-5 et Figure IV-6 présentent les courbes de retrait obtenues pour les différentes formulations (13→16) des mélanges A et B.

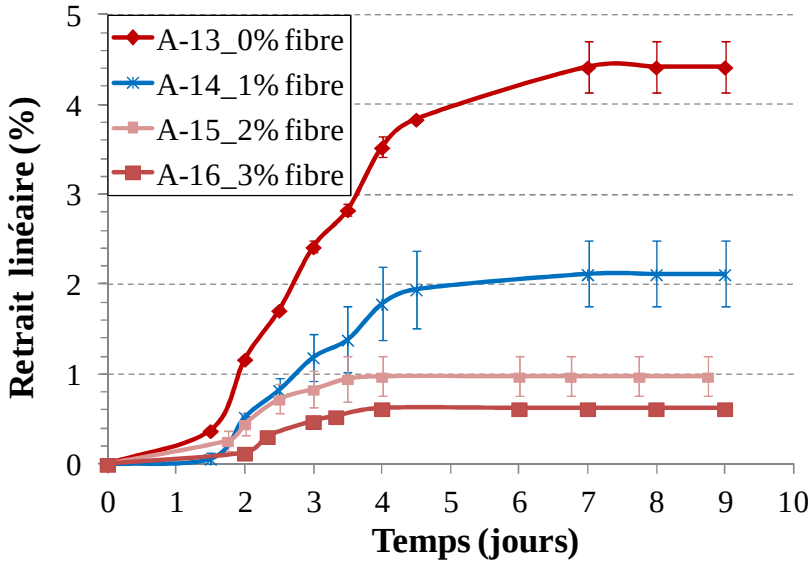



Figure IV-5 : Retrait du mélange A au cours du temps

Les résultats montrent que, pour chaque formulation, un retrait plus ou moins important a lieu. Ce retrait est dû à l'évaporation de l'eau qui engendre le rapprochement des particules du

sol. Il est à noter que la présence de fibres permet de diminuer le retrait pour les deux mélanges. Cela peut être dû au volume des fibres qui évolue peu avec la teneur en eau et empêche donc le rapprochement des grains de sol.

Pour chaque formulation étudiée, l'utilisation du mélange A entraine un retrait supérieur à l'utilisation du mélange B. Cela est probablement dû à l'activité argileuse qui est plus importante pour le mélange A par rapport au mélange B. En effet, plus l'activité argileuse est importante, plus les phénomènes de gonflement/retrait des argiles sont importants.

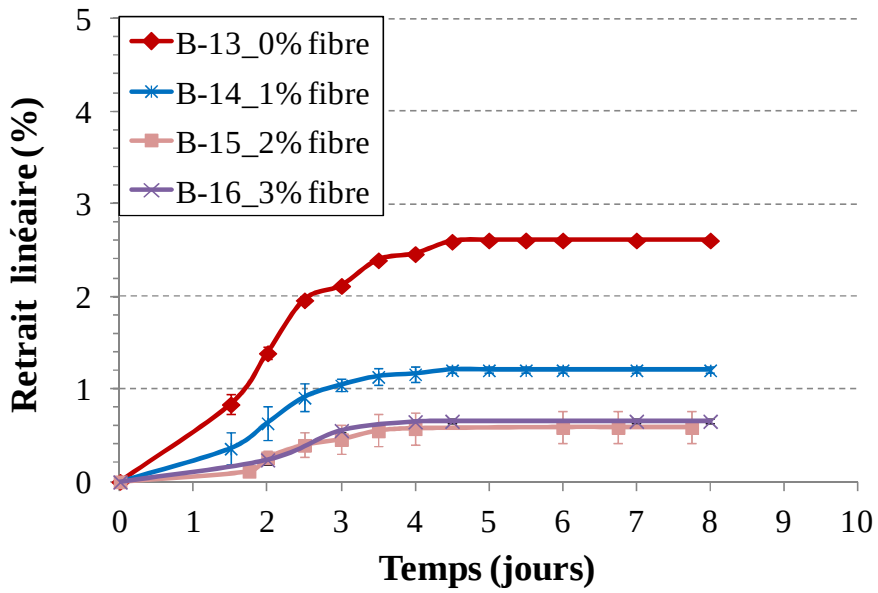



Figure IV-6 : Retrait du mélange B au cours du temps

De plus, il est à noter que le temps nécessaire à la stabilisation du retrait diminue lorsque de l'ajout de fibres au mélange de sol : 7 à 8 jours pour le mélange A sans fibres, 5 jours pour le mélange A avec 1 % de fibres et 3 à 4 jours pour le mélange A avec 2 ou 3 % de fibres. Dans le cas du mélange B, la stabilisation du retrait a lieu après 5 jours pour le mélange sans fibre et avec 1 % de fibre et après 4 jours pour un ajout de 2 et 3 % de fibre. Les fibres accélèrent donc le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres (Hibouche, 2013). Ces conclusions sont confortés par la bibliographie (Aymerich et al., 2012; Bouhicha et al., 2005; Galán-Marín et al., 2010; Ghavami et al., 1999; Piattoni et al., 2011; Quagliarini et Lenci, 2010; Yetgin et al., 2008).

Le Tableau IV-1 ci-dessous présente les valeurs finales de retrait pour les différentes formulations des deux mélanges de sols. Il est intéressant de noter que le retrait diminue de moitié entre les échantillons sans fibres et un ajout de 1 % de fibres ainsi qu'entre un ajout de 1 % et un ajout de 2 % de fibres. Pour le mélange A, une diminution du retrait entre un ajout de 2 et 3 % est bien observée même si elle est moins importante par rapport aux évolutions

précédentes. Concernant le retrait avec un ajout de 3 % de fibre pour le mélange B, le retrait est plus important que pour 2 % fibre. Cela peut s'expliquer par la teneur en eau lors de la confection qui est plus importante pour un ajout de 3 % par rapport à un ajout de 2 % (18,5 % au lieu de 16 %) comme cela a été constaté par (Akinkurolere et al., 2006; Saxton, 1995). Cela semble montrer qu'il existe un palier se situant aux alentour de 3 % de fibres ajoutés pour les mélanges étudiés.

Tableau IV-1 : Valeurs de retrait final des différentes formulations pour les deux mélanges de sols

| Mélange | 0 % de fibre | | 1 % de fibre | | 2 % de fibre | | 3 % de fibre | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Retrait (%) | Ecart-type | Retrait (%) | Ecart-type | Retrait (%) | Ecart-type | Retrait (%) | Ecart-type |
| A | 4,42 | 0,29 | 2,12 | 0,37 | 0,98 | 0,22 | 0,62 | 0,04 |
| B | 2,61 | 0,01 | 1,21 | 0,04 | 0,59 | 0,18 | 0,65 | 0,03 |

Dans le paragraphe précédent, il a été noté qu'il serait intéressant d'étudier la relation entre retrait et conductivité thermique. Les Figure IV-7 et Figure IV-8 présentent les résultats de retrait et de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau des différentes formulations étudiées. Les résultats montrent que le changement de pente pour les courbes de conductivité thermique correspond au point d'inflexion des courbes de retrait. Cela peut s'expliquer par le fait que le retrait engendre une augmentation de la densité du matériau qui concourt à l'augmentation de la conductivité thermique. Lors du retrait, il y a donc une compétition entre la diminution de la conductivité thermique due à l'évaporation de l'eau et son augmentation due à l'augmentation de la densité du matériau. Cela peut donc expliquer la faible diminution de la conductivité thermique pour les grandes teneurs en eau. Puis, lorsque que le phénomène de retrait est stabilisé, l'évolution de la conductivité thermique n'est, alors, plus due qu'à l'évaporation de l'eau, ce qui induit une chute plus importante de la valeur observée.

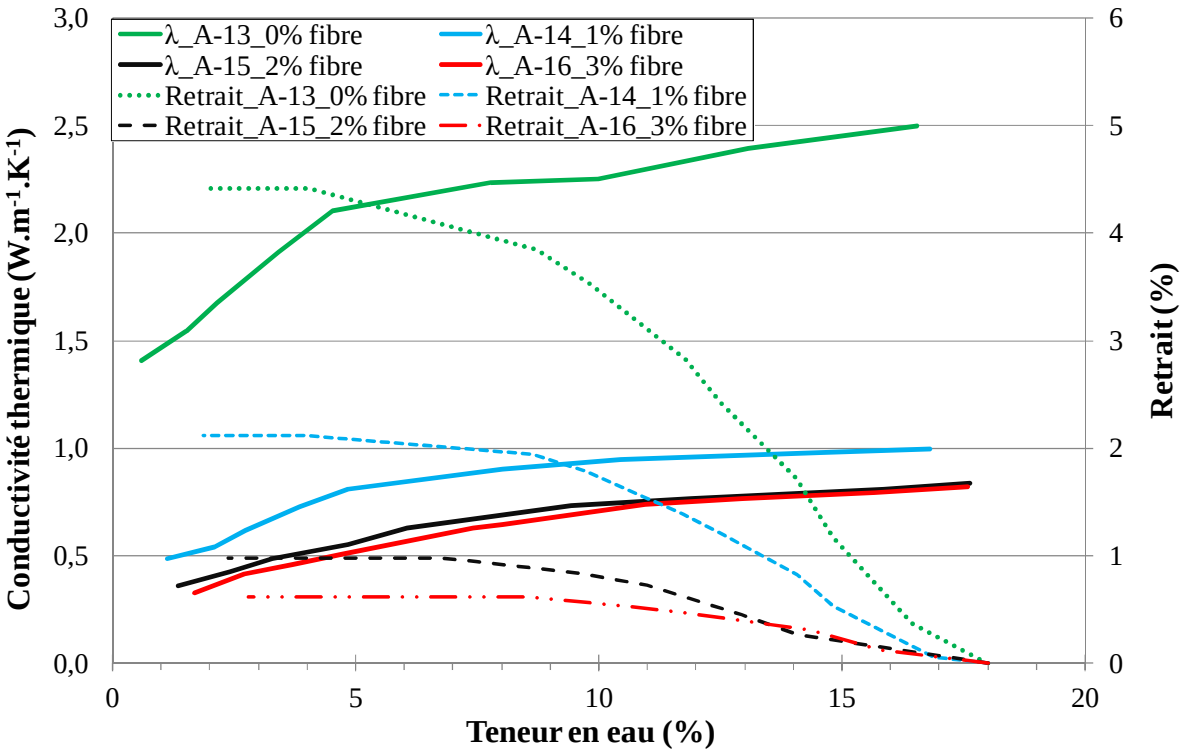



Figure IV-7 : Conductivité thermique et retrait du mélange A en fonction de la teneur en eau

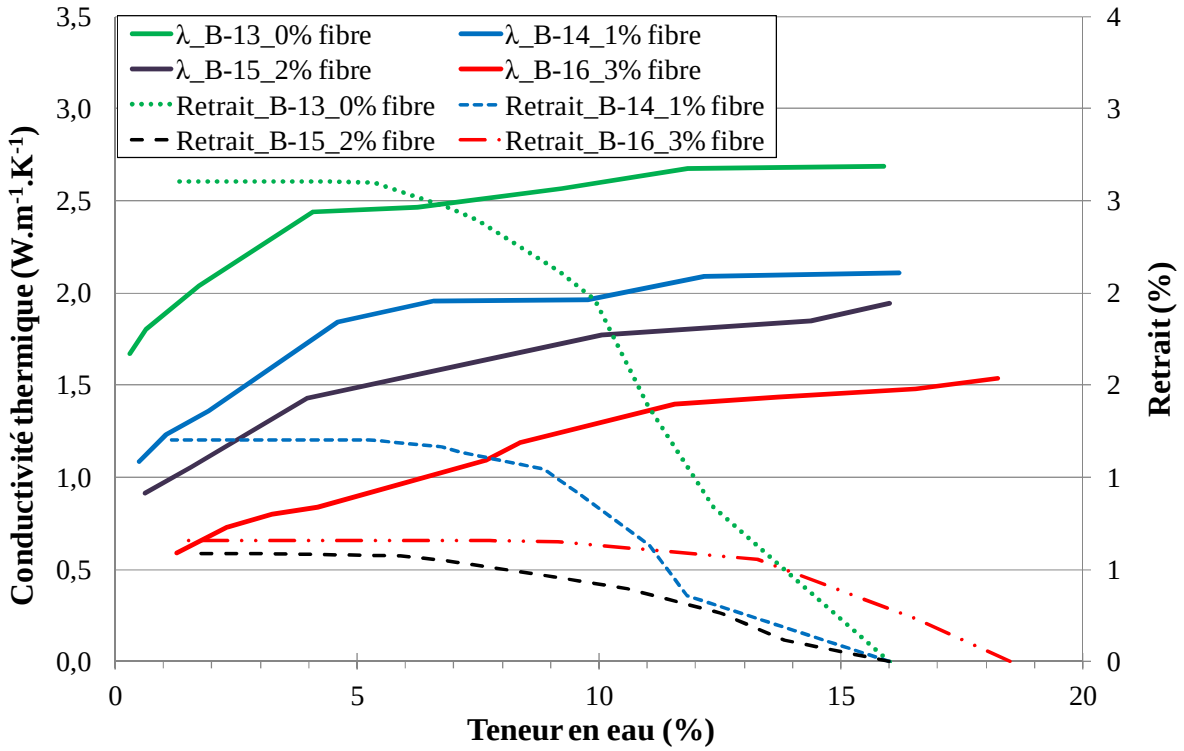



Figure IV-8 : Conductivité thermique et retrait du mélange B en fonction de la teneur en eau

## IV.3. Courbe isotherme sorption/désorption des matériaux

### IV.3.1. Fibres

Les Figure IV-9 et Figure IV-10 présentent la variation de la teneur en eau de la paille et du lin à 20 °C pour différents paliers d'humidités relatives (HR) situés entre 5 et 90 %. Il est à noter que, pour chaque palier de HR, l'évolution de la masse est importante dans un premier temps, puis la cinétique diminue jusqu'à atteindre l'équilibre. De plus, pour HR ≤ 50 %, l'atteinte de l'état d'équilibre est plus rapide que pour HR > 50 %. Comme montré dans la bibliographie, au dessus de 50 % HR, l'absorption de l'eau est effectuée en phase de condensation capillaire, ce qui engendre un temps supplémentaire. Il est intéressant de noter que la durée d'un cycle complet de sorption/désorption pour la paille (620h) est inférieure à celle obtenue pour le lin (1000h). Cela est dû à la vitesse d'absorption des fibres qui est plus importante pour la paille selon les résultats obtenus lors de la caractérisation des fibres (II.1.2.3).

