



HAL
open science

Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote

Athmane Azil

► **To cite this version:**

Athmane Azil. Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote. Génie civil. Normandie Université, 2022. Français. NNT : 2022NORMC248 . tel-03969291

HAL Id: tel-03969291

<https://theses.hal.science/tel-03969291>

Submitted on 2 Feb 2023

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

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote

Présentée et soutenue par
ATHMANE AZIL

Thèse soutenue le 08/12/2022
devant le jury composé de

| | | |
|----------------------------|--|-----------------------|
| M. MAHFOUD BENZERZOUR | Professeur des universités, IMT Lille Douai - Ecole Nationale Supérieure des Mines-Télécom Lille Douai | Rapporteur du jury |
| M. THIBAUT LECOMTE | Maître de conférences HDR, UNIVERSITE BRETAGNE SUD UBS | Rapporteur du jury |
| M. MOHAMED BOUTOUIL | Directeur de recherche, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen | Membre du jury |
| M. CÉLINE PERLOT-BASCOULES | Professeur des universités, Université de Pau et des Pays de l'Adour | Président du jury |
| M. NASSIM SEBAIBI | Maître de conférences HDR, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen | Directeur de thèse |
| M. MOUSSA GOMINA | Maître de conférences HDR, ENSICAEN | Co-directeur de thèse |

Thèse dirigée par **NASSIM SEBAIBI (Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction)** et **MOUSSA GOMINA (Laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux (Caen))**





Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité **GENIE CIVIL**

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote

Présentée et soutenue par

ATHMANE AZIL

Thèse soutenue le 08/12/2022
devant le jury composé de

| | | |
|------------------------------|---|-----------------------|
| M. MAHFOUD BENZERZOUR | Professeur des universités, IMT Lille Douai- Ecole Nationale Supérieure des Mines-Télécom Lille Douai | Rapporteur du jury |
| M. THIBAUT LECOMPTE | Maître de conférences, HDR, UNIVERSITE BRETAGNE SUD UBS | Rapporteur du jury |
| M. MOHAMED BOUTOUIL | Directeur de recherche, Ecole sup. d'ingénieurs ESITC Caen | Membre de jury |
| MME. CÉLINE PERLOT BASCOULES | Professeur des universités, UNIVERSITE DE PAU PAYS DE L'ADOUR | Membre de jury |
| M. NASSIM SEBAIBI | Maître de conférences (HDR), Ecole sup. d'ingénieurs ESITC Caen | Directeur de thèse |
| M. MOUSSA GOMINA | Maître de conférences (HDR), ENSICAEN | Co-directeur de thèse |

Thèse dirigée par Nassim SEBAIBI, (Ecole supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction) et Moussa GOMINA (Laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux (Caen))



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



REMERCIEMENTS

Ces trois années de thèse ont été une expérience intense, durant laquelle je n'ai cessé d'apprendre, de rencontrer, de découvrir... J'ai eu une chance immense d'avoir à la fois un sujet de recherche qui me tenait à cœur et un encadrement pleinement bienveillant. Que chaque personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici toute ma gratitude.

Je voudrais remercier en premier lieu tous les membres du jury. Merci à Messieurs Mahfoud BENZERZOUR et Thibaut LECOMPTE d'avoir accepté d'être rapporteurs pour mon travail de thèse. Je remercie également Madame Céline PERLOT BASCOULES et Monsieur Mohamed BOUTOUIL d'avoir accepté de participer au jury de ma soutenance de thèse.

J'exprime mes vifs remerciements et mon profond respect à mon directeur de thèse Monsieur Nassim SEBAIBI et à mon codirecteur de thèse Monsieur Moussa GOMINA, qui ont accepté de diriger mes travaux de recherche, et qui m'ont soutenu tout au long de ce travail de recherche. Le partage de leurs compétences scientifiques et leur œil critique m'ont aidé à atteindre les objectifs fixés. Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans leurs précieux conseils et leurs orientations bienveillantes.

J'en profite également pour remercier l'ensemble du personnel de l'ESITC Caen pour leur accueil chaleureux et les trois années passées ensemble au sein de l'école. En particulier, Karim TOUATI, enseignant-chercheur à l'ESITC Caen, avec qui j'ai collaboré dans l'instrumentation, la récupération et exploitation de quelques données du bâtiment pilote.

Enfin, je remercie vivement ma chère femme pour son soutien inconditionnel dans les moments difficiles et ma famille qui a été là pour moi, ma sœur, mon frère et mon père, pour leur appui indéfectible.

Je finis par une pensée spéciale pour ma mère, sans qui je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Résumé

Les enjeux économiques liés à la hausse des coûts des matériaux de construction, la raréfaction de ces derniers et les impacts environnementaux inhérents à leur fabrication et à leur utilisation conduisent les acteurs de la construction à s'orienter vers des écomatériaux.

Ces dernières années, la bauge connaît une renaissance dans le nord-ouest de la France et le sud de l'Angleterre. Les connaissances techniques sur ce type de matériau de construction étant limitées, il est essentiel d'étudier les propriétés mécaniques et hygrothermiques pour des méthodes de conception modernes. Le projet CobBauge vise à développer cette technique de construction avec des matériaux innovants.

Cette thèse a pour objectif le développement de la construction en terre crue avec des mélanges terre-fibres végétales. Après l'étude de plusieurs formulations, deux mélanges ont été sélectionnés pour la construction d'un bâtiment pilote : la bauge traditionnelle pour la résistance mécanique, composée de limon et de paille de lin, et la terre allégée pour l'isolation, composée d'argile et de fibres de roseau. Ce dispositif permet de satisfaire à la réglementation thermique RT 2012.

Le bâtiment pilote a été construit en Normandie, dans le Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin (Carentan). Il permet de tester de nouvelles méthodes de mise en œuvre de bauge et de terre allégée sur le chantier, et de définir une méthode permettant la reproduction en laboratoire des caractéristiques des matériaux observées sur le chantier. Un programme expérimental a été conçu pour évaluer les propriétés des matériaux telles que la teneur en eau, la masse volumique, la porosité, la résistance à la compression et la conductivité thermique. Des échantillons de forme cylindrique ($\varnothing 110 \times H220$ mm) et prismatique (300 x 300 x 70 mm) ont été produits sur place et en laboratoire.

Un suivi régulier de la qualité des matériaux, puis des mélanges, a été mis en place sur chantier afin de suivre la cinétique de séchage, le retrait et le comportement hygrothermique du bâtiment pilote, ainsi que son environnement. Pour cela, des sondes de teneur en eau et une station météorologique ont été utilisées. Les performances hygrothermiques et de retrait ont été étudiées à l'échelle du laboratoire.

Les résultats expérimentaux nous ont permis de mesurer les différents paramètres sur chantier et de reproduire les matériaux en laboratoire avec les mêmes caractéristiques, de comparer la cinétique de séchage sur les murs du bâtiment et des échantillons en laboratoire, de déterminer le retrait sur les murs du bâtiment et à l'échelle du laboratoire, et enfin d'explorer le comportement hygrothermique des matériaux.

Mots clés

Projet CobBauge, Bâtiment pilote, Normandie, Bauge, Terre allégée, Résistance mécanique, Conductivité thermique, Hygrothermie, Cinétique de séchage, Retrait.

Abstract

The economic challenges related to the cost increase of construction materials, the rarity and the environmental impacts inherent in their manufacture and use lead the construction industry to turn to eco-materials.

In the last years, Cob is undergoing a renewal in the northwest of France and the south of England. The technical knowledge on this type of building material being limited, the study of mechanical and hygrothermal properties is essential for modern design methods. The CobBauge project aims to develop this construction technique with innovative materials.

The objective of this thesis is the development of raw earth construction with earth-vegetal fiber mixes. After the study of several formulations, two mixes were selected for the construction of a prototype building: the traditional cob for the mechanical resistance, composed of silt and flax straw, and the light earth for the insulation, composed of clay and reed fiber. This system makes it possible to comply with the RT 2012 thermal regulations.

The prototype building was constructed in Normandy, in the Regional Natural Park of the Cotentin and Bessin Marshes (Carentan). This building is used to test new methods of implementation of cob and light earth on the construction site, and to develop a method to reproduce in the laboratory the properties of the materials observed on the construction site. An experimental program was developed to evaluate material properties such as water content, density, porosity, compressive strength and thermal conductivity. Cylindrical ($\emptyset 110 \times H220$ mm) and prismatic (300 x 300 x 70 mm) specimens were produced on site and in the laboratory.

A monitoring of the quality of the materials, then of the mixtures, was carried out on site, in order to follow the drying kinetics, the shrinkage and the hygrothermal behavior of the prototype building, as well as its environment. For this reason, water content sensors and a meteorological station were used. Also, the hygrothermal and shrinkage performances were studied at the laboratory scale.