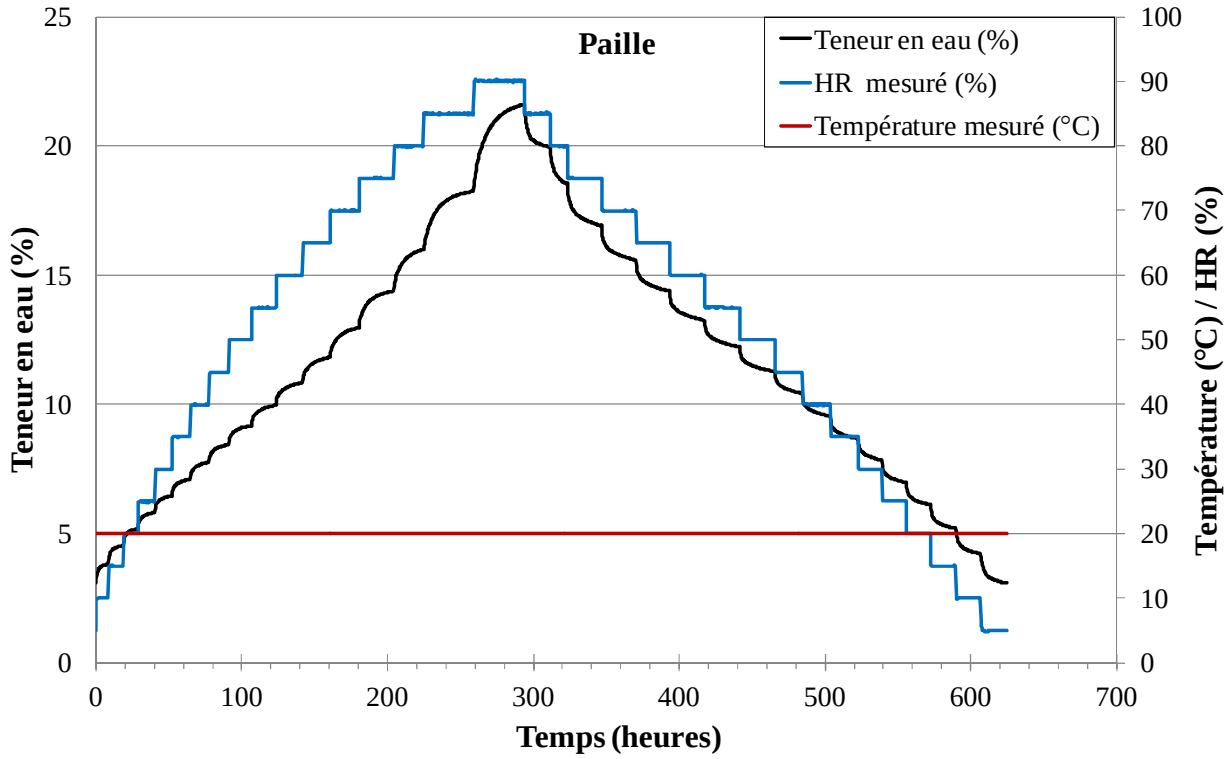



Figure IV-9 : Variation de la teneur en eau de la paille, de l'humidité relative et de la température au cours d'un cycle sorption/désorption

.

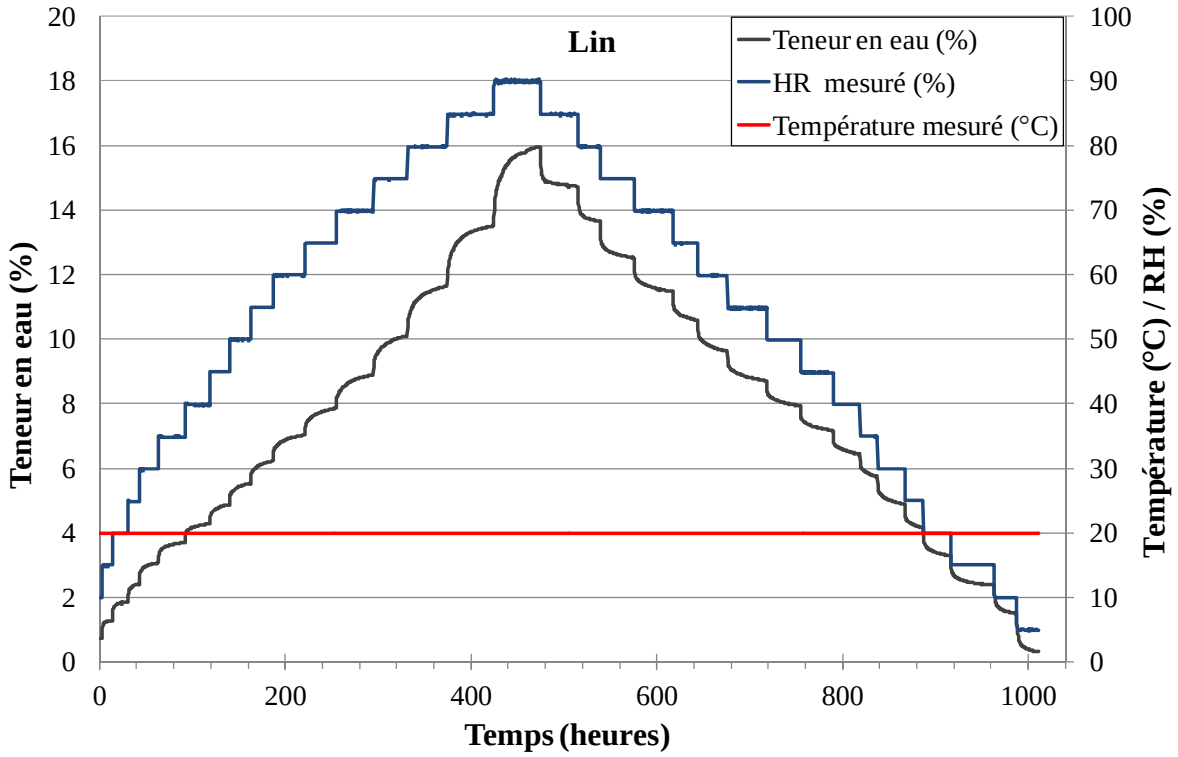



Figure IV-10 : Variation de la teneur en eau du lin, de l'humidité relative et de la température au cours d'un cycle sorption/désorption

La Figure IV-11 présente les courbes isothermes de sorption/désorption des deux fibres étudiées ainsi que celle de la paille obtenue par (Carfrae, 2011). Tout d'abord, il est à noter que les résultats obtenus présentent une bonne homogénéité étant donné les faibles écart-types relevés. Les résultats montrent que la paille, étant donné sa structure plus poreuse, présente un fort caractère hydrophile qui engendre une évolution de la teneur en eau de 3 % pour une humidité relative de 5 % à 21,4 % pour une humidité relative de 90 %. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Carfrae, 2011) qui a présenté une courbe allant jusqu'à une HR de 93,3 % et permet d'observer que l'augmentation de la teneur en eau est plus importante à haute HR liée au domaine capillaire d'absorption d'eau. Quand au lin, les résultats montrent que la teneur en eau évolue de 0,2 % à 16,0 %.

Il faut souligner que selon si le matériau est en sorption ou en désorption, sa teneur en eau sera différente et toujours supérieure pour la désorption par rapport à la sorption. Par ailleurs, l'allure des isothermes de sorption/désorption en fonction de l'humidité relative est similaire pour les deux fibres Les courbes présentent des points d'inflexion aux environs de HR=10 % et HR=50 %. Il est donc possible de distinguer trois zones distinctes (I, II et III) pour les courbes de sorption (Figure IV-11) dont les valeurs exactes sont présentées en annexe-1.

La zone I correspond à la plage 0-10 % HR où une augmentation importante de la teneur en eau est observée principalement pour la paille (augmentation de 3 % de la teneur en eau par rapport au matériau sec). Cela s'explique par le séchage des fibres à 50°C pendant 24h. Ce séchage permet une forte évaporation de l'eau liée aux constituants de la paroi, ce qui explique, qu'en présence d'eau, l'absorption d'eau est importante. Cela correspond à l'adsorption monocouche (Collet-Foucault, 2004).

La zone II correspond à la plage 10-50 % HR où l'augmentation de la teneur en eau est quasiment linéaire avec l'humidité relative. Ce comportement peut être expliqué par la structure poreuse des fibres où l'eau peut se diffuser librement. Lorsque l'humidité relative augmente, d'autres couches de molécules d'eau se fixent à la première et ainsi de suite couche par couche jusqu'à remplir le pore. Cela correspond à l'absorption multicouche (Collet-Foucault, 2004).

La zone III correspond à la plage supérieure à 50 % HR où la cinétique d'augmentation de la teneur en eau devient plus importante. Celle-ci est caractérisée par une fonction de type puissance qui représente un phénomène d'accumulation des molécules d'eau. Les multicouches se rejoignent pour créer des ponts liquides séparés de la phase gazeuse par un ménisque. Cela correspond à la condensation capillaire (Collet-Foucault, 2004).

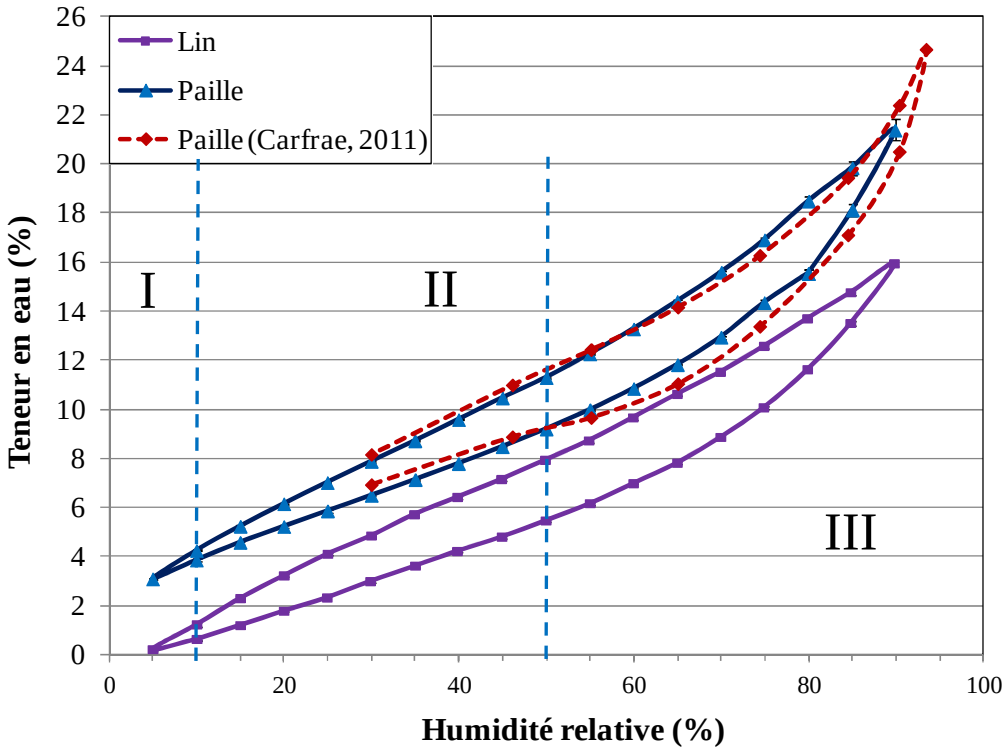



Figure IV-11 : Isothermes de sorption/désorption des fibres

Lors de la phase de désorption, on distingue également trois phases distinctes : évaporation de l'eau à la surface de la fibre, diffusion de l'eau vers la surface et désorption de l'eau (Fuzek, 1985).

Comme évoqué précédemment, le chemin parcouru lors du séchage se situe au dessus du chemin de remouillage, ce qui met en évidence un phénomène d'hystérésis. En effet, il n'existe pas de relation biunivoque entre la succion et la teneur en eau. La teneur en eau à une succion donnée dépend du chemin hydrique parcouru pour parvenir à ce point. Cette hystérésis montre donc que la désorption de l'eau est plus lente que l'absorption. Cette hystérésis est typique pour des milieux poreux constitués de pores de taille variable interconnectés en parallèle ou en série.

Pour des pores interconnectés en parallèle, lors du séchage, la succion correspond seulement à la vidange du plus gros tube et non à tous les tubes connectés en parallèle. Lors du remouillage, la teneur en eau à la même succion est plus faible du fait que tous les tubes ne se remplissent pas au même moment. Pour des pores interconnectés en série, l'effet de goulot entraîne également, pour une même succion, une teneur en eau plus forte lors du séchage que lors du mouillage.

### IV.3.2. Bauge

Comme présenté auparavant, deux types d'essais ont été effectués : mesure par contrôle de succion et par sorption de vapeur dynamique. La mesure par contrôle de succion est effectuée sur des formulations de bauges à la $W_{OPN}$ (formulation 1, 5, 9) et la mesure par sorption de vapeur dynamique sur des formulations de bauge à la $W_{BAU}$ (formulation 13→16).

En ce qui concerne la mesure par contrôle de succion, seule la courbe isotherme de désorption a été déterminée. Pour chaque mélange de sol, trois formulations ont été utilisées : sans fibre et avec 1% de fibre de lin et de paille de 5 cm (formulations 1, 5, 9). Tout d'abord, les résultats concernant les formulations avec le mélange B sont présentés sur les Figure IV-12 et Figure IV-13 et les Annexes 2 et 3. Ces résultats montrent, qu'à chaque palier de succion (correspondant à une HR fixée), la formulation sans fibre stocke une quantité d'eau plus faible que les formulations avec fibres. Cela montre que l'ajout de fibres améliore la capacité hygroscopique du sol. Cela est dû à deux principaux facteurs : l'augmentation de la porosité du matériau due à l'introduction de fibres et la capacité d'absorption des fibres.

De plus, la courbe isotherme de désorption du mélange B avec lin montre une teneur en eau moindre pour chaque palier de succion par rapport au mélange avec paille. Cela semble être dû à la plus grande capacité de stockage de la paille par rapport au lin qui a été déterminée dans le paragraphe IV.3.1 (Figure IV-11).

De même que pour les fibres, il est possible de distinguer trois phases sur les courbes de désorption (Figure IV-13) : diminution importante (environ 50 %) de la teneur en eau due à l'évaporation de l'eau à la surface jusqu'à 95 % HR (Collet-Foucault, 2004) (Figure I-42), diminution plus faible jusqu'à 50 % HR due à la liaison de l'eau avec la matrice de sol et, pour une HR < 50 %, quasi-stagnation de la teneur en eau due aux forces de Van Der Waals et aux forces capillaires.

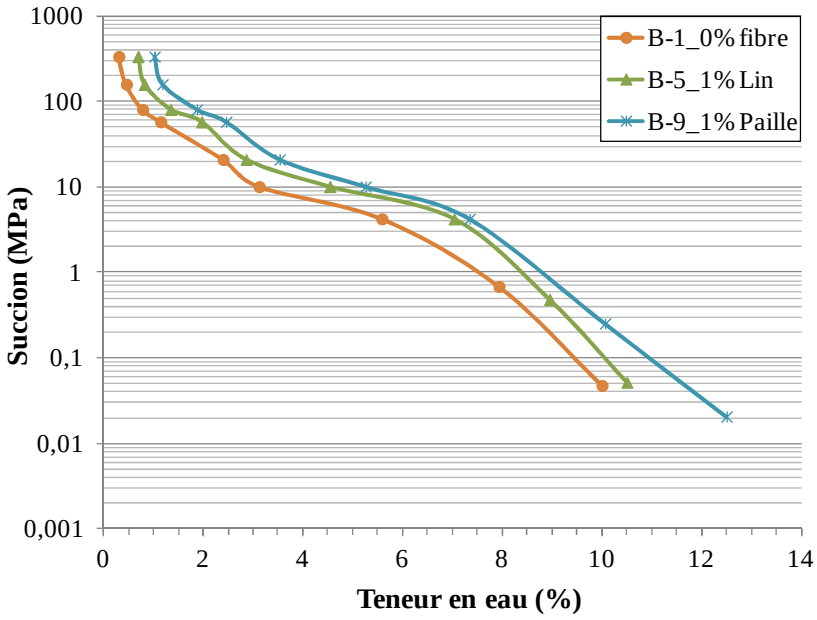



Figure IV-12 : Courbe de rétention d'eau de différentes formulations du mélange B – partie dessiccation

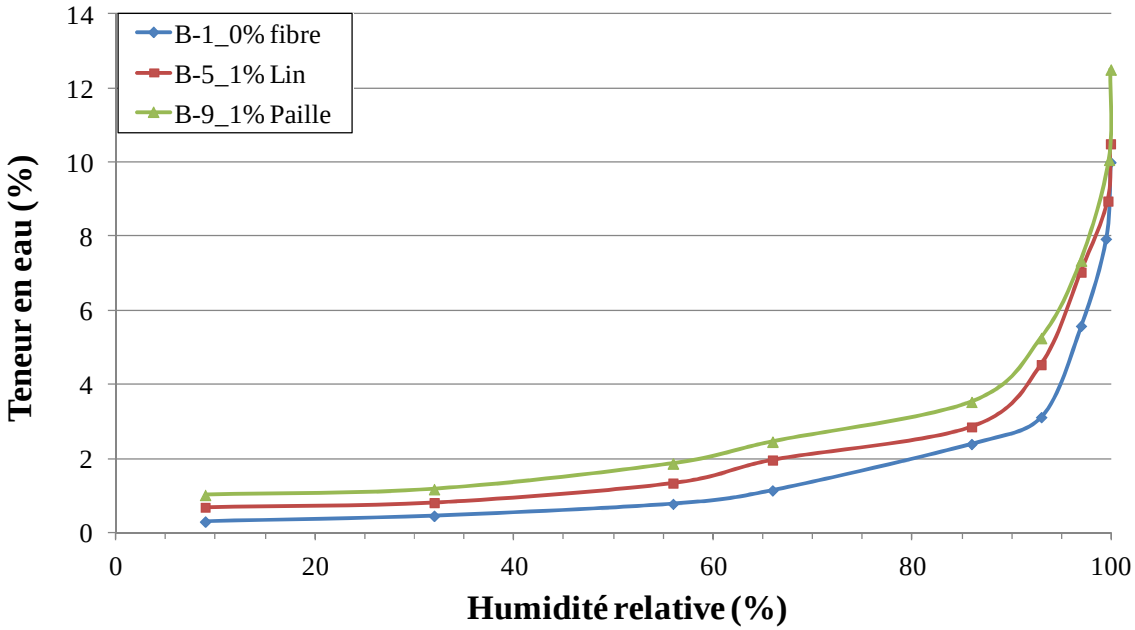



Figure IV-13 : Courbe isotherme de désorption de différentes formulations du mélange B

Les résultats concernant les formulations avec le mélange A sont présentés sur les Figure IV-14 et Figure IV-15. Contrairement au mélange B, l'ajout de fibres ne semble pas influencer le comportement du matériau. En effet, à forte HR (HR ≥ 95%), les courbes se confondent et, pour HR < 95%, l'écart entre les différentes formulations est plus faible que celui observé avec le mélange B. Etant donné que l'activité argileuse est plus importante pour le mélange A que pour le mélange B, la liaison de l'eau avec les grains argileux peuvent être à l'origine de ce phénomène.

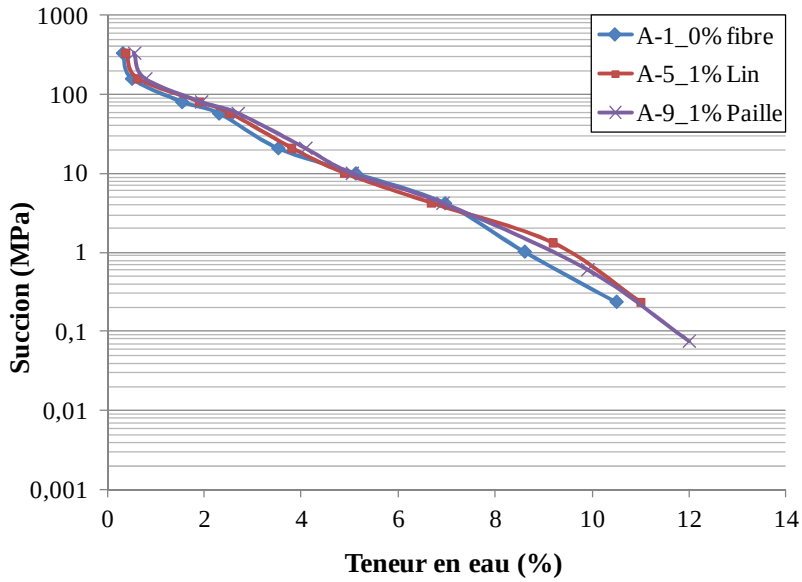



Figure IV-14 : Courbe de rétention d'eau de différentes formulations du mélange A – partie dessiccation

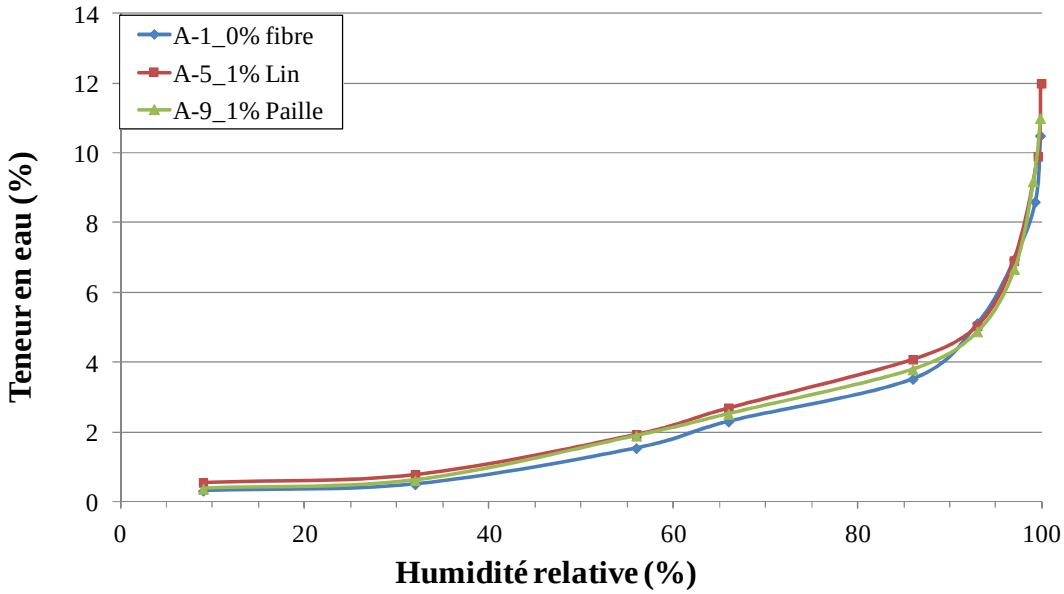



Figure IV-15 : Courbe isotherme de désorption de différentes formulations du mélange A

En ce qui concerne la mesure par sorption de vapeur dynamique, les courbes isothermes de sorption/désorption ont été déterminées quatre formulations de chaque mélange de sol : sans fibre, avec 1, 2 et 3 % de fibre de paille de 5 cm (formulations 13→16). Les résultats obtenus sont présentés sur les Figure IV-16, Figure IV-17 et Annexes 4 et 5. Tout d'abord, ces résultats montrent une bonne homogénéité des valeurs obtenues pour les HR<50 % et une dispersion plus importante au-delà de cette valeur quel que soit la formulation considéré. De même que pour les fibres, étant donné que la bauge est un matériau poreux, les courbes de sorption/désorption présentent trois zones distinctes (HR<10 %, 10 %<HR<50 %, HR>50 %).

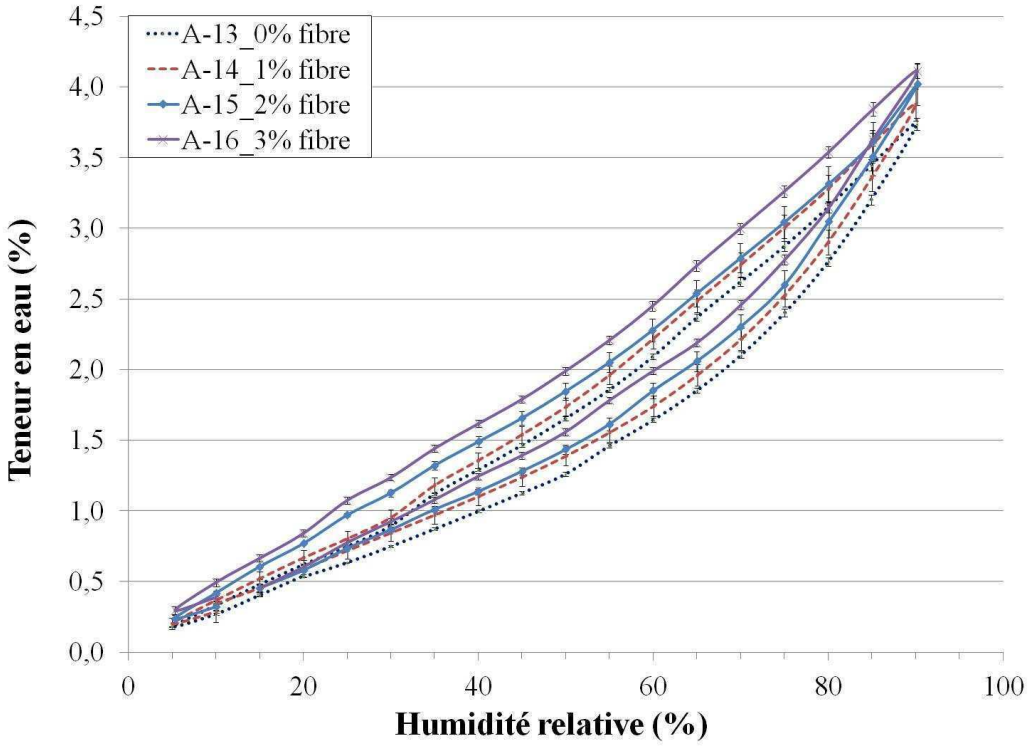



Figure IV-16 : Isotherme de sorption/désorption de différentes formulations du mélange A

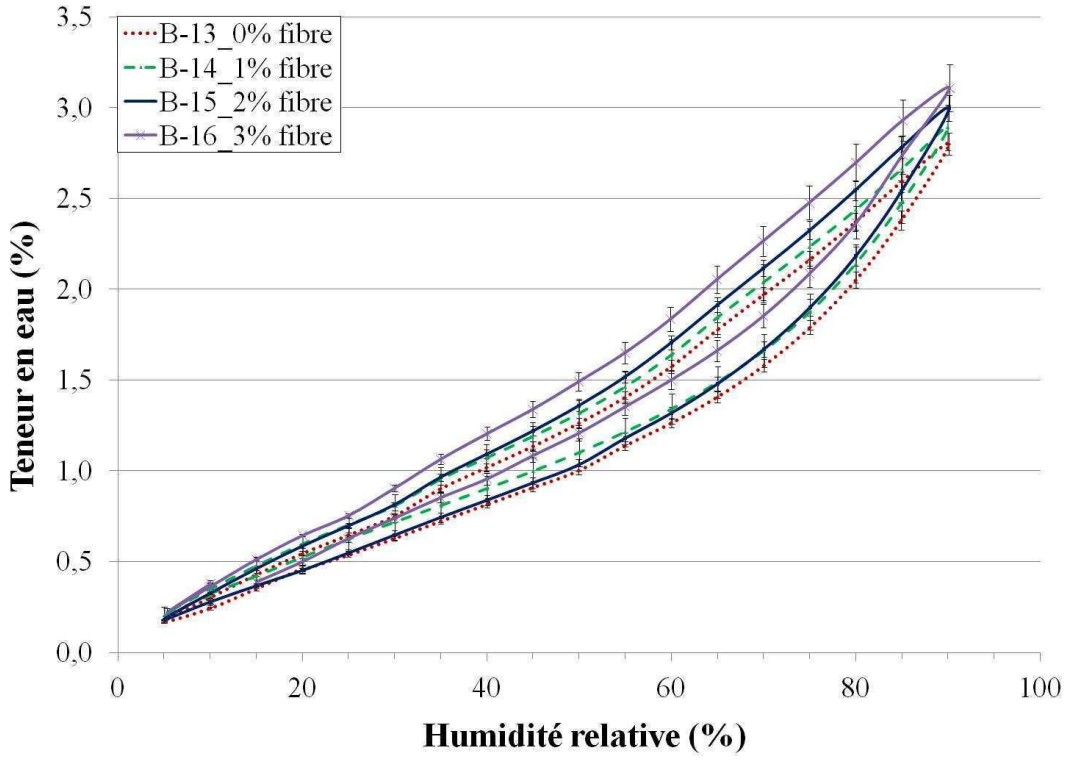



Figure IV-17 : Isotherme de sorption/désorption de différentes formulations du mélange B

Les résultats pour les mélanges A et B sans fibre montrent que la teneur en eau du mélange A varie entre 0,2 et 3,7 % et que celle du mélange B varie entre 0,2 et 2,8 %. Le mélange B possède donc une capacité hygroscopique plus faible que le mélange A. Cette différence est probablement dû à l'activité argileuse qui est plus importante pour le mélange A. En effet, étant donné que l'activité argileuse est proportionnelle à la surface spécifique, une surface spécifique plus importante signifie une adsorption plus importante des molécules d'eau.

Ces résultats montrent également que l'augmentation de la teneur en fibres améliore la capacité hygroscopique du matériau. Les valeurs obtenues pour HR = 90 % montrent que, dans le cas du mélange A, l'augmentation de teneur en eau par rapport au mélange sans fibres est de 3,5 ; 7,5 et 9,9 % pour des ajouts de 1, 2 et 3 % de fibre et que, dans le cas du mélange B, l'augmentation est de 3,2 ; 7,1 et 11,1 %. Ces valeurs augmentent de manière quasi-linéaire en fonction de la teneur en fibre. Cette phénomène peut s'expliquer par la capacité de sorption/désorption plus importante des fibres de paille par rapport celle des mélange A et B (Figure IV-18). Il serait donc possible d'évaluer l'augmentation de teneur en eau à l'équilibre dû à l'introduction de fibres si les courbes de sorption/désorption de la fibre et du sol ont été déterminées.