The experimental results were used for measuring the different parameters on the site and for reproducing the materials in the laboratory with the same characteristics, for comparing the drying kinetics on the building walls and on the laboratory specimens, for determining the shrinkage on the building walls and on the laboratory scale, and finally for exploring the hygrothermal behavior of the materials.

Keywords

CobBauge Project, Prototype building, Normandy, Cob, Light earth, Compressive strength,

Thermal conductivity, Hygrothermal, Drying kinetic, Shrinkage.

Table des matières

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| 1. Contexte | 1 |
| 2. Le projet CobBauge | 3 |
| 3. Objectifs de l'étude | 4 |
| 4. Organisation du manuscrit de thèse | 5 |
| CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART | 7 |
| 1. La construction en terre crue | 7 |
| 1.1 Le torchis | 12 |
| 1.2 L'adobe | 13 |
| 1.3 Le pisé | 14 |
| 1.4 Les BTC et BTCS | 16 |
| 1.5 La bauge | 17 |
| 1.6 La terre allégée | 19 |
| 2. Les sols | 20 |
| 2.1 Généralités | 20 |
| 2.2 Évaluation de la qualité du sol pour la construction | 21 |
| 2.3 Structure des argiles | 22 |
| 3. Les fibres végétales | 24 |
| 3.1 Généralités | 24 |
| 3.2 Le lin | 25 |
| 3.2.1 Caractéristiques morphologiques | 26 |
| 3.2.2 Propriétés physiques | 28 |
| 3.2.3 Propriétés mécaniques | 28 |
| 3.2.4 Propriétés hygroscopiques | 30 |
| 3.2.5 Comportement thermique | 30 |
| 3.3 Le roseau | 32 |
| 3.3.1 Morphologie | 32 |
| 3.3.2 Propriétés hygroscopiques | 33 |
| 3.3.3 Comportement thermique | 34 |
| 4. Caractéristiques des matériaux à base de terre et de fibres végétales | 35 |
| 4.1 Propriétés physiques | 35 |
| 4.1.1 Masse volumique | 35 |
| 4.1.2 Retrait | 36 |
| 4.1.3 Absorption d'eau | 38 |
| 4.2 Propriétés mécaniques | 39 |

| | | |
|--|--|----|
| 5. | Suivi des bâtiments et des matériaux par des capteurs | 41 |
| 6. | Caractéristiques hygrothermiques des matériaux à base de terre et de fibres végétales... | 41 |
| 6.1 | Perméabilité à la vapeur d'eau | 41 |
| 6.2 | Absorption/désorption, comportement en sorption | 42 |
| 6.3 | Conductivité thermique | 43 |
| 7. | Conclusion | 45 |
| CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES | | |
| EXPÉRIMENTALES | | |
| 1. | Caractérisation des matériaux de l'étude | 47 |
| 1.1 | Sols | 47 |
| 1.1.1 | Présentation des sols | 47 |
| 1.1.2 | Analyse granulométrique | 47 |
| 1.1.3 | Activité argileuse | 48 |
| 1.1.4 | Masse volumique absolue | 49 |
| 1.1.5 | Composition argileuse et minéralogique..... | 50 |
| 1.2 | Fibres végétales | 53 |
| 1.2.1 | Présentation des fibres végétales..... | 53 |
| 1.2.2 | Caractéristiques mécaniques des fibres..... | 53 |
| 1.2.3 | Masse volumique absolue | 54 |
| 1.2.4 | Cinétique d'absorption d'eau | 55 |
| 2. | Mélanges et caractérisation..... | 56 |
| 2.1 | Préparation et confection des éprouvettes sur chantier et en laboratoire | 56 |
| 2.1.1 | Mise en œuvre des mélanges sur chantier..... | 56 |
| 2.1.2 | Suivi sur chantier..... | 58 |
| 2.1.3 | Préparation des mélanges au laboratoire..... | 60 |
| 2.2 | Propriétés physiques | 61 |
| 2.2.1 | Masse volumique apparente | 61 |
| 2.2.2 | Porosité accessible à l'eau..... | 61 |
| 2.2.3 | Perméabilité à la vapeur | 62 |
| 2.3 | Propriétés mécaniques | 64 |
| 2.4 | Propriétés thermiques | 64 |
| 3. | Mise au point d'une chaîne de mesure au niveau du bâtiment | 66 |
| 3.1 | Installation des capteurs CS655..... | 67 |
| 3.2 | Installation de la station météo WS-GP1..... | 68 |
| 3.3 | Centrale d'acquisition CR1000X et multiplexeurs AM16/32B | 69 |
| 3.3.1 | Description de la centrale..... | 69 |
| 3.3.2 | Programmation..... | 70 |

| | | |
|--|---|-----|
| 3.4 | Capteur de teneur en eau CS655 | 70 |
| 3.4.1 | Description | 70 |
| 3.4.2 | Fonctionnement des sondes..... | 70 |
| 3.4.3 | Méthode d'étalonnage des capteurs CS655 de teneur en eau | 72 |
| 3.5 | Mesures de retrait | 76 |
| CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE | | 77 |
| 1. | Analyse des résultats sur chantier | 77 |
| 1.1 | Teneur en eau initiale | 77 |
| 1.2 | Masse volumique sèche | 78 |
| 1.3 | Propriétés mécaniques | 80 |
| 1.4 | Conductivité thermique | 81 |
| 1.5 | Porosité accessible à l'eau | 82 |
| 2. | Analyse des résultats à l'échelle du laboratoire..... | 82 |
| 2.1 | Masse volumique sèche | 82 |
| 2.2 | Propriétés mécaniques | 83 |
| 2.3 | Conductivité thermique | 84 |
| 2.4 | Porosité accessible à l'eau | 85 |
| 3. | Corrélation laboratoire-chantier..... | 85 |
| 4. | Conclusion | 87 |
| CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL..... | | 88 |
| 1. | Résultats d'étalonnage des capteurs CS655 au laboratoire..... | 88 |
| 1.1 | Bauge..... | 88 |
| 1.1.1 | Étalonnage à 0 °C..... | 88 |
| 1.1.2 | Étalonnage à 20 °C..... | 90 |
| 1.1.3 | Étalonnage à 40 °C..... | 91 |
| 1.2 | Terre allégée | 93 |
| 1.2.1 | Étalonnage à 0 °C..... | 93 |
| 1.2.2 | Étalonnage à 20 °C..... | 94 |
| 1.2.3 | Étalonnage à 40 °C..... | 96 |
| 2. | Traitement des données issues de la bauge et de la terre allégée..... | 97 |
| 2.1 | Cinétique de séchage des murs..... | 97 |
| 2.2 | Impact des conditions climatiques sur les murs | 99 |
| 2.3 | Taux de séchage différentiel..... | 100 |
| 2.4 | Modélisation du séchage | 101 |
| 3. | Traitement des données des comparateurs de retrait | 102 |
| 4. | Conclusion | 104 |

| | |
|---|-----|
| CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE | 106 |
| 1. Suivi de cinétique de séchage | 106 |
| 1.1 Cinétique de séchage sur chantier | 106 |
| 1.2 Cinétique de séchage en laboratoire | 108 |
| 2. Suivi du retrait et tassement au laboratoire..... | 110 |
| 2.1 Isotherme de sorption de l'humidité..... | 113 |
| 2.2 Porosité accessible à l'eau | 116 |
| 2.3 Perméabilité à la vapeur | 117 |
| 2.4 Suivi de la conductivité thermique en chambre climatique..... | 118 |
| 2.4.1 Bauge..... | 119 |
| 2.4.2 Terre allégée..... | 121 |
| 3. Conclusion | 123 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 124 |
| PERSPECTIVES..... | 128 |
| ANNEXE 1 | 129 |
| ANNEXE 2 | 130 |
| ANNEXE 3 | 131 |
| ANNEXE 4 | 132 |
| ANNEXE 5 | 133 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 134 |