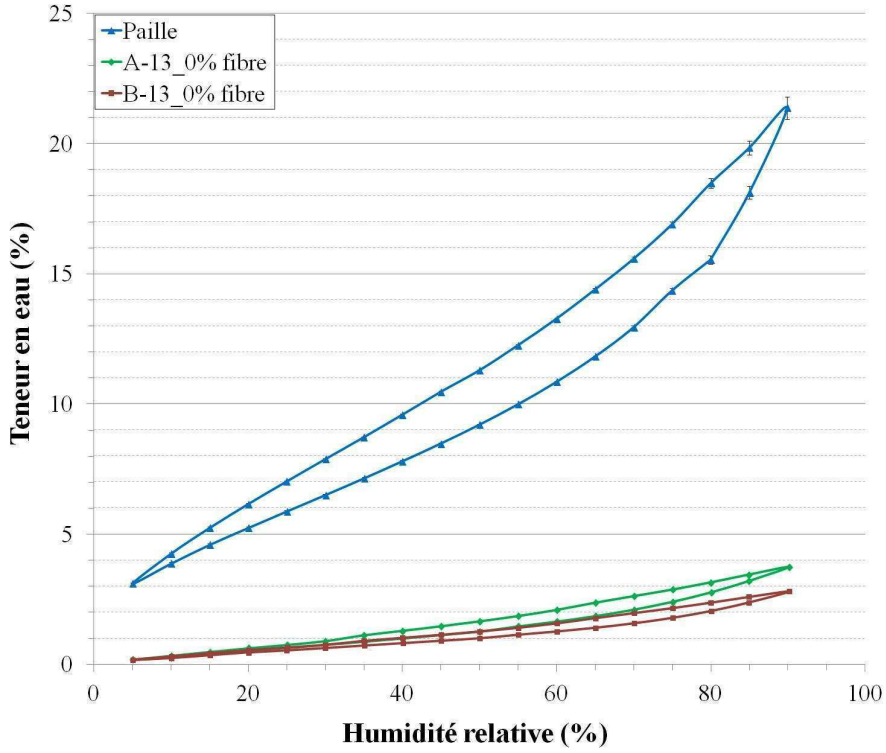



Figure IV-18 : Isotherme de sorption/désorption de la paille et des mélanges A, B sans fibre

La détermination des courbes de sorption/désorption peut permettre d'évaluer l'influence du changement d'hygrométrie ambiante sur les caractéristiques du matériau. En effet, dans le paragraphe IV.1, la conductivité thermique a été déterminée pour différentes teneurs en eau pour différentes formulations des mélanges A et B. L'influence de la variation d'humidité relative sur la conductivité thermique a donc été déterminée et est présentée dans les Tableau IV-2 et Tableau IV-3 pour une baisse de HR de 90 à 50 %. Ces résultats permet d'observer que cette évolution d'humidité relative entraine une diminution d'environ 20 à 30 % de la conductivité thermique pour les mélanges A et d'environ 10 à 22 % pour les mélanges B. La différence observée entre les mélanges A et B semble provenir de nouveau de la différence d'activité argileuse entre ces deux mélanges. En effet, une diminution de l'activité argileuse est la conséquence d'une surface spécifique plus faible et entraine donc des variations de teneurs en eau moins importantes. Etant donné que la conductivité varie avec la teneur en eau, une variation de la teneur en eau plus faible entraine une variation de la conductivité thermique plus faible. Il est également à noter que la variation relative de conductivité thermique entre 90 et 50 % HR est plus importante pour les matériaux fibré que ceux non-fibrés. Cela est dû au fait que la variation de teneur en eau est similaire pour les différentes formulations de chaque mélange et que la conductivité thermique diminue lorsque la quantité de fibres augmente.

Tableau IV-2 : Variation de la conductivité thermique due au changement de HR des formulations des mélanges A

| Formulation | | HR (%) | | Variation | Variation relative (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 90 | 50 | | |
| A-13_0% fibre | W (%) | 3,7 | 1,7 | 2,0 | / |
| | λ | 1,969 | 1,568 | 0,401 | 20,4 |
| A-14_1% fibre | W (%) | 3,9 | 1,7 | 2,2 | / |
| | λ | 1,461 | 1,041 | 0,420 | 28,7 |
| A-15_2% fibre | W (%) | 4,0 | 1,9 | 2,1 | / |
| | λ | 1,038 | 0,785 | 0,253 | 24,4 |
| A-16_3% fibre | W (%) | 4,1 | 2,0 | 2,1 | / |
| | λ | 0,959 | 0,707 | 0,252 | 26,3 |

Tableau IV-3 : Variation de la conductivité thermique dû au changement de HR des formulations des mélanges B

| Formulation | | HR (%) | | Variation | Variation relative (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 90 | 50 | | |
| B-13_0% fibre | W (%) | 2,8 | 1,3 | 1,5 | / |
| | λ | 2,220 | 1,933 | 0,287 | 12,9 |
| B-14_1% fibre | W (%) | 2,9 | 1,3 | 1,6 | / |
| | λ | 1,529 | 1,269 | 0,260 | 16,9 |
| B-15_2% fibre | W (%) | 3,0 | 1,4 | 1,6 | / |
| | λ | 1,277 | 1,025 | 0,252 | 19,7 |
| B-16_3% fibre | W (%) | 3,1 | 1,5 | 1,6 | / |
| | λ | 0,789 | 0,616 | 0,173 | 21,9 |

## IV.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

Comme présenté dans le paragraphe II.3.3.2, l'essai de perméabilité consiste au suivi de perte de masse d'un échantillon placé sous un gradient de vapeur. Les résultats des essais de perméabilité à la vapeur d'eau sont présentés dans les Figure IV-19 et Figure IV-20 pour différentes formulations des mélanges A et B (formulation 13→16). Dans un premier temps, il est observé un régime transitoire du flux de vapeur où l'eau contenue au départ dans l'échantillon migre vers atmosphère à une humidité relative de 9 %. Puis, un régime permanent

de flux de vapeur se met en place où l'échantillon absorbe la vapeur d'eau de l'ambiance à 90 % HR sur la face inférieure et la rejette vers la face supérieure à l'ambiance de 9 % HR.

En régime permanent, la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux (δ) est calculée à l'aide de l'Eq. II-10 ainsi que le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) est déterminé par l'Eq. II-11. Les résultats obtenus sont présentées dans le Tableau IV-4.

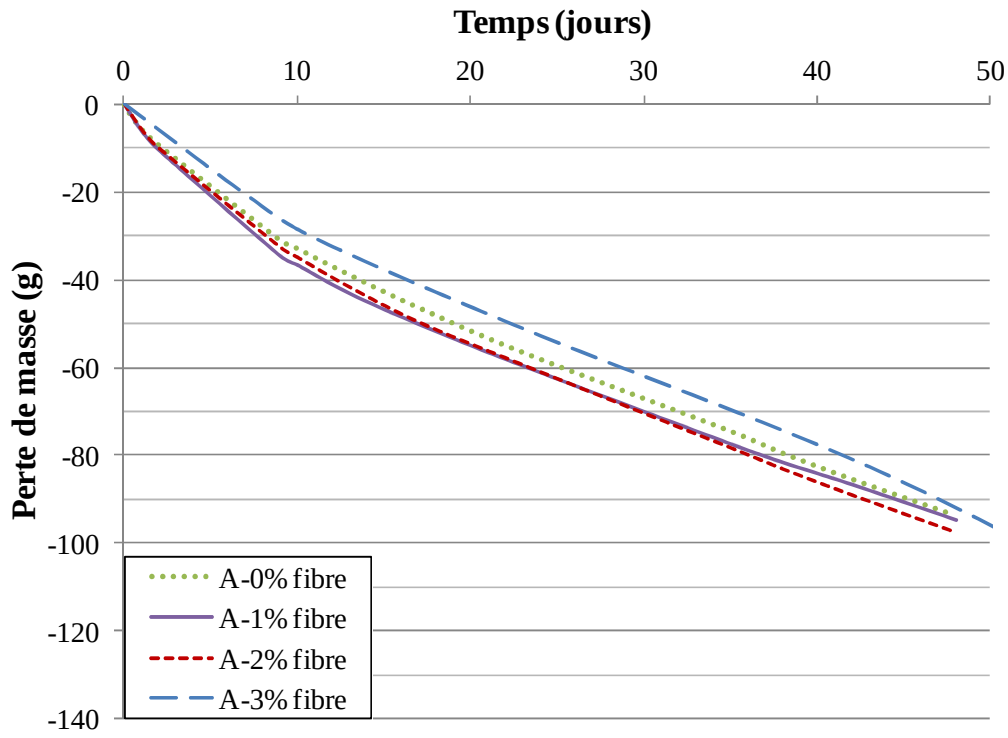



Figure IV-19 : Variation de masse au cours du temps des différentes formulations du mélange A

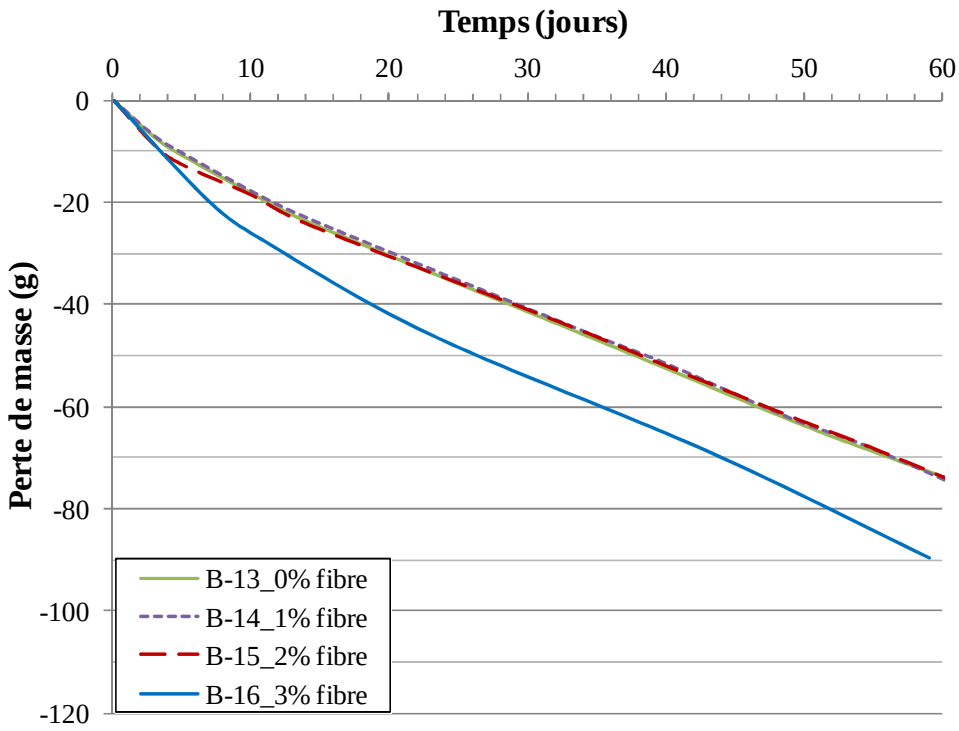



Figure IV-20 : Variation de masse au cours du temps des différentes formulations du mélange B

Tableau IV-4 : Perméabilité et facteur de la résistance à la vapeur d'eau pour les différentes formulations de bauge

| Formulation | $\delta$ ($kg.m^{-1}.s^{-1}.Pa^{-1}$) | $\mu$ |
|---|---|---|
| A-13_0% fibre | $2,36.10^{-11}$ | 8,04 |
| A-14_1% fibre | $2,41.\ 10^{-11}$ | 7,88 |
| A-15_2% fibre | $2,50.\ 10^{-11}$ | 7,59 |
| A-16_3% fibre | $2,71.\ 10^{-11}$ | 7,01 |
| B-13_0% fibre | $1,90.\ 10^{-11}$ | 9,98 |
| B-14_1% fibre | $1,91.\ 10^{-11}$ | 9,94 |
| B-15_2% fibre | $1,92.\ 10^{-11}$ | 9,92 |
| B-16_3% fibre | $2,05.\ 10^{-11}$ | 9,25 |

Les résultats montrent que la perméabilité augmente lorsque la teneur en fibre augmente. Cela peut être dû à la diminution de la densité qui engendre une porosité plus importante du matériau et donc une perméabilité plus importante ainsi qu'à la capacité des fibres à transporter les particules d'eau. Il est intéressant de noter qu'entre un ajout de 2 ou de 3 % de fibre, un

écart important est observé. Cet écart semble être dû à la faible homogénéité du matériau à 3% de fibre étant donné qu'à cette teneur le volume de paille est plus important que celui du sol Figure IV-21. Les résultats montrent également que les formulations de bauge à base du mélange B possèdent une perméabilité à la vapeur plus faible que celles à base du mélange A. La densité plus importante du mélange B par rapport au mélange A semble être à l'origine de cette différence de perméabilité à la vapeur d'eau.

Figure IV-21 : Mélange terre-paille à l'état humide

En comparant avec la résistance à la vapeur d'eau de la terre cuite dans la réglementation thermique 2005 (Simons et al., 2015; Th-U, 2005), les résultats obtenus pour la bauge sont comparables. Avec une densité entre 1000 et 2400 $kg.m^{-3}$, le facteur de résistance à la vapeur d'eau $\mu$ de la terre cuite est de 10 à l'état sec et de 16 à l'état humide.

## IV.5. Conclusions

Au cours de ce chapitre, le lien entre l'évolution de la conductivité thermique et le retrait en fonction de la teneur en eau a été démontré. Les résultats ont montré que, d'un point de vue général, l'incorporation de paille diminue significativement le retrait et la conductivité thermique de la bauge. De plus, l'activité argileuse, jouant également sur le retrait, est un paramètre à prendre en compte pour l'évolution de la conductivité thermique.

Ensuite, le comportement hygroscopique des fibres ainsi que de la bauge a été déterminé. Il a été montré que la connaissance des caractéristiques des fibres et du sol permet de

déterminer le comportement de la bauge et permet donc d'évaluer simplement l'apport du type de fibre et de la quantité ajoutée sur le sol utilisé. La connaissance des caractéristiques des fibres et du sol permet de déterminer le comportement.

La connaissance du comportement hygroscopique de la bauge permet également d'évaluer la variation des caractéristiques thermiques du matériau. Il a été montré que ces caractéristiques pouvaient varier entre 10 et 30 % pour une diminution d'humidité relative de 90 à 50 %. Ces données pourraient être prises en compte dans les modèles de calculs de flux de chaleur afin de mieux rendre compte de l'évolution du matériau durant son utilisation.

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

L'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit a été réalisé au sein des laboratoires de recherche de l'ESITC Caen. L'objectif de ce travail de thèse consistait à étudier le comportement physico-mécanique et hygrothermique de la bauge qui est une méthode de construction en terre crue présente dans l'ouest de la France. Les connaissances concernant la bauge nécessitent d'être approfondies afin de mieux comprendre ce matériau pour aider au développement de cette technique de construction. Plusieurs travaux ont donc été menés dans le cadre de cette thèse :

- Etude de l'influence de différents paramètres tels que la teneur, le type de fibre ou l'activité argileuse du sol sur le comportement physico-mécanique de la bauge ;
- Caractérisation du comportement hygrothermique de la bauge et analyse de l'apport des différents matériaux utilisés.