NOMENCLATURE

| | | |
|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| BTC | Briques de terre comprimée | |
| BTCS | Briques de terre comprimée stabilisée | |
| ATG | Analyse thermogravimétrique | |
| VWC | <i>Volume water content</i> (teneur en eau volumétrique) | [m ³ /m ³] |
| T | Température | [°C] |
| HR | Humidité relative | [%] |
| L | Longueur | [mm] |
| D | Diamètre | [μm] |
| D_{max} | Diamètre maximal | [mm] |
| σ_r | Contrainte à la rupture | [MPa] |
| ε_r | Déformation à rupture | [%] |
| E | Module d'élasticité | [GPa] |
| V_{matériau} | Volume du matériau | [cm ³] |
| V_{cellule} | Volume de la cellule | [cm ³] |
| V | Volume | [m ³] |
| P1 | Pression connue | [Pa] |
| P2 | Nouvelle pression de l'échantillon | [Pa] |
| M_f | Masse des fibres sèches | [kg] |
| M₁ | Masse des fibres et du sachet essoré | [kg] |
| M_s | Masse sèche | [kg] |
| M_a | Masse sous air | [kg] |
| M_h | Masse sous huile | [kg] |
| M₀ | Masse de l'échantillon d'étalonnage | [kg] |

| | | |
|----------------------------|--|-----------------------|
| M_t | Masse totale | [kg] |
| M_{bauge} | Masse de la bauge | [kg] |
| $M_{\text{terre allégée}}$ | Masse de la terre allégée | [kg] |
| $M_{\text{fibre de lin}}$ | Masse de fibre de lin | [kg] |
| M_{roseau} | Masse de roseau | [kg] |
| $M_{\text{sol 1}}$ | Masse du sol 1 | [kg] |
| $M_{\text{sol 2}}$ | Masse du sol 2 | [kg] |
| $M_{\text{sol 3}}$ | Masse du sol 3 | [kg] |
| M_v | Masse volumique | [kg.m ⁻³] |
| $\rho_{\text{spécifique}}$ | Masse volumique spécifique | [kg.m ⁻³] |
| ρ_{absolue} | Masse volumique absolue | [kg.m ⁻³] |
| d_s | Densité sèche du mélange | |
| $W_{\text{absorption}}$ | Coefficient d'absorption d'eau | [%] |
| Φ | Porosité | [%] |
| I_p | Indice de plasticité | [%] |
| W_L | Limite de liquidité | [%] |
| W_P | Limite de plasticité | [%] |
| VB_s | Valeur au bleu de méthylène | [g/100 g] |
| \varnothing | Diamètre des échantillons cylindriques | [mm] |
| H | Hauteur des échantillons cylindriques | [mm] |
| w | Teneur en eau massique | [%] |
| σ | Résistance maximale à la compression | [MPa] |
| $\sigma_{2\%}$ | Résistance à la compression à 2 % | [MPa] |

| | | |
|-----------------------------|---|--|
| λ | Conductivité thermique | $[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ |
| A | Section de l'échantillon | $[\text{m}^2]$ |
| G | Flux de vapeur d'eau | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ |
| ΔP_v | Pression partielle de vapeur d'eau | $[\text{Pa}]$ |
| Z | Résistance à la vapeur d'eau | $[\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}]$ |
| Z_a | Couche d'air présente dans la coupelle | $[\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}/\text{kg}]$ |
| t | Temps | $[\text{s}]$ |
| E | Épaisseur de l'échantillon | $[\text{cm}]$ |
| W | Perméabilité à la vapeur d'eau de l'ensemble | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}]$ |
| W_c | Perméabilité à la vapeur d'eau corrigée | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}]$ |
| d_a | Épaisseur de la couche d'air | $[\text{cm}]$ |
| δ_a | Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}]$ |
| δ | Perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}]$ |
| μ | Facteur de résistance à la vapeur d'eau | $[-]$ |
| Q | Flux de chaleur | $[\text{J}/\text{s}]$ |
| $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ | Gradient de température | $[\text{°C}/100\text{m}]$ |
| θ_v | Teneur en eau volumétrique | $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ |
| ε | Permittivité diélectrique apparente du sol | $[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$ |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| FIGURE 1 : REPARTITION DE LA CONSTRUCTION EN TERRE DANS LE MONDE (SOURCE : HTTP://CRATERRE.ORG/) | 7 |
| FIGURE 2 : CONSTRUCTIONS EN TERRE DANS LE MONDE | 8 |
| FIGURE 3 : TYPES DE CONSTRUCTION EN TERRE EN EUROPE (ECOLE D'AVIGNON, 2009)..... | 9 |
| FIGURE 4 : REPARTITION DES TYPOLOGIES CONSTRUCTIVES EN TERRE CRUE EN FRANCE (ECOLE D'AVIGNON, 2009) | 10 |
| FIGURE 5 : LES TECHNIQUES DE LA CONSTRUCTION EN TERRE (HOUBEN AND GUILLAUD, 1984)..... | 12 |
| FIGURE 6 : MAISON EN TORCHIS PAN DE BOIS, SAINT-GEORGES-DE-ROUELLEY (HURET, 2019) | 13 |
| FIGURE 7 : LA ZIGGOURAT DE TCHOGA ZANBIL EN IRAN CONSTRuite VERS 1250 AVANT J.-C. (CRATERRE, 2017) (<i>A GAUCHE</i>) | 14 |
| FIGURE 8 : CONSTRUCTION D'UN MUR EN PISE (ABREU E LIMA <i>ET AL.</i> , 2016)..... | 15 |
| FIGURE 9 : CONSTRUCTION EN BTC (ECOPOLE, 2010) | 16 |
| FIGURE 10 : MAISON D'ARTISAN EN BAUGE A GEVEZE EN ILLE-ET-VILAINE (<i>A GAUCHE</i>) | 17 |
| FIGURE 11 : BRIQUES DE TERRE ALLEGEE DE LA MAISON DE SOUFFLENHEIM (S'LEHMBAU ATELIER, 2017)..... | 19 |
| FIGURE 12 : SECTION VERTICALE DE MATERIAUX ALTERES ALLANT DE LA SURFACE DU SOL AU SUBSTRATUM ROCHEUX NON ALTERE, SELON LES DEFINITIONS DE PLUSIEURS DISCIPLINES (HAMARD <i>ET AL.</i> , 2013)..... | 21 |
| FIGURE 13 : UNITES STRUCTURALES DE LA MONTMORILLONITE (TOURET <i>ET AL.</i> , 1990)..... | 22 |
| FIGURE 14 : SCHEMA D'UNE STRUCTURE DES PHYLLOSILICATES TYPE T-O-T (EID, 2012) | 23 |
| FIGURE 15 : SCHEMA D'UNE STRUCTURE DES PHYLLOSILICATES TYPE T-O-T (LASLEDJ, 2009) | 23 |
| FIGURE 16 : CLASSIFICATION DES FIBRES VEGETALES (BALEY, 2005)..... | 24 |
| FIGURE 17 : PAILLE DE LIN SOUS FORME DE BALLE (PROJET COBBAUGE)..... | 27 |
| FIGURE 18 : SCHEMA DE LA MICROSTRUCTURE D'UNE FIBRE VEGETALE (BALEY, 2002) | 27 |
| FIGURE 19 : SECTION DE TIGE DE LIN AU MICROSCOPE OPTIQUE (CHARLET, 2008)..... | 28 |
| FIGURE 20 : COURBE TYPIQUE CHARGE-DEPLACEMENT D'UN ESSAI DE TRACTION SUR UNE FIBRE DE LIN (BALEY, 2002) | 29 |
| FIGURE 21 : ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE DE DIFFERENTES VARIETES DE FIBRES DE LIN (THUAULT, 2011) | 31 |
| FIGURE 22 : FIBRES DE ROSEAU SOUS FORME DE BOTTES | 32 |
| FIGURE 23 : MESURES DES PROPRIETES DE SORPTION-DESORPTION HYGROSCOPIQUE DU ROSEAU ... | 33 |
| FIGURE 24 : ANALYSES THERMOGRAVIMETRIQUES DES FARINES VEGETALES EN PERTE DE MASSE (HONORE, 2020)..... | 34 |
| FIGURE 25 : MASSE VOLUMIQUE SECHE DE DIFFERENTS MATERIAUX EN FONCTION DE LA TENEUR EN FIBRES (LABOREL-PRENERON <i>ET AL.</i> , 2016)..... | 36 |
| FIGURE 26 : RETRAIT PAR SECHAGE DES ECHANTILLONS DE BAUGE (AKINKUROLERE <i>ET AL.</i> , 2006) 37 | |
| FIGURE 27 : EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE RETRAIT D'ECHANTILLONS NON STABILISES ET NON RENFORCES | 37 |
| FIGURE 28 : EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE RETRAIT DES ECHANTILLONS RENFORCES PAR DES FIBRES | 38 |
| FIGURE 29 : EFFET DE L'ABSORPTION DE L'EAU SUR LA COHESION DE FIBRES MELANGEES A LA TERRE | 39 |