Dans un premier temps, l'étude bibliographique a mis en évidence l'intérêt de l'ajout de fibres pour la construction en terre. Tout d'abord, l'incorporation des fibres accélère le séchage grâce aux canaux des fibres vers l'extérieur, diminue le retrait, permet une répartition des fissures et diminue la conductivité thermique de par la porosité des fibres. L'ajout de fibre confère également au matériau terre un comportement de type « ductile » qui permet de maintenir une certaine cohésion post-rupture. Cependant, le rôle des fibres sur la résistance mécanique n'est pas déterminé clairement étant donné les contradictions observées lors d'études précédentes. De plus, le comportement hygroscopique de la bauge est dépendant des micro et macroporosités qui joueront sur la capacité de sorption/désorption et la perméabilité à la vapeur d'eau.

Pour effectuer cette étude, trois sols ont été sélectionnés parmi six sols provenant de Normandie. Le choix des sols a été effectué à partir de leur granulométrie et activité argileuse. A partir de ces trois sols, deux mélanges ont été effectués afin de se conformer à la courbe granulométrique usuelle de la bauge. Ces deux mélanges de sols (A et B) possèdent une granulométrie semblable et se différencie par leur activité argileuse qui est plus importante pour le mélange A. Deux fibres ont été également sélectionnées de par leur disponibilité locale et leur utilisation usuelle pour la bauge : la paille de blé (appelée ici paille) et la paille de lin (appelée ici lin). Les essais de caractérisation de ces fibres révèlent :

- une masse volumique absolue de 1,182 $g.cm^{-3}$ pour la paille et de 1,337 $g.cm^{-3}$ pour le lin ;
- une très forte sensibilité à l'eau, avec une absorption très rapide et très élevée (jusqu'à 309 % pour la paille et 185 % pour le lin).

- des propriétés mécaniques intéressantes avec une contrainte à la rupture de 28,83 MPa pour la paille et de 111,57 MPa pour le lin.

Etant donné les caractéristiques des fibres (lin et paille), l'incorporation de celles-ci dans la matrice de sol modifiera la structure, la cohésion de la matrice, les propriétés physico-mécanique, le retrait et le comportement hygrothermique. Afin d'étudier ces modifications, de nombreux paramètres ont été étudiés tels que la longueur et la teneur en fibre, le type de fibre, le type d'échantillon, la taille d'échantillon et la teneur en eau initiale ($W_{OPN}$, $W_{INT}$ et $W_{BAU}$).

L'incorporation de fibres permet d'obtenir une cinétique de séchage plus élevée de par le transport d'eau facilité de l'intérieur vers l'extérieur de l'échantillon à travers les fibres. De plus, la cinétique de séchage semble également dépendante de l'activité argileuse du sol utilisé. Cela peut-être dû au fait que la succion soit fonction de l'activité argileuse.

Il a été montré également que l'incorporation de fibres permet d'améliorer la ductilité et la ténacité du matériau. En effet, le sol sans fibre montre un comportement fragile alors, qu'avec fibres, le comportement est ductile. Cela peut être dû à la liaison terre-fibre qui engendre une quantité nécessaire d'énergie rupture plus importante. Les performances mécaniques supérieures obtenues par l'utilisation du lin par rapport à la paille peuvent être dues de par sa résistance en traction quatre fois supérieure et son module d'élasticité trois fois supérieur. Il semble donc que la connaissance des caractéristiques mécaniques de la fibre utilisée permet de jauger l'apport de la fibre au mélange de sol.

Dans la bibliographie, selon l'étude choisie, la résistance en compression de la bauge diminue ou augmente avec le taux de fibres. Il a été choisi ici d'étudier l'influence du sens de compactage sur la résistance en compression du matériau. Les résultats montrent que, lorsque la compression est effectuée dans le sens du compactage, la résistance en compression augmente et le contraire est observé lorsque la sollicitation est effectuée dans le sens perpendiculaire au compactage. Cela peut s'expliquer par le fait que, lors du compactage, les fibres s'aplanissent dans le sens du compactage et augmentent ainsi la surface de contact avec le sol lorsqu'il est sollicité dans cette direction. S'il est sollicité dans une direction différente à celle du compactage, la compression va déformer les fibres, ce qui va engendrer des défauts supplémentaire et, ainsi, fragiliser le matériau.

Concernant la conductivité thermique, il a été montré que le retrait était un paramètre important. En effet, lors du séchage, le retrait engendre une augmentation de la densité sèche du matériau, ce qui a pour effet d'augmenter la conductivité thermique. Ce retrait va être influencé par la teneur en fibre ainsi que l'activité argileuse de la bauge. En effet, plus la quantité de fibre est importante, plus le retrait mesuré est faible. Cela peut être dû au volume des fibres qui évolue peu avec la teneur en eau et empêche donc le rapprochement des grains de sol. De plus, l'activité argileuse caractérise la capacité des argiles du sol à absorber l'eau. Il est donc logique

que, lorsque l'activité argileuse augmente, le retrait augmente également. De plus, il a été montré que l'incorporation de fibre engendre une diminution de la conductivité thermique de par la diminution de la densité du matériau et la faible conductivité de la paille.

Etant donné que la bauge est un matériau poreux, les courbes de sorption/désorption montrent trois zones distinctes (HR<10%, 10%<HR<50%, HR>50%) comme dans le cas des fibres. Le phénomène hystérésis a été remarqué pour toutes les formulations et les fibres. L'ajout de fibres au sol permet à la bauge de posséder une capacité hygroscopique supérieure au sol. Cela est dû à la capacité de stockage des fibres démontré par l'essai d'absorption d'eau. De même, l'activité argileuse joue un rôle important étant donné que cela caractérise la capacité des argiles du sol à absorber l'eau. De plus, à partir de la courbe de sorption/désorption, il est possible de déterminer la variation de la conductivité thermique de la bauge au cours de sa vie. La perméabilité à la vapeur d'eau a également été déterminée. Les résultats ont montré que l'incorporation des fibres augmentait la perméabilité à la vapeur d'eau. Cela est dû à la porosité supplémentaire introduite par les fibres qui est proportionnelle à la teneur ajoutée.

Afin de mieux comprendre le comportement hygrothermique de la bauge, la liste ci‑dessous permet de mettre en lumière une série de propositions pour de futures recherches qui serviront comme approfondissement et complément aux essais menés durant cette thèse :

- D'approfondir les essais réalisés dans cette étude :
  - Etudier le comportement mécanique de la bauge à long terme pour évaluer la dégradation des fibres au cours du temps,
  - Caractériser thermiquement la bauge à différentes températures,
  - Continuer les mesures isothermes sorption/désorption à différentes températures,
  - Compléter les essais de perméabilité à la vapeur d'eau avec d'autres couples d'humidité relatives,
- De compléter les essais réalisés dans cette étude :
  - Mesurer la diffusivité thermique de la bauge,
  - Une observation adaptée de l'interface fibres/matrice par microscopie électronique à balayage intéressante pour mieux comprendre l'influence de l'absorption d'eau des fibres sur la liaison terre-fibre,

Pour une connaissance plus complète de ces matériaux, il serait également intéressant d'étudier la durabilité de la bauge sous l'influence des cycles de dessiccation-imbibition ainsi que l'érosion sous l'effet de ces cycles.

Il serait intéressant d'étudier le comportement hygrothermique de la bauge à l'échelle 1 sur un mur taille réelle ou sur une maison en bauge (capacité de régulation de l'humidité relative, le confort thermique, la consommation d'énergie, etc.) afin de démontrer

scientifiquement les bénéfices de la bauge. Il sera également intéressant d'étudier la capacité d'isolation acoustique de la bauge.

Enfin, tous ces paramètres peuvent, bien sûr, servir à alimenter des modèles de transfert hydrique et thermique dans les matériaux. Pour la suite, en utilisant les modèles de simulation du comportement hygrothermique à l'échelle de la paroi (en 2D ou 3D), il sera très intéressant de modéliser et évaluer le comportement de la bauge.

# REFERENCES

Abtahi, M., N. Okhovat, R. Pourhosseini, et S. M. Hejazi. (2010). Improvement of soil strength by natural fibers. Présenté à Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovak Republic.

Abtahi, S. M., M. Sheikhzadeh, et S. M. Hejazi. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. *Construction and Building Materials 24*, 871‑877.

Achenza, M. et L. Fenu. (2007). On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction. *Materials and Structures 39*, 21‑27.

Addison Greer, M. J. (1996). *The Effect of Moisture Content and Composition on the Compressive Strength and Rigidity of Cob Made from Soil of the Breccia Measures Near Teignmouth*. Plymouth School of Architecture, Devon.

Agarwal, A. (1981). *Bâtir en terre:le potentiel des matériaux a base de terre pour l'habitat du tiers monde*. Institut international de l'environnement et du développement: London:Earthscan.

Ahmad, F., F. Bateni, et M. Azmi. (2010). Performance evaluation of silty sand reinforced with fibers. *Geotext Geomembr 28*, 93‑99.

Akbulut, S., S. Arasan, et E. Kalkan. (2007). Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *Applied Clay Science 38*, 23‑32.

Akinkurolere, O. ., Cangru Jiang, A.T. Oyediran, O.I. Dele-Salawu, et A.K. Elensinnla. (2006). Engineering Properties of Cob as a Building Material. *Journal of Applied Sciences 6*, 1882‑1885.

Akinwumi, I., P. O. Awoyera, et O. O. Bello. (2015). Indigenous earth building construction technology in Ota, Nigeria. *Indian Journal of Traditional Knowledge 14*, 206‑212.

Al Rim, K., A. Ledhem, O. Douzane, R. M. Dheilly, et M. Queneudec. (1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement and Concrete Composites 21*, 269‑276.

Alix, S. (2006). *Coupe transversale de lin*. Université de Rouen.

Amziane, S., F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, et M. Sonebi. (2017). 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*.

AsTerre. (s. d.). La technique du torchis. *http://www.asterre.org/construire-en-terre*.

ASTM B923. Standard Test Method for Metal Powder Skeletal Density by Helium or Nitrogen Pycnometry (2016).

ASTM C39M - 03. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (2003).

ASTM D5334. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, Pub. L. No. ASTM D5334-08 (2008).

Avrami, E., H. Guillaud, et M. Hardy. (2008). *Terra Literature Review; An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*, The Getty Conservation Institute. Los Angeles.

Aymerich, F., L. Fenu, et P. Meloni. (2012). Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials 27*, 66‑72.

Baker, S. . (1997). The reinforcement of turfgrass areas using plastics and other synthetic materials: a review, Vol. 8, p. pp.3-13. Présenté à 8th International Turfgrass Research Conference, Sydney, Australia.

Baley, C. (2005). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'ingénieur AM6 (AM5130)* 1‑12.

Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials*, 2nd ed. Oxford: Architectural Press.

Binici, H., O. Aksogan, M. Nuri Bodur, E. Akca, et S. Kapur. (2007). Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials. *Constr Build Mater* 21:901–6.

Binici, H., O. Aksogan, et T. Shah. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials 19*, 313‑318.

Böttger, H. M. et M. S. Rizza. (2013). Effect of Straw Length and Quantity on Mechanical Properties of Cob. University of San Francisco.

Bouflet, J. H. et J. Jacoutot. (1982). Architecture de terre en Mayenne 28.

Bouhicha, M., F. Aouissi, et S. Kenai. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites 27*, 617‑621.

Calame, F. (1985). *Eléments d'un cahier des charges pour la réalisation d'un torchis moderne*.

Campbell, G. S. et J. M. Norman. (1998). *Introduction to Environmental Biophysics*. New York: Springer.

Carfrae, J. (2011). *The Moisture performance of Straw Bale Construction in a Temperate Maritime Climate* (Thèse de doctorat). University of Plymouth, UK.

Clark, D. (2013). Earth as a Contemporary Building Material.

Collet-Foucault, F. (2004). *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux à faibles impacts environnementaux* (Thèse doctorat. Spécialité Génie Civil). INSA Rennes, INSA Rennes.

Conventry, K. (2004, juillet). *Specification development for the use of devon cob in earthen construction* (Thèse de doctorat). University of Plymouth.

Costi de Castrillo, M., M. Philokyprou, et I. Ioannou. (2017). Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports 12*, 437‑448.

Coventry, K. A. (2004). *Specification Development for the Use of Devon Cob in Earthen Construction* (Thèse de doctorat). University of Plymouth.

Crockford, W. W., W. P. Grogan, et D. S. Chill. (1993). Strength and Life of Stabilized Pavement Layers Containing Fibrillated Polypropylene. *Transportation Research Record* (1418), 60-66.

Dao, K., M. Ouedraogo, Y. Millogo, J.-E. Aubert, et M. Gomina. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials 158*, 84‑96.

Delage, P. et Y.-J. Cui. (2000, novembre 10). L'eau dans les sols non saturés. *Techniques de l'ingénieur*.

Dewulf, M. (2015). *Le torchis, mode d'emploi*, Eyrolles.

Fenard, S., D. Thuret, et J. Loret. (1984). Une technique de construction : le pisé par levée. *Bull. Rég. Tiez Breiz Maison Paysannes Betagne 4*, 23‑24.

François, B., L. Palazon, et P. Gerard. (2017). Structural behaviour of unstabilized rammed earth constructions submitted to hygroscopic conditions. *Construction and Building Materials 155*, 164‑175.

Fuzek, J. F. (1985). Absorption and desorption of water by some common fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development 24*, 140‑144.

Galán-Marín, C., C. Rivera-Gómez, et J. Petric. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials 24*, 1462‑1468.

Ghavami, K., R. D. Toledo Filho, et N. P. Barbosa. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites 21*, 39‑48.

Gourlay, E., P. Glé, S. Marceau, C. Foy, et S. Moscardelli. (2017). Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials 139*, 513‑523.

Gregory, H. et S. Chill. (1998). Stabilization of earth slope with fiber reinforcement. Présenté à 6th Int conf geosynt, Atlanta, USA.

Hall, M. et D. Allinson. (2009). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering 29*, 740‑747.

Hamard, E. (2017). *Rediscovering of vernacular adaptative construction strategies for sustainable modern building : application to cob and rammed earth* (Thèse de doctorat). L'université de Lyon.

Hamard, E., B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, et J.-C. Morel. (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment 106*, 103‑119.

Harries, R., D. Clark, et L. Watson. (2000). A rational return to earth as a contemporary building material, p. 319‑321. Présenté à 8th International conference on the study and conservation of earthen architecture, Devon (UK).

Harries, R., B. Saxton, et K. Coventry. (1995). The geological and geotechnical properties of earth material from central Devon in relation to its suitability for building in 'cob'. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 8*, 441‑444.

Hejazi, S. M., M. Sheikhzadeh, S. M. Abtahi, et A. Zadhoush. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials 30*, 100‑116.

Hibouche, A. (2013). *Sols traités aux liants. Performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques. Applications en BTP* (Thèse de doctorat). Université du Havre.

Houben, H, V. Rigasse, et P. Gamier. (1996). *Blocs de terre comprimée: Equipements de production*. Belgique: CDI ; CRATerre-EAG.

Houben, Hugo et H. Guillaud. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. London: Intermediate Technology Publ.