| | |
|--|----|
| FIGURE 30 : CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE SELON LA LITTERATURE (LABOREL-PRENERON <i>ET AL.</i> , 2016) | 45 |
| FIGURE 31 : COURBE GRANULOMETRIQUE | 48 |
| FIGURE 32 : LIMITES D'ATTERBERG ET DOMAINES RHEOLOGIQUES | 49 |
| FIGURE 33 : PYCNOMETRE A HELIUM DE TYPE ACCUPYC II 1340..... | 49 |
| FIGURE 34 : DIFFRACTOMETRE, MODELE INEL EQUINOX 3000..... | 50 |
| FIGURE 35 : SCHEMA DRX DU SOL 1 | 51 |
| FIGURE 36 : SCHEMA DRX DU SOL 2 | 52 |
| FIGURE 37 : SCHEMA DRX DU SOL 3 | 53 |
| FIGURE 38 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'ESSAI DE TRACTION DES FIBRES (PHUNG, 2018)..... | 54 |
| FIGURE 39 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE LA CINETIQUE D'ABSORPTION DES FIBRES..... | 55 |
| FIGURE 40 : CINETIQUE D'ABSORPTION D'EAU PAR LES FIBRES VEGETALES | 56 |
| FIGURE 41 : PREPARATION DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE SUR CHANTIER | 57 |
| FIGURE 42 : ÉCHANTILLONS PRISMATIQUES ET CYLINDRIQUES | 58 |
| FIGURE 43 : BATIMENT PROTOTYPE EN COURS DE CONSTRUCTION (PROJET COBBAUGE) | 58 |
| FIGURE 44 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE DETERMINATION DE LA TENEUR EN FIBRES REELLE DANS LA BAUGE | 59 |
| FIGURE 45 : PREPARATION DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE AU LABORATOIRE | 61 |
| FIGURE 46 : ESSAI EXPERIMENTAL DE PERMEABILITE A LA VAPEUR D'EAU | 62 |
| FIGURE 47 : ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIAL..... | 64 |
| FIGURE 48 : FLUX DE CHALEUR A TRAVERS UN ELEMENT CYLINDRIQUE..... | 64 |
| FIGURE 49 : FLUXMÈTRE THERMIQUE (HFM NETZSCH HFM 436 LAMBDA) | 65 |
| FIGURE 50 : IMAGE DU BATIMENT EXPERIMENTAL ILLUSTRANT LES MURS NORD, SUD ET OUEST | 66 |
| FIGURE 51 : MISE EN ŒUVRE DES MELANGES DANS LE COFFRAGE | 67 |
| FIGURE 52 : CAPTEURS CONNECTES A LA CENTRALE D'ACQUISITION | 68 |
| FIGURE 53 : STATION METEOROLOGIQUE WS-GP1 | 68 |
| FIGURE 54 : MESURES EFFECTUEES PAR LA STATION METEOROLOGIQUE..... | 69 |
| FIGURE 55 : PREPARATION DES ECHANTILLONS SUR CHANTIER POUR ETALONNAGE DES CAPTEURS | 72 |
| FIGURE 56 : MESURES DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE, DE LA TEMPERATURE ET DE LA PERMITTIVITE DIELECTRIQUE | 76 |
| FIGURE 57 : TENEUR EN EAU DES MELANGES SUR CHANTIER POUR DIFFERENTES FORMES D'ECHANTILLONS (A) ET LEVEES (B). | 77 |
| FIGURE 58 : MASSE VOLUMIQUE SECHE DES MELANGES SUR CHANTIER POUR DIFFERENTES FORMES D'ECHANTILLONS (A) ET LEVEES (B). | 79 |
| FIGURE 59 : RESISTANCE A LA COMPRESSION SUR CHANTIER A 2 % DE DEFORMATION | 80 |
| FIGURE 60 : CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE SUR CHANTIER.... | 81 |
| FIGURE 61 : MASSE VOLUMIQUE SECHE DES MELANGES EN LABORATOIRE POUR DIFFERENTES ENERGIES DE COMPACTAGE..... | 83 |
| FIGURE 62 : RESISTANCE A LA COMPRESSION EN LABORATOIRE A 2 % DE DEFORMATION | 84 |
| FIGURE 63 : CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE EN LABORATOIRE | 84 |
| FIGURE 64 : ANALYSE DE LA MASSE VOLUMIQUE DU MELANGE SUR CHANTIER ET MELANGE AU LABORATOIRE..... | 86 |
| FIGURE 65 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE BAUGE A 0 °C EN CHAMBRE CLIMATIQUE | 89 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 66 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE BAUGE A 0 °C EN CHAMBRE CLIMATIQUE | 89 |
| FIGURE 67 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE BAUGE A 20 °C A L'AIR AMBIANT..... | 90 |
| FIGURE 68 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE BAUGE A 20 °C A L'AIR AMBIANT..... | 91 |
| FIGURE 69 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE BAUGE A 40 °C A L'ETUVE | 92 |
| FIGURE 70 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE BAUGE A 40 °C A L'ETUVE | 92 |
| FIGURE 71 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE TERRE ALLEGEE A 0 °C EN CHAMBRE CLIMATIQUE | 93 |
| FIGURE 72 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE TERRE ALLEGEE A 0 °C EN CHAMBRE CLIMATIQUE | 94 |
| FIGURE 73 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE TERRE ALLEGEE A 20 °C A L'AIR AMBIANT..... | 95 |
| FIGURE 74 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE TERRE ALLEGEE A 20 °C A L'AIR AMBIANT..... | 95 |
| FIGURE 75 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 1 DE TERRE ALLEGEE A 40 °C A L'ETUVE | 96 |
| FIGURE 76 : ÉTALONNAGE DE L'ECHANTILLON 2 DE TERRE ALLEGEE A 40 °C A L'ETUVE | 97 |
| FIGURE 77 : ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DANS LES MURS NORD, OUEST ET SUD (LEVEE 2) ... | 97 |
| FIGURE 78 : BATIMENT PILOTE AVEC LES DIFFERENTES LEVEES | 98 |
| FIGURE 79 : IMPACT DE LA HAUTEUR SUR L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU DANS LES MURS NORD, SUD ET OUEST | 100 |
| FIGURE 80 : AJUSTEMENT NUMERIQUE DE L'EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU..... | 102 |
| FIGURE 81 : TAUX DE RETRAIT DANS LA BAUGE ET LA TERRE ALLEGEE..... | 102 |
| FIGURE 82 : TAUX DE RETRAIT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU..... | 103 |
| FIGURE 83 : CINETIQUE DE SECHAGE SUR CHANTIER DES MURS EN BAUGE | 106 |
| FIGURE 84 : SCHEMA DE DISTRIBUTION DES CAPTEURS | 107 |
| FIGURE 85 : CINETIQUE DE SECHAGE SUR CHANTIER DES MURS EN TERRE ALLEGEE..... | 108 |
| FIGURE 86 : CINETIQUE DE SECHAGE DE LA BAUGE EN LABORATOIRE | 109 |
| FIGURE 87 : CINETIQUE DE SECHAGE DE LA TERRE ALLEGEE EN LABORATOIRE | 109 |
| FIGURE 88 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL DES ECHANTILLONS AVEC LES COMPARETEURS..... | 110 |
| FIGURE 89 : VARIATION RELATIVE HORIZONTALE DE RETRAIT DANS LA BAUGE (25 × 50 × 40 CM) | 111 |
| FIGURE 90 : VARIATION RELATIVE HORIZONTALE DE RETRAIT DANS LA BAUGE (40 × 50 × 40 CM) | 112 |
| FIGURE 91 : VARIATION RELATIVE HORIZONTALE DE RETRAIT DANS LA TERRE ALLEGEE (25 × 50 × 40 CM)..... | 112 |
| FIGURE 92 : VARIATION RELATIVE HORIZONTALE DE RETRAIT DANS LA TERRE ALLEGEE (40 × 50 × 40 CM)..... | 113 |
| FIGURE 93 : LES CINQ TYPES D'ISOTHERMES (BRUNAUER <i>ET AL.</i> , 1938)..... | 114 |
| FIGURE 94 : ISOTHERMES DE SORPTION D'HUMIDITE DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE | 114 |
| FIGURE 95 : ISOTHERMES DE SORPTION D'HUMIDITE DES SOLS ET DES FIBRES | 115 |
| FIGURE 96 : COMPARAISON ENTRE ISOTHERMES DE SORPTION D'HUMIDITE SELON LA LOI DE MELANGE..... | 116 |
| FIGURE 97 : SECTION D'UN ECHANTILLON DE BAUGE (A GAUCHE) ET DE TERRE ALLEGEE (A DROITE) | 118 |
| FIGURE 98 : CONDUCTIVITE THERMIQUE ET MASSE VOLUMIQUE DE LA BAUGE EN LABORATOIRE.. | 119 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 99 : RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET LA TENEUR EN EAU DE LA BAUGE EN LABORATOIRE..... | 120 |
| FIGURE 100 : RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET LA MASSE VOLUMIQUE DE LA BAUGE | 120 |
| FIGURE 101 : CONDUCTIVITE THERMIQUE ET MASSE VOLUMIQUE DE LA TERRE ALLEGEE EN LABORATOIRE..... | 121 |
| FIGURE 102 : RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET LA MASSE VOLUMIQUE DE LA TERRE ALLEGEE | 122 |
| FIGURE 103 : RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET LA TENEUR EN EAU DE LA TERRE ALLEGEE EN LABORATOIRE | 122 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 1 : CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA BAUGE SELON LA LITTERATURE | 18 |
| TABLEAU 2 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DE LA BAUGE SELON LA LITTERATURE | 18 |
| TABLEAU 3 : ACTION DES FIBRES A L'INTERIEUR D'UN MELANGE A BASE DE TERRE SELON LA LITTERATURE..... | 25 |
| TABLEAU 4 : PRODUCTION ANNUELLE DE LIN DANS LE MONDE (PLANETOSCOPE-STATISTIQUES, 2007)..... | 26 |
| TABLEAU 5 : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES DIMENSIONS D'UNE FIBRE DE LIN..... | 28 |
| TABLEAU 6 : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES PROPRIETES MECANIQUES D'UNE FIBRE DE LIN | 29 |
| TABLEAU 7 : COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU DE DIFFERENTES FIBRES VEGETALES | 30 |
| TABLEAU 8 : VALEURS DU FACTEUR DE RESISTANCE A LA VAPEUR D'EAU (μ) SELON LA LITTERATURE | 42 |
| TABLEAU 9 : PARAMETRES OBTENUS A PARTIR DES COURBES GRANULOMETRIQUES | 48 |
| TABLEAU 10 : PROPRIETES DES TROIS SOLS..... | 49 |
| TABLEAU 11 : RESULTATS DE MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES SOLS | 50 |
| TABLEAU 12 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DU SOL 2..... | 52 |
| TABLEAU 13 : COMPOSITION MINERALOGIQUE DU SOL 3..... | 53 |
| TABLEAU 14 : CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES FIBRES | 54 |
| TABLEAU 15 : RESULTATS DE MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DES FIBRES VEGETALES | 55 |
| TABLEAU 16 : PROPRIETES DES FIBRES VEGETALES..... | 56 |
| TABLEAU 17 : FORMULATION DES MELANGES DE BAUGE ET DE TERRE ALLEGEE SUR CHANTIER (% MASSE) | 57 |
| TABLEAU 18 : RESULTATS DE TENEUR EN EAU SUR CHANTIER..... | 59 |
| TABLEAU 19 : TENEUR EN FIBRES DE LIN SUR CHANTIER..... | 60 |
| TABLEAU 20 : POURCENTAGE DE SOL ET DE ROSEAU DANS LA TERRE ALLEGEE SUR CHANTIER | 60 |
| TABLEAU 21 : FORMULATION DES MELANGES DE BAUGE ET DE TERRE ALLEGEE AU LABORATOIRE (% MASSE) | 60 |
| TABLEAU 22 : GAMMES ET EXACTITUDE DES MESURES (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2020)..... | 71 |
| TABLEAU 23 : POROSITE DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE SUR CHANTIER | 82 |
| TABLEAU 24 : ÉNERGIES DE COMPACTAGE EN LABORATOIRE..... | 82 |
| TABLEAU 25 : POROSITE DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE AU LABORATOIRE..... | 85 |
| TABLEAU 26 : FACTEURS DE CORRECTION DES MELANGES DU LABORATOIRE..... | 86 |
| TABLEAU 27 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 0 °C | 88 |
| TABLEAU 28 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 20 °C | 90 |
| TABLEAU 29 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 40 °C | 91 |
| TABLEAU 30 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 0 °C | 93 |
| TABLEAU 31 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 20 °C | 94 |
| TABLEAU 32 : ÉTALONNAGE DES ECHANTILLONS 1 ET 2 A 40 °C | 96 |
| TABLEAU 33 : MESURES DE POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU..... | 116 |
| TABLEAU 34 : FACTEUR DE RESISTANCE A LA VAPEUR D'EAU (μ) DE LA BAUGE ET DE LA TERRE ALLEGEE | 117 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte

Le réchauffement climatique est aujourd'hui confirmé par la communauté scientifique et le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (Antilla, 2005; Meyer *et al.*, 2014). Son origine anthropique est validée par 98 % des chercheurs travaillant sur les sciences du climat (Détrie, 2007). Face à ce changement climatique et à ses conséquences néfastes pour l'environnement, les autorités gouvernementales et les différentes organisations non gouvernementales (ONG) ont adopté des réglementations visant à réduire la consommation d'énergie et par conséquent les émissions de CO₂.

Le domaine de la construction est l'un des principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre. Le secteur du bâtiment représente 40 % de la consommation mondiale d'énergie, une grande partie de cette consommation étant consacrée au chauffage (Cao *et al.*, 2016). Plus précisément en France, le secteur tertiaire, qui comprend le logement résidentiel, est responsable d'environ 45 % de la consommation totale d'énergie et de 21 % des émissions de CO₂. Le chauffage représente environ 60 % de la consommation totale d'énergie dans les logements (Hache *et al.*, 2017). Une feuille de route a été réalisée par Agence internationale de l'énergie (AIE) pour neutraliser carbone à l'horizon 2050.

L'écologie politique est née au XX^e siècle. Dans le domaine du bâtiment, le bioclimatisme apparaît comme une approche de l'habitat en correspondance avec cette définition de l'écologie. Le bioclimatisme se définit comme un ensemble de principes de construction d'un bâtiment permettant de prendre en compte au maximum l'environnement climatique direct de celui-ci afin de créer une efficacité énergétique. Cette notion a permis d'optimiser le fonctionnement du bâtiment et le confort de l'utilisateur, mais pas d'avancer sur les questions d'impacts environnementaux (Dureix, 2010).

En Europe, le secteur du bâtiment représente 40 à 45 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Global Status Report, 2018). En France, il est à l'origine de 43 % des consommations d'énergie (Ministère de la transition écologique, 2021) et de 50 % des ressources exploitées (Formation Bâtiment Durable, 2016). Le béton conventionnel, principal matériau utilisé dans la construction, a une empreinte carbone désastreuse. Chaque seconde, dans le monde, sont coulés 190 m³ de béton, soit 6 milliards de mètres cubes par an (Planetoscope-Statistiques, 2007). Sa formulation nécessite des matériaux coûteux combinés avec du ciment, comme du sable et du gravier. L'énergie requise pour produire du ciment provient de

INTRODUCTION GÉNÉRALE

ressources fossiles non renouvelables. En France, la fabrication d'une tonne de ciment génère 600 kg de CO₂ (Infociments, 2020). À tous les stades de la production, le béton est responsable de 4 à 8 % des émissions mondiales de CO₂, ce qui est nocif pour l'environnement (Watts, 2019). Par conséquent, il est indispensable de trouver d'autres alternatives, comme les écomatériaux, pour construire des bâtiments de manière durable, économique et écologique. L'impact environnemental des activités humaines, dont l'utilisation de bâtiments, est aujourd'hui mesuré à l'aide d'un outil : l'analyse du cycle de vie (ACV). Cette analyse permet de quantifier, entre autres, les impacts environnementaux tels que l'émission de gaz à effet de serre, l'eutrophisation, la consommation d'eau, l'impact sur la santé humaine, la pollution des sols et des eaux et l'acidification des océans. Dans le cas d'un bâtiment, le cycle de vie s'étend de la construction à la déconstruction en intégrant la fin de vie de ses matériaux. On distingue l'impact du bâtiment durant son utilisation, défini principalement par l'énergie en service, de l'impact de sa construction, défini en grande partie par l'énergie grise. La notion d'énergie grise est née dans les années 1970 et correspond à la somme des énergies dépensées depuis la conception du produit jusqu'à son recyclage ou sa destruction. Les résultats quantifiés permettent de sélectionner, en connaissance de cause, le matériau le plus respectueux de l'environnement dans chaque secteur (Futura, 2018). L'énergie grise est devenue un critère de choix majeur dans le domaine de la construction, et la méthode de l'ACV est décrite dans les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044 (déclinées au niveau national).