Houben, Hugo, H. Guillaud, M. Dayre, et I. Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Grenoble : Villefontaine). (2006). *Traité de construction en terre*. Marseille: Éd. Parenthèses.

Islam, M. S. et K. Iwashita. (2010). Earthquake Resistance of Adobe Reinforced by Low Cost Traditional Materials. *Journal of Natural Disaster Science 32*, 1‑21.

Jamellodin, Z., Z. Talib, R. Kolop, et N. Noor. (2010). The effect of oil palm fibre on strength behaviour of soil. Présenté à 3rd SANREM conf, kota kinabalu, Malaysia.

Jayasinghe, C. et N. Kamaladasa. (2007). Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. *Construction and Building Materials 21*, 1971‑1976.

Keefe, L. (2005). *Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conserrvation*. London [u.a. ]: Taylor & Francis.

Khedari, J., P. Watsanasathaporn, et J. Hirunlabh. (2005). Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites 27*, 111‑116.

Kumar, A., B. S. Walia, et J. Mohan. (2006). Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construction and Building Materials 20*, 1063‑1068.

Laurent, J.-P. (1986). *Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires optimisation d'outils de mesure « in situ » des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre* (Thèse de doctorat). I.N.P.Grenoble (Mécanique).

Le Hoang, T. (2013). *Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin* (Thèse de doctorat). ESITC Caen.

Lebas, P., C. Lacheray, C. Pontvianne, X. Savary, P. Schmit, et F. Streiff. (2007). La terre crue en Basse-Normandie, De la matière à la manière de bâtir. OREP Édition & Communication.

Ledhem, A., R. . Dheilly, M. . Benmalek, et M. Quéneudec. (2000). Properties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste. *Construction and Building Materials 14*, 341‑350.

Lin, H., S. Zheng, S. D. N. Lourenço, et P. Jaquin. (2017). Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth. *Engineering Geology 228*, 137‑145.

Little, B. et T. Morton. (2001). *Building with earth in Scotland: innovative design and sustainability*. Scottish Executive Central Research Unit.

Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agroressources* (Thèse de doctorat). Université Toulouse III.

Maher, M. . et D. . Gray. (1990). Static Response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE 116 (11)* 1661–1677.

McCann, J. (2004). *Clay and Cob Buildings*. Oxford: Shire Publications; 2nd Revised edition edition.

Menet, J.-L. et C. Gruescu. (2014). *L'éco-conception dans le bâtiment en 37 fiches-outils*. Paris: Dunod.

Merouani, L. (1987, novembre). *Phénomène de sorption et de transfert d'humidité dans les bâtiments. Etude expérimentale comparative d'un mortier de ciment et d'un enduit de façade* (Thèse de doctorat). Institut national polytechnique de Grenoble.

Miccoli, L., U. Müller, et P. Fontana. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials 61*, 327‑339.

Miller, C. J. et S. Rifai. (2004). Fiber Reinforcement for Waste Containment Soil Liners. *Journal of Environmental Engineering 130*, 891‑895.

Minke, G. (2000). *Earth Construction Handbook: The Building Material Earth in Modern Architecture*. Southhampton [UK]: WIT Press.

Minke, G. (2006). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, 1. ed. Basel: Birkhäuser.

Mishra, S., A. K. Mohanty, L. T. Drzal, M. Misra, et G. Hinrichsen. (2004). A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering 289*, 955‑974.

Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, 2. ed. New York, NY: Wiley.

NF EN 12390-5. Testing hardened concrete - Part 5: flexural strength of test specimens, Norme européenne (2012).

NF EN ISO 12571. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique (2013).

NF EN ISO 12572. Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau — Méthode de la coupelle (2016).

NF P11-300. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières (1992).

NF P94-051. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau (1993).

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 tache (1998).

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

Novotný, M. (2014). A Late Reverberation of Antiquity in Vernacular Architecture of Moravia. *International Journal of Historical Archaeology 18*, 629‑642.

Okubayashi, S., U. Griesser, et T. Bechtold. (2004). A kinetic study of moisture sorption and desorption on lyocell fibers. *Carbohydrate Polymers 58*, 293‑299.

Ola, S. A. (1989). Stabilization of lateritic soils by extensible fibre reinforcement. *Engineering Geology 26*, 125‑140.

Page, J. (2017, décembre). *Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée* (Thèse de doctorat). Caen.

Page, J., M. Sonebi, et S. Amziane. (2017). Design and multi-physical properties of a new hybrid hemp-flax composite material. *Construction and Building Materials 139*, 502‑512.

Papika, P. (2010). *Compression behaviour or earth constructioon techniques: the case of cob* (Thèse de doctorat). Heriot-Watt University.

Paulus, J. (2015). *Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales-Application à un cas pratique : Ouagadougou*. Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées.

Peirce, F. T. (1929). A two-phase theory of the absorption of water vapour by cotton cellulose. *Journal of the Textile Institute Transactions 20*, T133‑T150.

Petitjean, M. (2003). Construction en terre en Ille-et-Vilaine au XIXème siècle. *Echanges Transdiscipl. Sur Les Constr. En Terre Crue 1, Edition de l'espérou, Montpellier* 331‑338.

Piattoni, Q., E. Quagliarini, et S. Lenci. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials 25*, 2067‑2075.

Prabakar, J. et R. . Sridhar. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials 16*, 123‑131.

Pullen, Q. M. et T. V. Scholz. (2011). Index and Engineering Properties of Oregon Cob. *Journal of Green Building 6*, 88‑106.

Quagliarini, E. et S. Lenci. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage 11*, 309‑314.

Quagliarini, E., A. Stazi, E. Pasqualini, et E. Fratalocchi. (2010). Cob Construction in Italy: Some Lessons from the Past. *Sustainability 2*, 3291‑3308.

Quenard, D. (1989). *Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques : approches du type percolation et expérimentation* (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Toulouse.

Raj S, S., A. K. Sharma, et A. K.B. (2018). Performance Appraisal of Coal ash Stabilized Rammed Earth. *Journal of Building Engineering*.

Reeves, G. ., I. Sims, et J. . Cripps. (2006). Earthen architecture. In *Clay Materials Used in Construction*, Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications., Vol. 21, p. 387‑400.

Röhlen, U., C. Ziegert, et A. Mochel. (2013). *Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions*. Paris: Éd. "Le Moniteur.

Rowell M, Han S, et Rowell S. (2000). Characterization and factors effecting fiber properties. *Natural Polymers and Agrofibers Composites* 115‑34.

Saxton, R. H. (1995). The performance of cob as a building material. *The Structural Engineer 73*, 111‑115.

Sedan, D. (2007). *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite* (Thèse de doctorat). Université de Limoges.

Simons, A., A. Laborel-Préneron, A. Bertron, J. E. Aubert, C. Magniont, C. Roux, et C. Roques. (2015). Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings: characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties. *Matériaux & Techniques 103*, 206.

Suresh, A. et K. B. Anand. (2017). Strength and Durability of Rammed Earth for Walling. *Journal of Architectural Engineering 23*, 06017004.

Sutton, A., D. Black, P. Walker, et Building Research Establishment. (2011). *Straw Bale: An Introduction to Low-Impact Building Materials*. Watford: IHS BRE Press.

Tang, A.-M. (2005). *Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement*, p. 201.

Tang, C.-S., B. Shi, et L.-Z. Zhao. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes 28*, 54‑62.

Th-U. Règles Th-U : Matériaux (fascicule 2/5), Détermination des caractéristiques thermiques « utiles » des matériaux (2005).

Tolêdo Filho, R. D., K. Scrivener, G. L. England, et K. Ghavami. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites 22*, 127‑143.

Touré, P. M., V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilinon. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering 13*, 266‑271.

Veas, L. (2006). *Development and application of a methodological model that allow evaluate and compare the behavior of external walls exposed tomoisture phenomenons.* (Thèse de doctorat). Université catholique de Louvain.

Watson, L. et K. McCabe. (2011). The cob building technique. Past, present and future. *Informes de la Construcción 63*, 59‑70.

Weismann, A. et K. Bryce. (2010). *Construire en terre facilement - La technique du cob*. La Plage.

Worris, W. (1992). The Cob Buildings of Devon 1-History, Building Methods and Conservation. *Historic Building Trust*. London (UK).

XP P94-041. Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide (1995).

Yetgin, Ş., Ö. çAvdar, et A. Çavdar. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials 22*, 222‑227.

Yetimoglu, T. et O. Salbas. (2003). A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes 21*, 103‑110.

Zhang, L., L. Yang, B. P. Jelle, Y. Wang, et A. Gustavsen. (2018). Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Construction and Building Materials 162*, 576‑583.

Ziegert, C. (2003). *Lehmwellerbau – Konstruktion, Schäden und Sanierung, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau* (Thèse de doctorat). Technical University of Berlin, Berlin (Germany).

# LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques (Magniont, 2010) .....9
Figure I-2 : Construction en pisé (Sources Internet).....11
Figure I-3 : Construction en torchis (Sources Internet) .....13
Figure I-4 : Construction en adobe (Sources Internet).....14
Figure I-5 : Construction en BTC (Sources Internet) .....14
Figure I-6 : Construction en bauge (Sources Internet).....15
Figure I-7 : Courbe granulométrique recommandé par (Clark, 2013).....19
Figure I-8 : Courbes granulométriques de la terre des anciennes maisons.....20
Figure I-9 : Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines (Baley, 2005)21
Figure I-10 : La noix de coco (a) et les fibres de coco (b) (Sources Internet).....22
Figure I-11 : Les plantes de sisal (a) et les fibres de sial (b) (Sources Internet).....23
Figure I-12 : La plante de palmier (a) et la fibre de palmier (b) (Sources Internet) .....23
Figure I-13 : Les plantes de jute (Sources Internet).....24
Figure I-14 : La paille d'orge (Sources Internet) .....25
Figure I-15 : Mise en œuvre d'un mur en bauge .....27
Figure I-16 : Mise en œuvre de la bauge avec la méthode « rapide » (Sources Internet).....29
Figure I-17 : Empilement de blocs de bauge préfabriqués (Festival Grains d' Isère) .....29
Figure I-18 : Cinétique de séchage des échantillons cylindriques Ø150xH300 mm (Saxton, 1995) .....31
Figure I-19 : Cinétique de séchage de la bauge aux différentes teneurs en fibre .....31
Figure I-20 : La bauge avec et sans fibre à l'état frais et à l'état sec (Addison Greer, 1996) .....32
Figure I-21 : La surface de la bauge renforcée par les fibres et sans fibre à l'état sec (Addison Greer, 1996) .....33
Figure I-22 : Le retrait en fonction de la teneur en eau initial et de la teneur en fibres (Saxton, 1995).....33
Figure I-23 : Variation du retrait en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005).34
Figure I-24 : Variation du retrait en fonction de la longueur de fibre (Bouhicha et al., 2005) .....35

Figure I-25 : Variation du retrait volumique en fonction du type de terre et de la teneur en fibres (Bouhicha et al., 2005) ..... 35

Figure I-26 : Variation du retrait volumique en fonction de l'équivalent sable (Pullen et Scholz, 2011) ..... 36

Figure I-27 : Courbe contrainte-déformation de la bauge, du pisé et de brique de terre (Miccoli et al., 2014) ..... 38

Figure I-28 : Courbe contrainte-déformation de la bauge à différentes formulations (Böttger et Rizza, 2013) ..... 38

Figure I-29 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau (Saxton, 1995) ..... 39

Figure I-30 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en eau (Akinkurolere et al., 2006) ..... 40

Figure I-31 : Variation de la résistance en compression en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005) ..... 41

Figure I-32 : Relation entre teneur en paille et la densité sèche (tonne.m$^{-3}$) (Laurent, 1986) ..... 41

Figure I-33 : Variation de la résistance en compression en fonction de l'équivalent sable (Pullen et Scholz, 2011) ..... 42

Figure I-34 : Résistance en flexion en fonction de la teneur en fibre (Bouhicha et al., 2005) ..... 44

Figure I-35 : Variation de la résistance en flexion en fonction de la résistance en traction des fibres (Pullen et Scholz, 2011) ..... 44

Figure I-36 : Flux de chaleur à travers un élément prismatique de sol ..... 45

Figure I-37 : Relation teneur en paille/densité sèche (tonne.m$^{-3}$) correspondante (Laurent, 1986) ..... 47

Figure I-38 : Variation de la conductivités thermique (W.m$^{-1}$.K$^{-1}$) en fonction de la densité sèche (tonne.m$^{-3}$) (Laurent, 1986) ..... 47

Figure I-39 : Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet-Foucault, 2004) ..... 50

Figure I-40 : Phases de remplissage d'un pore - condensation capillaire (Collet-Foucault, 2004) ..... 50

Figure I-41 : Relation entre teneur en eau d'un matériau et humidité relative d'après (Veas, 2006) ..... 52

Figure I-42 : Isotherme d'adsorption désorption de la bauge – Teneurs en eau massiques moyennes et écarts-type (Collet-Foucault, 2004) .....54

Figure I-43 : Isotherme d'adsorption désorption du béton de chanvre – Teneurs en eau massiques moyennes et écarts-type (Collet-Foucault, 2004).....55

Figure II-1 : Sites de prélèvements des sols .....57

Figure II-2 : Courbes granulométriques des 6 sols .....58

Figure II-3 : Courbes Proctor des 6 sols .....60

Figure II-4 : Pycnomètre à hélium .....62

Figure II-5 : Dispositif de mesure l'absorption d'eau des fibres .....63

Figure II-6 : Cinétique d'absorption d'eau des fibres .....64

Figure II-7 : Section transversale d'une tige de lin (Alix, 2006) cité par (Magniont, 2010) 64

Figure II-8 : Taille des vides dans le bois du lin (a), partie de la section transversale de la tige de lin (b), taille des vides à l'intérieur de la paille (c) et section transversale de la paille (d) .....65

Figure II-9 : Essai de traction des fibres .....66

Figure II-10 : Fibres après rupture .....66

Figure II-11 : Courbes contrainte-déformation de la paille et du lin. .....67

Figure II-12 : Courbe granulométrique des trois sols et deux mélanges .....69

Figure II-13 : Fibres et les sols utilisés .....72

Figure II-14 : Etapes de préparation d'un mélange terre-fibre. .....72

Figure II-15 : Echantillons à $W_{OPN}$ pour l'essai de compression .....73

Figure II-16 : Etapes de fabrication des échantillons cubiques .....74

Figure II-17 : Echantillons prismatique 70x70x280 mm .....74

Figure II-18 : Essai de compression simple d'un échantillon prismatique .....76

Figure II-19: Flexion quatre points (NF EN 12390-5, 2012) .....78

Figure II-20: Dispositif d'essai pour la mesure du retrait .....79

Figure II-21: Mesure du retrait d'un échantillon .....80

Figure II-22: Résultat expérimental sur la variation de la température du thermocouple dans le temps (A.-M. Tang, 2005).....82