La terre est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés au monde. Les techniques de construction en terre sont connues depuis plus de 9000 ans et le matériau peut se présenter dans d'innombrables compositions et différentes méthodes d'utilisation. Aujourd'hui, les structures des bâtiments sont plus grandes et plus complexes : des matériaux plus efficaces et durables sont nécessaires. Par conséquent, que ce soit à partir de la macrostructure ou de la microstructure, il est essentiel de mener des recherches pour comprendre les caractéristiques des écomatériaux tels que les mélanges terre-fibres végétales.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

2. Le projet CobBauge

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet européen CobBauge¹, dont l'objectif est de développer une technique de construction alliant bauge et terre allégée à partir des fibres végétales et sols locaux, afin de réduire les émissions de CO₂ par rapport à la production de matériaux de maçonnerie traditionnels.

Ce projet a été sélectionné dans le cadre du Programme européen de coopération transfrontalière INTERREG VA France (Manche) - Angleterre cofinancé par le FEDER (Fonds européen de développement régional). Il est piloté par l'université de Plymouth et associe cinq partenaires britanniques et français aux expertises complémentaires :

- ❖ Université de Plymouth (Royaume-Uni) : porteur du projet.
- ❖ École supérieure d'ingénieurs des travaux de la construction (ESITC) à Caen (France).
- ❖ Parc naturel régional des Marais du Cotentin et du Bessin, PNR MCB (France).
- ❖ Earth Building United Kingdom and Ireland, EBUKI (Royaume-Uni).
- ❖ Université de Caen Normandie, Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, LUSAC (France).
- ❖ Hudson Architects, Norfolk (Royaume-Uni).

Actuellement, ce mode de construction connaît un développement important par les qualités des matériaux, mais également par leur faible bilan carbone. En effet, outre le projet CobBauge, de nombreux projets concernant la terre crue ont été lancés et réalisés ces dernières années tant à l'échelle nationale qu'europpéenne. Voici quelques exemples de projets :

- Éco-Terra (2016-2020) est un projet de recherche visant à acquérir les connaissances scientifiques et techniques nécessaires au développement de matériaux de construction en terre allégée pour des bâtiments écologiques efficaces. Pour évaluer les ressources de différentes régions, des études ont été menées pour comprendre le lien entre la variabilité de la composition et les propriétés physiques des mélanges de sols (Colinart *et al.*, 2020). Les applications du matériau terre-chanvre étudiées dans ce projet sont larges : avec l'isolation par l'intérieur ou par l'extérieur, appliqué par banchage, projection ou en briques préfabriquées, aussi bien pour la construction neuve que la rénovation (EcoTerra, 2019).

¹ Site internet du projet CobBauge : www.cobbauge.eu

La bauge (*cob* en anglais) est un matériau de construction issu du mélange de terre et de fibres agricoles.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Le projet Alluvium (2018-2021) vise à valoriser des sols considérés comme des déchets lors des travaux de génie civil et à entretenir un patrimoine bâti ancien et futur, favorisant ainsi l'économie circulaire locale. Des essais de formulations de terre crue additionnée de matériaux biosourcés, comme des fibres végétales (telles que la ouate de cellulose), de l'amidon (issu de l'eau de cuisson du riz par exemple), des déchets agroalimentaires, ont été effectués. Une approche socio-économique complète le panel des méthodes mises en œuvre de la construction en terre crue (Bognon and Cormier, 2018).
- Primaterre est un projet qui porte sur « la rénovation et l'architecture durable : le défi des matières premières ». L'objectif principal est de proposer des méthodes de mesure et de garantie des propriétés hygrothermiques, mécaniques et sismiques des matériaux à base de terre. En particulier, le cas du pisé a été étudié. L'élaboration de programmes d'enseignement est également visée (Nabouch *et al.*, 2016).
- Le projet de recherche Tercruso a pour objectif de mieux connaître les caractéristiques physiques et environnementales des produits de construction en terre crue afin de contribuer au développement d'une filière spécialisée. Le projet a permis de contribuer au recueil des données nécessaires à la rédaction de règles professionnelles françaises de construction en terre crue, de mieux définir les protocoles d'expérimentation adaptés et de mettre en évidence les faibles impacts environnementaux des produits de terre crue (Martins *et al.*, 2019).

3. Objectifs de l'étude

L'objet de cette thèse est d'étudier les performances mécaniques et hygrothermiques d'un matériau terre-fibres végétales pour la mise en application dans la construction de bâtiments et d'étudier son comportement en situation réelle. Pour cela quatre objectifs ont été fixés :

- Construction d'un bâtiment pilote en Normandie avec un matériau terre-fibres végétales.
- Étude des matériaux et suivi du bâtiment avec des capteurs.
- Étude du comportement hygrothermique à l'échelle du matériau.
- Analyse scientifique sur le retour d'expérience.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La construction d'un bâtiment pilote permet de tester de nouvelles méthodes de mise en œuvre de bauge et de terre allégée sur chantier, et de définir une méthode de laboratoire permettant la reproduction des caractéristiques observées pour les matériaux sur chantier.

Un suivi régulier de la qualité des matériaux puis des mélanges est mis en place sur chantier, et une adaptation de l'essai Proctor au laboratoire est utilisé pour reproduire des matériaux avec les mêmes caractéristiques. Par ailleurs, un système de mesure a été mis au point pour les matériaux afin de suivre le comportement hygrothermique du bâtiment pilote, ainsi que son environnement. Pour cela, il a été choisi d'utiliser une station météorologique et des sondes de teneur en eau. Ce comportement hygrothermique est également étudié à l'échelle du laboratoire via des mesures de sorption, de porosité et des propriétés du matériau à différentes étapes du séchage. Enfin, le comportement au retrait et le tassement du matériau est étudié.

4. Organisation du manuscrit de thèse

Ce mémoire de thèse est structuré en cinq chapitres qui présentent les principaux résultats des travaux de recherche.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique et à l'état de l'art concernant les techniques de construction en terre. Nous présentons les spécificités des fibres végétales, en détaillant plus particulièrement les caractéristiques des fibres de lin et de roseau qui seront utilisées dans cette thèse, puis les performances des matériaux à base de terre et de fibres végétales. Nous décrivons également les méthodes déjà utilisées pour le suivi des bâtiments et des matériaux, notamment la mise au point d'une chaîne de mesure par capteurs dans les murs permettant de réaliser des mesures de retrait, tassement, et la méthode d'étude hygrothermique des matériaux à base de terre et de fibres végétales.

Le deuxième chapitre traite des caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition des mélanges à base de terre (bauge et terre allégée), avec une attention particulière portée aux propriétés des sols, des fibres végétales et des mélanges de bauge et de terre allégée. Les différentes méthodes de caractérisation utilisées au cours de cette thèse sont également présentées.

Le troisième chapitre est consacré au développement d'une méthode qui permet de reproduire en laboratoire les mêmes caractéristiques que la production sur chantier. Différents paramètres sont étudiés, notamment la teneur en eau, la masse volumique sèche, la résistance mécanique et la conductivité thermique. La reproduction des mélanges au laboratoire avec les

INTRODUCTION GÉNÉRALE

différentes formulations est analysée, en tenant compte de l'influence de l'énergie de compactage sur les masses volumiques.

Le quatrième chapitre aborde le traitement des données des mesures à l'échelle du bâtiment, avec l'étalonnage des capteurs, puis la mise au point d'une chaîne de mesure de température et de la teneur en eau par ces capteurs dans les murs du bâtiment expérimental.

Le cinquième chapitre porte sur l'étude de la cinétique de séchage et du comportement hygrothermique de la bauge et de la terre allégée en se basant sur les paramètres physiques, hydriques et thermiques.

Enfin, nous proposerons une conclusion générale sur la base de ces résultats de recherche, ainsi que des perspectives et recommandations pour les futurs travaux dans le domaine de la construction en terre.

CHAPITRE I
ÉTAT DE L'ART

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Cette étude bibliographique se compose de cinq parties. Tout d'abord, nous présenterons les différentes techniques de construction en terre. Puis nous nous concentrerons sur les matériaux utilisés pour la terre allégée et la bauge, c'est-à-dire la terre et les fibres. L'origine des matériaux utilisés dans la construction en terre sera décrite à partir de la littérature, ainsi que la définition des sols en géotechnique et les différentes argiles. Ensuite, nous traiterons plus particulièrement du lin et du roseau, étant donné que ces fibres seront utilisées dans les formulations de bauge et de terre allégée, avant de terminer par la présentation des différentes propriétés de la bauge et de la terre allégée. Comme il est nécessaire de mettre au point une chaîne de mesure spécifique pour obtenir des données chantier, la quatrième partie s'intéressera aux types de capteurs à utiliser, ainsi qu'à leur bonne disposition sur le prototype. Enfin, des méthodes d'études hygrothermiques appliquées aux constructions en terre seront présentées.

1. La construction en terre crue

La terre étant l'un des matériaux le plus ancien et le plus utilisé dans le domaine de la construction. Elle joue un rôle très important dans le monde de la construction en général, et dans le secteur des matériaux en particulier (Houben and Guillard, 2006). Il est estimé qu'un tiers de la population mondiale vit dans un bâtiment où la terre a été utilisée comme matériau de construction (Houben and Guillard, 2006; Minke, 2013).

Les constructions en terre sont présentes sur tous les continents, comme l'indique la **Figure 1** ci-après.



Figure 1 : Répartition de la construction en terre dans le monde (source : <http://craterre.org/>)

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Différentes des constructions modernes à base de béton armé ou des constructions métalliques, les constructions en terre crue peuvent avoir une durée de vie très longue s'il n'y a pas de risque important (comme un séisme ou des catastrophes naturelles). Plusieurs édifices construits en terre il y a des milliers d'années sont encore en bon état et témoignent de la durabilité de la construction en terre (**Figure 2**).



Figure 2 : Constructions en terre dans le monde

A) Pyramide du Soleil à Teotihuacan, Mexique (plus de 2000 ans, adobe au centre de la pyramide) ;

B) Ville de Shibam, Yémen (date du XVI^e siècle) ;

C) Grande mosquée de Djenné, Mali (construite en 1906, plus grand édifice en terre) ;

D) Grande Muraille de Chine, Chine (plus de 4000 ans) ;

E) Citadelle de Bam, Iran (plus de 2500 ans).

En outre, les matières premières pour les constructions en terre crue proviennent généralement de sources locales, dont l'extraction, la transformation et la mise en œuvre génèrent des impacts environnementaux très faibles par rapport aux matériaux modernes. Par ailleurs, les capacités de sorption et désorption du matériau terre permettent d'harmoniser la température et de réguler l'hygrométrie (Röhlen *et al.*, 2013). En Europe, jusqu'au XX^e siècle, quatre techniques de construction sont utilisées pour les constructions en terre crue (urbaine et rurale) : le torchis, la bauge, l'adobe et le pisé. Cette grande variété de constructions en terre est liée en partie à la richesse historique et culturelle des régions concernées (**Figure 3**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

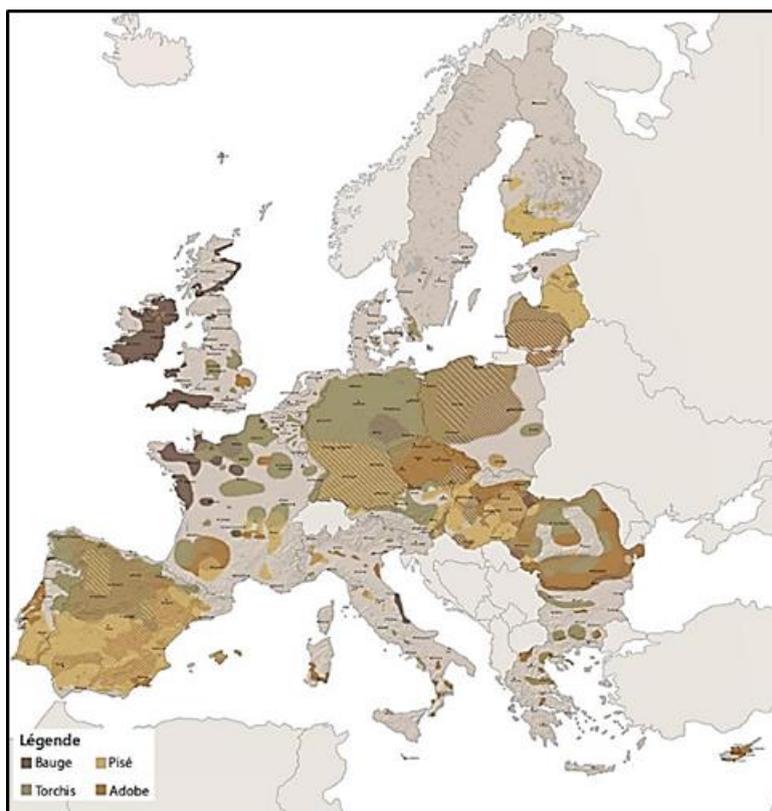


Figure 3 : Types de construction en terre en Europe (école d'Avignon, 2009)

De nombreuses civilisations ont exercé des influences sur l'architecture en terre en important leur savoir lors de leur installation en Europe. Les plus anciennes traces de construction en terre crue connues en Europe se situent autour du bassin méditerranéen, près des côtes de la mer Égée. Elles datent du VI^e millénaire avant Jésus-Christ, au moment où l'Europe centrale et occidentale connaît une grande mutation correspondant à l'extension de la culture danubienne (céramique) qui rejoint ainsi l'Ouest européen, dont la France (Guillaud, 2002). La culture constructive danubienne pose les guides techniques et typologiques du torchis et de la bauge tels que l'orientation des bâtiments contre les vents dominants et l'ensoleillement. Ces premières constructions utilisent le torchis, la bauge et l'adobe, tandis que la technique du pisé se développe vers les IV^e et III^e siècles av. J.-C. dans les régions d'Europe du Nord. À l'âge du fer (750-50 av. J.-C.), les territoires celto-gaulois avaient développé un habitat en oppidums² (Kurta, 2015). L'adobe et le pisé (mur monolithique de terre compactée entre banches) sont les deux principaux systèmes constructifs retrouvés.

² Oppidum : nom donné par les historiens à un type d'habitat protohistorique fortifié que l'on trouve en Europe occidentale et centrale.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

L'étude des anciennes constructions en terre a permis d'établir une carte de la répartition des modes de construction principalement utilisés en France métropole (**Figure 4**). Cette architecture est présente dans la quasi-totalité du paysage bâti de la France, à l'exception des zones de hautes altitudes où la pierre prédomine.

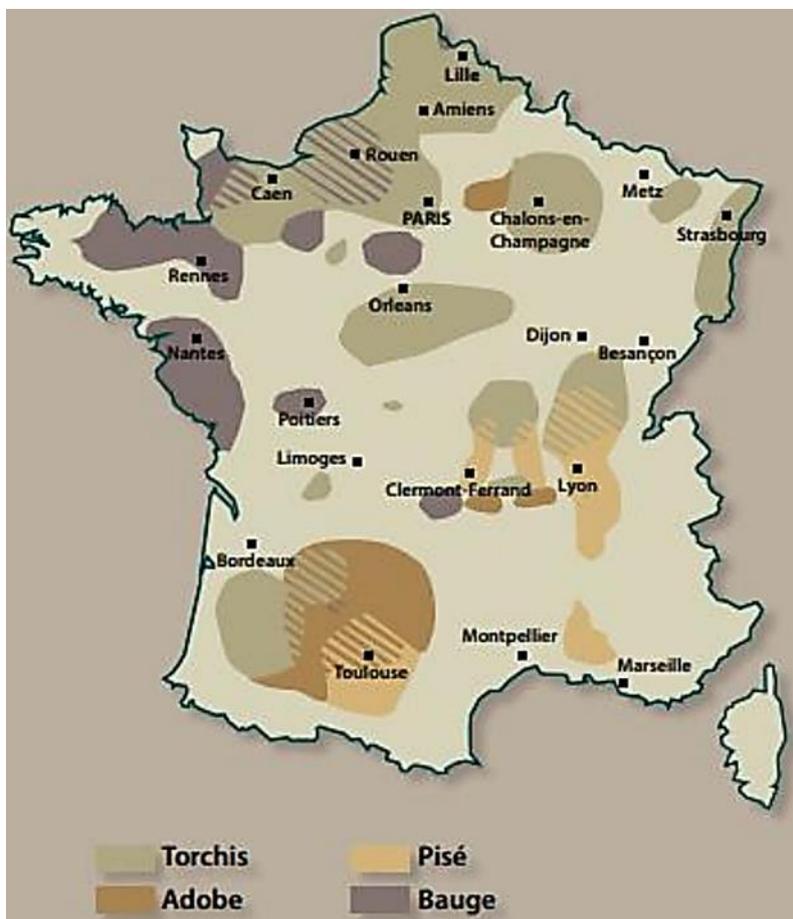


Figure 4 : Répartition des typologies constructives en terre crue en France (école d'Avignon, 2009)

Cette carte met en évidence quatre zones correspondant aux différentes techniques. Le torchis est prédominant dans le Nord-Ouest et le Nord-Est de la France, plus précisément de la Normandie à l'Alsace en passant par le Nord-Pas-de-Calais. La bauge est située en grande partie sur le massif armoricain dans le Nord-Ouest de la France, du département de la Manche à la région des Pays de la Loire et de la Bretagne. Le Sud-Ouest a privilégié l'adobe, du fait de son climat, de la composition de la terre possédant peu de cailloux et sous certaines influences. L'adobe est surtout présent en Midi-Pyrénées (Haute-Garonne, Gers, Tarn). Dans la région du Sud-Est, la technique du pisé prédomine, en particulier dans la région Auvergne-Rhône-Alpes : 75 % de l'habitat rural du département de l'Isère est en pisé (Delahousse, 2011). Certaines régions, comme l'Occitanie ou la Nouvelle-Aquitaine, possèdent plusieurs techniques de construction formant une composition architecturale riche et variée, alliant parfois ces techniques sur une même bâtisse. En effet, aujourd'hui encore, le torchis est

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

visible dans de nombreuses régions, telles que la Normandie, la Picardie, l'Artois, la Champagne, l'Alsace, l'Île-de-France, l'Orléanais, le Berry, le Maine, la Bretagne, le Bourbonnais, la Bourgogne, la Gascogne et le Pays basque, et présente des typologies différentes, plus ou moins anciennes, de bâtiments agricoles et de maisons d'habitation construites en pans de bois.