Figure II-23: Appareil KD2 Pro (Decagon Devices, INC) .....83

Figure II-24 : Mesure sur échantillon standard.....85

Figure II-25 : Protocole expérimental.....85

Figure II-26: Effet de la température sur les courbes sorption/désorption (Merouani, 1987) .....86
Figure II-27 : Mesure de la succion par papier-filtre.....87
Figure II-28 : Dessiccateur avec solution saline saturée.....87
Figure II-29 : Analyseur de sorption/désorption SPSx-1µ ProUmid.....88
Figure II-30 : Echantillons de bauge pour essai sorption/désorption. .....89
Figure II-31 : Echantillons de fibre et de bauge .....89
Figure II-32 : Méthode de la coupelle.....90
Figure II-33 : Installation de l'échantillon dans le bécher .....92
Figure II-34 : Système de suivre la masse des échantillons.....92
Figure III-1 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage du mélange A .....98
Figure III-2 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage du mélange B .....98
Figure III-3 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps après démoulage des échantillons cubiques .....100
Figure III-4 : Courbe contrainte-déformation du mélange A sans et avec 1 % de fibre à la $W_{OPN}$.....101
Figure III-5 : Courbe contrainte-déformation du mélange A renforcé par 1 % de fibre de paille et de lin à la $W_{OPN}$ .....102
Figure III-6 : Courbes contrainte-déformation des différentes formulations du mélange B à $W_{BAU}$ .....103
Figure III-7 : Courbe contrainte-déformation des deux mélanges à différentes teneurs en eau initiales.....104
Figure III-8 : Courbes contrainte-déformation des deux échantillons de la formulation A-14 avec un ajout de 1 % de paille sollicités dans le sens et à la perpendiculaire du compactage105
Figure III-9 : Courbes contrainte-déformation du mélange A sans fibre et avec 1 % de paille de 5 cm selon la direction ou la perpendiculaire du compactage.....105
Figure III-10 : Faciès de rupture de l'échantillon du mélange A sans fibre (a) et avec 1 % de paille de 5 cm (b - type R1 en haut et R2 en bas) .....106
Figure III-11 : Courbes contrainte-déformation des deux mélanges à 3 % de fibre dans deux directions de chargement différentes .....107
Figure III-12 : Surface de rupture après essai de flexion d'un échantillon de mélange B avec 2 % de fibre (formulation B-15) .....107

Figure III-13 : Schéma d'une coupe transversale d'un échantillon 7x7x28 cm selon les deux types de chargement .....108

Figure III-14 : Dispositif de flexion 4 points du mélange B avec ou sans fibres .....109

Figure III-15 : Courbe contrainte-déformation du mélange B avec différentes teneuses en fibre .....109

Figure III-16 : Espace entre la fibre et la terre au sein de la bauge (a) et fibre rompue sur la surface de rupture (b) .....111

Figure III-17 : Résistance en flexion des échantillons 14x14x56 cm avec différentes teneurs en fibre .....111

Figure III-18 : Surface de rupture d'un échantillon 14x14x56 cm avec 2 % de fibre .....112

Figure III-19 : Résistance en compression par rapport à la teneur en eau du mélange A, B .....113

Figure III-20 : Résistance en compression des mélanges A et B avec différentes formulations de paille.....114

Figure III-21 : Résistance en compression des mélanges A et B avec différentes formulations de lin .....115

Figure III-22 : Différents types de rupture du matériau composite en compression .....116

Figure III-23 : Rupture des fibres sous l'effet de traction dans la zone centrale des échantillons cylindriques.....116

Figure III-24 : Rupture des fibres dans la zone centrale sous l'effet de traction des échantillons cubiques à $W_{OPN}$ .....117

Figure III-25 : Résistance en compression en fonction de la teneur en fibre pour les mélanges A et B .....118

Figure III-26 : Relation entre la résistance en compression et la densité de différentes formulations .....119

Figure III-27 : Résistances en compression en fonction des densités des mélanges A .....121

Figure III-28 : Résistances en compression en fonction des densités des mélanges B.....121

Figure III-29 : Couleurs de la paille de l'échantillon cubique du mélange B fabriqué à $W_{BAU}$ .....122

Figure III-30 : Résistance en compression des échantillons du mélange B de différentes tailles en fonction de la teneur en fibre ajoutée.....123

Figure III-31 : Résistance en flexion pour différentes formulations des deux mélanges ...124

Figure III-32 : Echantillon 14x14x56 cm et dispositif de l'essai flexion quatre points .....125

Figure III-33 : Courbe contrainte de flexion en fonction de la teneur en fibre des échantillons de deux tailles différentes .....126

Figure IV-1 : La conductivité thermique en fonction de la teneur en eau avec les différentes teneurs en fibre du mélange A .....129

Figure IV-2 : La conductivité thermique en fonction de la teneur en eau avec les différentes teneurs en fibre du mélange B.....129

Figure IV-3 : Relation densité sèche/teneur en paille.....130

Figure IV-4 : Variation de la conductivité thermique par rapport à la densité sèche des deux mélanges.....131

Figure IV-5 : Retrait du mélange A au cours du temps .....131

Figure IV-6 : Retrait du mélange B au cours du temps .....132

Figure IV-7 : Conductivité thermique et retrait du mélange A en fonction de la teneur en eau .....134

Figure IV-8 : Conductivité thermique et retrait du mélange B en fonction de la teneur en eau .....134

Figure IV-9 : Variation de la teneur en eau de la paille, de l'humidité relative et de la température au cours d'un cycle sorption/désorption .....135

Figure IV-10 : Variation de la teneur en eau du lin, de l'humidité relative et de la température au cours d'un cycle sorption/désorption .....136

Figure IV-11 : Isothermes de sorption/désorption des fibres .....137

Figure IV-12 : Courbe de rétention d'eau de différentes formulations du mélange B – partie dessiccation .....139

Figure IV-13 : Courbe isotherme de désorption de différentes formulations du mélange B .....139

Figure IV-14 : Courbe de rétention d'eau de différentes formulations du mélange A – partie dessiccation .....140

Figure IV-15 : Courbe isotherme de désorption de différentes formulations du mélange A .....140

Figure IV-16 : Isotherme de sorption/désorption de différentes formulations du mélange A .....141

Figure IV-17 : Isotherme de sorption/désorption de différentes formulations du mélange B .....142

Figure IV-18 : Isotherme de sorption/désorption de la paille et des mélanges A, B sans fibre .....143

Figure IV-19 : Variation de masse au cours du temps des différentes formulations du mélange A .....145

Figure IV-20 : Variation de masse au cours du temps des différentes formulations du mélange B.....146

Figure IV-21 : Mélange terre-paille à l'état humide.....147

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Composition usuelle du sol utilisé pour la bauge ..... 17
Tableau I-2 : Variation de l'IP en fonction de la teneur en de limon/argile ..... 18
Tableau I-3 : Caractéristiques des fibres utilisées pour la bauge ..... 26
Tableau I-4 : Résistance en compression de la bauge ..... 37
Tableau I-5 : Résistance en flexion de la bauge ..... 43
Tableau I-6 : Conductivité thermique des matériaux à base de terre ..... 46
Tableau I-7 : Conductivité thermique d'un sol fibré (Minke, 2000) ..... 48
Tableau II-1 : Paramètres obtenues par les courbes granulométriques ..... 58
Tableau II-2 : Valeur au bleu de méthylène, limites d'Atterberg des 6 sols. ..... 59
Tableau II-3 : Teneur en eau l'optimum Proctor et densité sèche correspondant des 6 sols. 60
Tableau II-4 : Caractéristiques physiques des fibres ..... 61
Tableau II-5 : Caractéristiques mécaniques des fibres ..... 67
Tableau II-6 : Formulations étudiées ..... 71
Tableau II-7: Spécifications des capteurs du KD2 Pro ..... 84
Tableau II-8 : Solutions salines utilisées ..... 88
Tableau III-1 : Masse volumique apparente à $W_{OPN}$ des différentes formulations ..... 95
Tableau III-2 : Masse volumique apparente à la $W_{BAU}$ des différentes formulations ..... 95
Tableau III-3 : Masses volumiques apparentes pour différentes teneur en eau initiale ..... 96
Tableau III-4 : Vitesse de séchage des différentes formulations ..... 97
Tableau III-5 : Caractéristiques des échantillons et teneur en eau à 28j ..... 113
Tableau III-6 : Teneur en eau à la rupture des différentes formulations avec paille ..... 114
Tableau III-7 : Teneur en eau à la rupture des différentes formulations avec lin ..... 115
Tableau III-8 : Résistance en compression à la rupture de différentes formulations avec les mélanges A et B ..... 119
Tableau III-9 : Résistance en compression à 2% de déformation de différentes formulations pour les mélanges A et B ..... 120
Tableau III-10 : Résistance en compression à la rupture des échantillons cylindriques et cubiques avec 1 % de fibre de paille de 10 cm à la teneur en eau Proctor. ..... 123
Tableau III-11 : Coefficient de corrélation entre les deux tailles d'échantillon ..... 124
Tableau III-12 : Coefficient d'étalonnage entre deux tailles d'échantillons ..... 126

Tableau IV-1 : Valeurs de retrait final des différentes formulations pour les deux mélanges de sols ..... 133

Tableau IV-2 : Variation de la conductivité thermique due au changement de HR des formulations des mélanges A ..... 144

Tableau IV-3 : Variation de la conductivité thermique dû au changement de HR des formulations des mélanges B ..... 144

Tableau IV-4 : Perméabilité et facteur de la résistance à la vapeur d'eau pour les différentes formulations de bauge ..... 146

# ANNEXES

Annexe - 1 : Isothermes d'adsorption/désorption des fibres - Résultats expérimentaux et écart-type

| | HR (%) | Lin | | Paille | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type |
| Sorption | 5 | 0,24 | 0,073 | 3,10 | 0,037 |
| | 10 | 0,66 | 0,062 | 3,87 | 0,062 |
| | 15 | 1,22 | 0,061 | 4,59 | 0,061 |
| | 20 | 1,80 | 0,061 | 5,23 | 0,056 |
| | 25 | 2,35 | 0,063 | 5,87 | 0,051 |
| | 30 | 3,01 | 0,064 | 6,50 | 0,046 |
| | 35 | 3,64 | 0,063 | 7,14 | 0,040 |
| | 40 | 4,24 | 0,063 | 7,80 | 0,035 |
| | 45 | 4,82 | 0,061 | 8,48 | 0,029 |
| | 50 | 5,48 | 0,060 | 9,21 | 0,023 |
| | 55 | 6,18 | 0,059 | 9,99 | 0,020 |
| | 60 | 7,00 | 0,059 | 10,85 | 0,024 |
| | 65 | 7,84 | 0,059 | 11,83 | 0,038 |
| | 70 | 8,89 | 0,061 | 12,94 | 0,063 |
| | 75 | 10,09 | 0,066 | 14,35 | 0,101 |
| | 80 | 11,64 | 0,077 | 15,54 | 0,159 |
| | 85 | 13,53 | 0,095 | 18,12 | 0,253 |
| | 90 | 15,95 | 0,117 | 21,37 | 0,431 |
| Désorption | 85 | 14,77 | 0,108 | 19,84 | 0,274 |
| | 80 | 13,71 | 0,105 | 18,48 | 0,174 |
| | 75 | 12,59 | 0,098 | 16,90 | 0,106 |
| | 70 | 11,54 | 0,090 | 15,59 | 0,069 |
| | 65 | 10,64 | 0,085 | 14,40 | 0,047 |
| | 60 | 9,68 | 0,079 | 13,28 | 0,032 |
| | 55 | 8,74 | 0,073 | 12,26 | 0,025 |
| | 50 | 7,95 | 0,068 | 11,30 | 0,024 |
| | 45 | 7,17 | 0,065 | 10,47 | 0,027 |
| | 40 | 6,44 | 0,063 | 9,59 | 0,029 |
| | 35 | 5,73 | 0,063 | 8,72 | 0,032 |
| | 30 | 4,87 | 0,062 | 7,88 | 0,034 |
| | 25 | 4,12 | 0,064 | 7,02 | 0,035 |
| | 20 | 3,24 | 0,066 | 6,16 | 0,037 |
| | 15 | 2,32 | 0,067 | 5,24 | 0,039 |
| | 10 | 1,25 | 0,071 | 4,26 | 0,038 |
| | 5 | 0,24 | 0,073 | 3,10 | 0,037 |

Annexe - 2 : Teneur en eau des formulations à base du mélange A en fonction de la succion et de la HR au cours de séchage

| A-0% | | | A-1%-Lin | | | A-1%-Paille | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HR (%) | W (%) | s (MPa) | HR (%) | W (%) | s (MPa) | HR (%) | W (%) | s (MPa) |
| 99,827 | 10,50 | 0,238 | 99,947 | 12,00 | 0,076 | 99,827 | 11,00 | 0,234 |
| 99,257 | 8,60 | 1,027 | 99,577 | 9,91 | 0,607 | 99,037 | 9,19 | 1,318 |
| 97 | 6,96 | 4,198 | 97 | 6,92 | 4,198 | 97 | 6,68 | 4,198 |
| 93 | 5,12 | 10,003 | 93 | 5,05 | 10,003 | 93 | 4,89 | 10,003 |
| 86 | 3,52 | 20,789 | 86 | 4,09 | 20,789 | 86 | 3,80 | 20,789 |
| 66 | 2,30 | 57,273 | 66 | 2,70 | 57,273 | 66 | 2,52 | 57,273 |
| 56 | 1,54 | 79,920 | 56 | 1,94 | 79,920 | 56 | 1,89 | 79,920 |
| 32 | 0,51 | 157,056 | 32 | 0,79 | 157,056 | 32 | 0,62 | 157,056 |
| 9 | 0,32 | 331,904 | 9 | 0,56 | 331,904 | 9 | 0,38 | 331,904 |

Annexe - 3 : Teneur en eau des formulations à base du mélange B en fonction de la succion et de la HR au cours de séchage

| B-0% | | | B-1%-Lin | | | B-1%-Paille | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| HR (%) | W (%) | s (MPa) | HR (%) | W (%) | s (MPa) | HR (%) | W (%) | s (MPa) |
| 99,957 | 10,00 | 0,047 | 99,957 | 10,50 | 0,052 | 99,987 | 12,50 | 0,020 |
| 99,497 | 7,93 | 0,680 | 99,700 | 8,95 | 0,479 | 99,827 | 10,06 | 0,251 |
| 97 | 5,58 | 4,198 | 97 | 7,03 | 4,198 | 97 | 7,34 | 4,198 |
| 93 | 3,12 | 10,003 | 93 | 4,54 | 10,003 | 93 | 5,26 | 10,003 |
| 86 | 2,40 | 20,789 | 86 | 2,86 | 20,789 | 86 | 3,53 | 20,789 |
| 66 | 1,15 | 57,273 | 66 | 1,97 | 57,273 | 66 | 2,46 | 57,273 |
| 56 | 0,78 | 79,920 | 56 | 1,34 | 79,920 | 56 | 1,87 | 79,920 |
| 32 | 0,46 | 157,056 | 32 | 0,82 | 157,056 | 32 | 1,18 | 157,056 |
| 9 | 0,31 | 331,904 | 9 | 0,69 | 331,904 | 9 | 1,02 | 331,904 |

Annexe - 4 : Isothermes d'adsorption/désorption de la bauge à base du mélange A - Résultats expérimentaux et écart-type

| | HR (%) | A-0% fibre | | A-1% fibre | | A-2% fibre | | A-3% fibre | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type |
| Sorption | 5 | 0,18 | 0,004 | 0,20 | 0,040 | 0,24 | 0,025 | 0,30 | 0,028 |
| | 10 | 0,27 | 0,006 | 0,29 | 0,072 | 0,32 | 0,027 | 0,39 | 0,026 |
| | 15 | 0,40 | 0,009 | 0,46 | 0,057 | 0,45 | 0,029 | 0,45 | 0,021 |
| | 20 | 0,53 | 0,003 | 0,59 | 0,059 | 0,58 | 0,026 | 0,60 | 0,022 |
| | 25 | 0,63 | 0,004 | 0,72 | 0,060 | 0,73 | 0,018 | 0,77 | 0,022 |
| | 30 | 0,75 | 0,008 | 0,85 | 0,060 | 0,87 | 0,015 | 0,92 | 0,022 |
| | 35 | 0,87 | 0,010 | 0,97 | 0,061 | 1,01 | 0,015 | 1,08 | 0,022 |
| | 40 | 1,00 | 0,012 | 1,10 | 0,063 | 1,14 | 0,019 | 1,25 | 0,023 |
| | 45 | 1,13 | 0,013 | 1,24 | 0,065 | 1,28 | 0,026 | 1,39 | 0,023 |
| | 50 | 1,26 | 0,014 | 1,39 | 0,067 | 1,43 | 0,034 | 1,56 | 0,024 |
| | 55 | 1,46 | 0,015 | 1,55 | 0,069 | 1,61 | 0,045 | 1,78 | 0,024 |
| | 60 | 1,64 | 0,017 | 1,74 | 0,072 | 1,85 | 0,057 | 1,99 | 0,025 |
| | 65 | 1,85 | 0,019 | 1,96 | 0,075 | 2,06 | 0,070 | 2,19 | 0,027 |
| | 70 | 2,10 | 0,022 | 2,22 | 0,079 | 2,30 | 0,084 | 2,46 | 0,031 |
| | 75 | 2,40 | 0,026 | 2,53 | 0,083 | 2,60 | 0,100 | 2,78 | 0,034 |
| | 80 | 2,76 | 0,031 | 2,90 | 0,090 | 3,05 | 0,115 | 3,15 | 0,040 |
| | 85 | 3,20 | 0,035 | 3,36 | 0,100 | 3,51 | 0,132 | 3,63 | 0,045 |
| | 90 | 3,74 | 0,042 | 3,87 | 0,114 | 4,02 | 0,148 | 4,11 | 0,052 |
| Désorption | 85 | 3,45 | 0,041 | 3,59 | 0,106 | 3,61 | 0,137 | 3,84 | 0,045 |
| | 80 | 3,15 | 0,037 | 3,28 | 0,099 | 3,31 | 0,124 | 3,54 | 0,042 |
| | 75 | 2,87 | 0,033 | 3,00 | 0,093 | 3,04 | 0,113 | 3,26 | 0,039 |
| | 70 | 2,62 | 0,030 | 2,74 | 0,086 | 2,79 | 0,104 | 3,00 | 0,037 |
| | 65 | 2,37 | 0,027 | 2,49 | 0,080 | 2,54 | 0,093 | 2,73 | 0,036 |
| | 60 | 2,09 | 0,022 | 2,22 | 0,073 | 2,28 | 0,081 | 2,45 | 0,034 |
| | 55 | 1,86 | 0,018 | 1,96 | 0,066 | 2,05 | 0,072 | 2,21 | 0,031 |
| | 50 | 1,65 | 0,015 | 1,74 | 0,062 | 1,85 | 0,061 | 1,99 | 0,029 |
| | 45 | 1,47 | 0,013 | 1,54 | 0,059 | 1,66 | 0,049 | 1,79 | 0,027 |
| | 40 | 1,29 | 0,010 | 1,36 | 0,057 | 1,49 | 0,039 | 1,62 | 0,026 |
| | 35 | 1,12 | 0,009 | 1,18 | 0,055 | 1,32 | 0,029 | 1,44 | 0,025 |
| | 30 | 0,89 | 0,007 | 0,95 | 0,053 | 1,13 | 0,025 | 1,24 | 0,023 |
| | 25 | 0,75 | 0,006 | 0,80 | 0,052 | 0,97 | 0,013 | 1,07 | 0,023 |
| | 20 | 0,62 | 0,005 | 0,67 | 0,050 | 0,77 | 0,009 | 0,84 | 0,024 |
| | 15 | 0,48 | 0,004 | 0,52 | 0,047 | 0,61 | 0,011 | 0,67 | 0,026 |
| | 10 | 0,33 | 0,004 | 0,37 | 0,044 | 0,42 | 0,017 | 0,49 | 0,027 |
| | 5 | 0,18 | 0,004 | 0,20 | 0,040 | 0,24 | 0,025 | 0,30 | 0,03 |

Annexe - 5 : Isothermes d'adsorption/désorption de la bauge à base du mélange B - Résultats expérimentaux et écart-type

| | HR (%) | B-0% fibre | | B-1% fibre | | B-2% fibre | | B-3% fibre | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type | W (%) | Ecart-type |
| Sorption | 5 | 0,17 | 0,004 | 0,21 | 0,043 | 0,18 | 0,003 | 0,22 | 0,021 |
| | 10 | 0,24 | 0,007 | 0,31 | 0,054 | 0,28 | 0,010 | 0,38 | 0,006 |
| | 15 | 0,35 | 0,011 | 0,42 | 0,059 | 0,37 | 0,014 | 0,39 | 0,012 |
| | 20 | 0,46 | 0,008 | 0,52 | 0,062 | 0,45 | 0,015 | 0,50 | 0,019 |
| | 25 | 0,54 | 0,011 | 0,62 | 0,064 | 0,55 | 0,022 | 0,63 | 0,019 |
| | 30 | 0,63 | 0,014 | 0,72 | 0,066 | 0,65 | 0,025 | 0,74 | 0,022 |
| | 35 | 0,72 | 0,017 | 0,81 | 0,068 | 0,74 | 0,027 | 0,85 | 0,027 |
| | 40 | 0,82 | 0,019 | 0,90 | 0,070 | 0,84 | 0,028 | 0,96 | 0,032 |
| | 45 | 0,91 | 0,020 | 1,00 | 0,073 | 0,93 | 0,030 | 1,08 | 0,036 |
| | 50 | 1,00 | 0,022 | 1,10 | 0,076 | 1,03 | 0,032 | 1,21 | 0,041 |
| | 55 | 1,14 | 0,025 | 1,21 | 0,079 | 1,18 | 0,032 | 1,35 | 0,045 |
| | 60 | 1,26 | 0,027 | 1,34 | 0,083 | 1,32 | 0,034 | 1,50 | 0,050 |
| | 65 | 1,41 | 0,030 | 1,49 | 0,087 | 1,48 | 0,038 | 1,66 | 0,057 |
| | 70 | 1,58 | 0,034 | 1,66 | 0,092 | 1,67 | 0,042 | 1,85 | 0,066 |
| | 75 | 1,79 | 0,039 | 1,88 | 0,098 | 1,90 | 0,047 | 2,09 | 0,076 |
| | 80 | 2,05 | 0,045 | 2,14 | 0,105 | 2,18 | 0,052 | 2,37 | 0,089 |
| | 85 | 2,38 | 0,052 | 2,48 | 0,113 | 2,54 | 0,060 | 2,74 | 0,105 |
| | 90 | 2,80 | 0,061 | 2,89 | 0,126 | 3,00 | 0,070 | 3,11 | 0,130 |
| Désorption | 85 | 2,59 | 0,057 | 2,67 | 0,117 | 2,78 | 0,059 | 2,93 | 0,112 |
| | 80 | 2,37 | 0,052 | 2,44 | 0,110 | 2,55 | 0,055 | 2,70 | 0,102 |
| | 75 | 2,16 | 0,048 | 2,23 | 0,103 | 2,32 | 0,050 | 2,48 | 0,094 |
| | 70 | 1,97 | 0,044 | 2,04 | 0,098 | 2,12 | 0,046 | 2,26 | 0,085 |
| | 65 | 1,78 | 0,040 | 1,84 | 0,091 | 1,91 | 0,041 | 2,05 | 0,075 |
| | 60 | 1,57 | 0,035 | 1,64 | 0,086 | 1,71 | 0,038 | 1,84 | 0,065 |
| | 55 | 1,41 | 0,031 | 1,46 | 0,083 | 1,52 | 0,034 | 1,65 | 0,058 |
| | 50 | 1,26 | 0,028 | 1,32 | 0,080 | 1,36 | 0,030 | 1,49 | 0,051 |
| | 45 | 1,14 | 0,025 | 1,19 | 0,076 | 1,22 | 0,027 | 1,34 | 0,045 |
| | 40 | 1,02 | 0,022 | 1,07 | 0,073 | 1,09 | 0,024 | 1,21 | 0,037 |
| | 35 | 0,90 | 0,019 | 0,95 | 0,068 | 0,96 | 0,020 | 1,07 | 0,029 |
| | 30 | 0,75 | 0,016 | 0,81 | 0,064 | 0,81 | 0,013 | 0,91 | 0,018 |
| | 25 | 0,65 | 0,013 | 0,70 | 0,061 | 0,70 | 0,013 | 0,75 | 0,013 |
| | 20 | 0,55 | 0,011 | 0,60 | 0,057 | 0,59 | 0,011 | 0,65 | 0,007 |
| | 15 | 0,43 | 0,009 | 0,48 | 0,053 | 0,46 | 0,008 | 0,51 | 0,008 |
| | 10 | 0,30 | 0,006 | 0,35 | 0,048 | 0,33 | 0,004 | 0,36 | 0,016 |
| | 5 | 0,17 | 0,004 | 0,21 | 0,043 | 0,18 | 0,003 | 0,22 | 0,021 |

# NOTATIONS

## A. Sigles d'organismes

| | | |
|---|---|---|
| AsTerre | : | Association nationale des professionnels de la Terre crue |
| PnrMCB | : | Parc Naturel Régional des Marais du Cotentin et du Bessin |
| ESITC | : | Ecole supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction |

## B. Symboles

| | | |
|---|---|---|
| 7 x 7 x 28 | : | Eprouvette prismatique de 7cm, 7cm, 28cm les 3 cotés |
| 14 x 14 x 56 | : | Eprouvette prismatique de 14cm, 14cm, 56cm les 3 cotés |
| 15 x 15 x 15 | : | Eprouvette cubique de 15 cm chaque coté |
| Øa x Hb | : | Eprouvette cylindrique de a mm de diamètre et de b mm de hauteur |
| $W_{OPN}$ | : | Teneur en eau à l'optimum Proctor normal |
| $\rho d_{OPN}$ | : | Masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Normal |
| $\rho d_m$ | : | Masse volumique sèche moyenne |
| W | : | Teneur en eau |
| $W_L$ | : | Limite de liquidité |
| $W_P$ | : | Limite de plasticité |
| $I_P$ | : | Indice de plasticité |
| $VB_s$ | : | Valeur au bleu de méthylène |
| $R_c$ | : | Résistance en compression |
| $R_f$ | : | Résistance en flexion |
| $R_t$ | : | Résistance en traction |
| s | : | Succion |

## C. Notation chimique

| | | |
|---|---|---|
| $K_2SO_4$ | : | Sulfate de potassium |
| $KNO_4$ | : | Nitrate de potassium |
| KCl | : | Chlorure de potassium |
| $NaNO_2$ | : | Nitrite de sodium |
| $Ca(NO_3)_2$ | : | Nitrate de calcium |
| $CaCl_2$ | : | Chlorure de calcium |

| | | |
|---|---|---|
| KOH | : | Hydroxyde de potassium |

# RESUME

## Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales

La terre est le premier matériau de construction par les hommes, disponible et peu consommateur d'énergie. Aujourd'hui encore, environ 30 % des habitants de la planète vit dans des habitats en terre, et pour les pays en développement, ce pourcentage s'élève à 50 % de la population rurale. De plus, les matériaux à base de terre permettent un meilleur équilibre et contrôle du climat thermique et acoustique intérieur par rapport aux matériaux usuels de construction. Cependant, la majorité des constructions en terre ne répondent pas aux exigences actuelles en termes de contraintes mécaniques, thermiques ou architecturales. Afin de répondre à ces exigences, un travail tant au niveau scientifique qu'au niveau des praticiens est à accomplir dans ce domaine.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des propriétés des matériaux utilisés sur le comportement mécanique et hygrothermique de composites terre-fibres végétales. Pour cela, différents types de sols et de fibre végétales (paille de lin, paille de blé) ont été utilisés. Ensuite, les performances mécaniques (compression, flexion) et hygrothermiques (sorption/désorption, perméabilité à la vapeur d'eau, conductivité thermique) ont été déterminées pour différents composites terre-fibres végétales. Les résultats montrent que l'utilisation de paille de lin permet d'obtenir des performances mécaniques supérieures à celles obtenues pour la paille de blé. Cependant, il est à noter que l'introduction de fibres aux sols diminue les performances mécaniques due à la diminution de la densité du matériau. Aucune influence claire de la longueur des fibres sur les performances mécanique n'a été constatée. L'étude du comportement hygrothermique a permis de montrer que le comportement à la sorption/désorption du matériau terre-fibres végétales peut être approximer à partir des résultats obtenus pour les matériaux de base. De plus, il a été démontré que l'évolution de la conductivité thermique du matériau terre-fibres végétales au cours du séchage est reliée au comportement au retrait.

***Mots clés** : Fibre végétale, construction en terre, composite terre-fibres végétales, pisé, bauge, résistance mécanique, retrait, comportement hygrothermique.*

# ABSTRACT

## Formulation and characterization of earth-plant fibres composite

Soil is the first construction material used by man, widely available and low energy consuming. Indeed, about 30% of the current world population lives in earthen structures and, in developing countries, this rate rise to 50%, mostly rural. Moreover, earth-based materials allow an improved balance and control of thermal and acoustic indoor climate compared to industrial construction materials. However, most of earthen structures do not reach current requirements in terms of mechanical, thermal or architectural. To respond to these requirements, a work at scientific and craftsman levels is necessary.

The objective of this study is to determine the influence of materials' properties on the mechanical and hygrothermal behaviour of earth-fiber composites. In order to do this, different types of soil and plant fiber (flax straw, wheat straw) were used. Then, mechanical (compression, bending) and hygrothermal performances (sorption / desorption, water vapor permeability, thermal conductivity) were determined for different soil-fiber composites. Results show that the use of flax straw provides better mechanical performances than use of wheat straw. However, it should be noted that fibers addition to soil decreases mechanical performance due to the decrease of material density. No clear influence of fiber length on mechanical performance was found. The study of hygrothermal behaviour has shown that the sorption / desorption behaviour of earth-fiber material can be approximated from the results obtained from basic materials. In addition, it has been shown that the thermal conductivity evolution of earth-fiber material during drying is related to the shrinkage behaviour.

***Keywords**: Palnt fibre, earth construction, earth-pland fibres composite, rammed earth, cob, mechanical strength, shrinkage, hygrothermal behaviour.*