En 2010, une étude de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) révèle que la terre crue représente 15 % du patrimoine bâti français au début des années 1980, soit plus de 2,5 millions de bâtiments. Cependant, ce chiffre global ne reflète pas la réalité régionale avec des taux plus élevés pour certaines régions (Guillaud, 2002). Dans la région Rhône-Alpes, comprenant le Dauphiné, le Lyonnais et le Val de Saône, la Bresse, la Loire, l'Ardèche et la Drôme rhodaniennes, les constructions en terre crue représentent environ 40 % du patrimoine bâti, alors que dans le nord de la France, de la Normandie à l'Alsace, elles sont proches de 60 %. Les avantages environnementaux ont donné lieu dans les années 1980 à la renaissance de la construction en terre crue et la tendance à réhabiliter ce type de construction est de plus en plus présente dans les pays européens.

Parmi les quatre techniques de construction les plus présentes en Europe citées précédemment, la bauge est une méthode très intéressante grâce à sa simplicité, à son excellente capacité d'isolation et à son comportement mécanique original. C'est la technique qui permet de construire des murs massifs et porteurs comme le pisé mais sans coffrage, avec une très faible énergie de compactage et une tolérance plus large en teneur en eau. De plus, la résistance du mur en bauge est plus importante que celle du torchis et sa conductivité thermique est meilleure que celle du pisé ou des BTC (briques de terre comprimée) (Miccoli *et al.*, 2014). La présence des fibres permet d'obtenir non seulement une bonne ductilité, mais aussi une diversité dans le choix des composants pour le mélange. Grâce à cette variété de mélanges, nous pouvons établir plusieurs formules selon l'objectif de construction. Les différentes techniques de construction en terre sont caractérisées dans la **Figure 5**.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

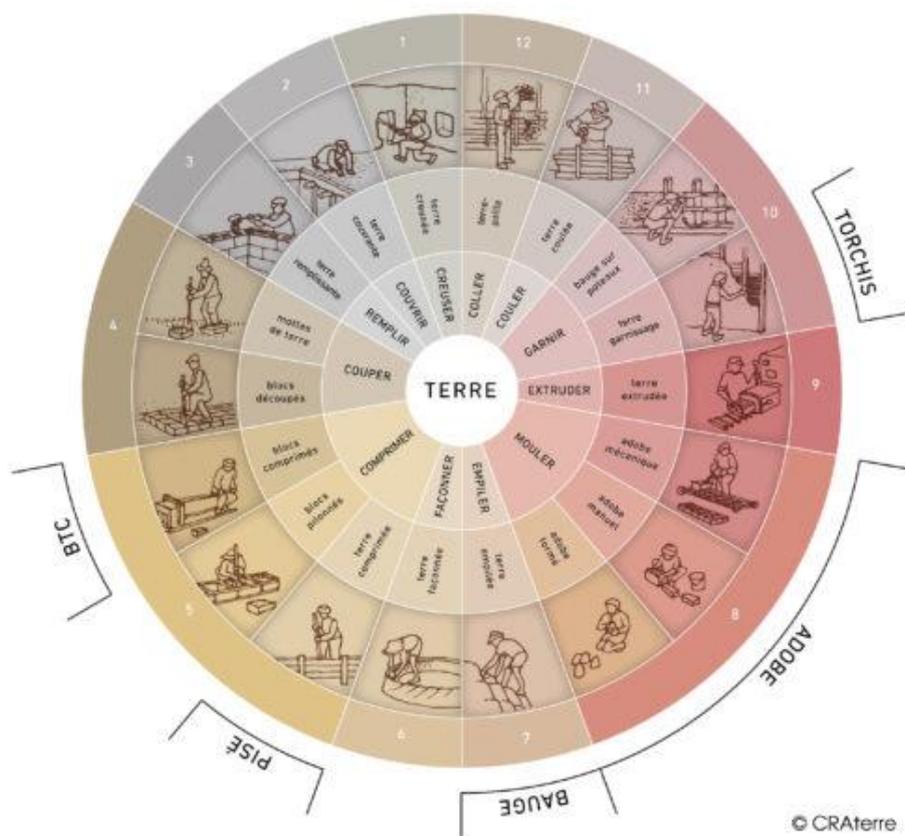


Figure 5 : Les techniques de la construction en terre (Houben and Guillaud, 1984)

1.1 Le torchis

Les terres à torchis sont des mélanges mis en œuvre à l'état plastique, étalés sur un lattis en bois, en osier ou en bambou, ou sur un clayonnage (**Figure 6**), fixés dans une ossature porteuse en bois appelée pan de bois ou colombage selon les régions. Elles sont généralement constituées d'éléments fins, argileux, collants et contenant peu de sable (Dewulf, 2015). La forte ressource en bois en Europe a permis de développer la technique du torchis pan de bois que l'on connaît actuellement, avec l'assemblage des pièces du bâti parfois complexe et recherché. Il a aussi été utilisé dans les zones tropicales humides d'Afrique et d'Amérique du Sud. Plusieurs sites sont classés au patrimoine mondial de l'UNESCO : les centres médiévaux de Strasbourg et de Provins en France, la ville de Diamantina au Brésil, les maisons ottomanes de Safranbolu en Turquie, les tombeaux des rois du Buganda en Ouganda. Contrairement aux trois autres techniques, le torchis composé en partie de terre crue n'est pas une construction porteuse à elle seule. La structure porteuse en bois est ensuite garnie du torchis. Après séchage, elle est généralement enduite de terre, parfois stabilisée à la chaux ou avec un mélange chaux-sable (Röhlen *et al.*, 2013).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART



Figure 6 : Maison en torchis pan de bois, Saint-Georges-de-Rouelley (Huret, 2019)

Lattis permettant d'accrocher le torchis (2019)

L'ajout de fibres permet de réduire la fissuration du mélange au séchage et d'améliorer la stabilité de la structure et la résistance aux intempéries (Röhlen *et al.*, 2013). On peut distinguer deux grands types de mélange (AsTerre, 2018) :

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

1.2 L'adobe

L'adobe est une brique de terre crue façonnée à la main ou moulée dans un coffrage en bois ou métallique. Elle est ensuite séchée pendant quelques jours à l'air libre ou sur des aires couvertes pour être ensuite maçonnerie comme une brique en terre cuite avec un mortier en terre (**Figure 7**). Cette brique est un mélange d'argiles, de limons, de sables et d'eau afin d'obtenir un état plastique. Tout comme le torchis, des fibres peuvent être ajoutées au mélange pour réduire les fissures lors du séchage. L'édification de voûtes et de coupôles dans la continuité des murs en adobe permet de couvrir les bâtiments sans recourir à d'autres matériaux qui peuvent être rares et chers, comme le bois dans certaines régions. À la différence de la brique de terre cuite, elle ne subit aucune cuisson. L'adobe permet de répondre à toutes les contraintes architecturales grâce à la fabrication de briques de dimensions variables. Pour construire diverses structures comme des murs, des piliers, des arcs, des voûtes ou des coupôles, il est possible d'utiliser différents gabarits : $60 \times 40 \times 5 \text{ cm}$,

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

45 × 30 × 5 cm, 50 × 36 × 5 cm, 40 × 30 × 6 cm (Costi de Castrillo *et al.*, 2017). La conductivité thermique de l'adobe est estimée aux alentours de 1,1 W.m⁻¹.K⁻¹, pour une masse volumique de 1780 kg.m⁻³ (Dao *et al.*, 2018). Ses performances mécaniques sont d'environ 2,5 MPa en compression et 1 MPa en flexion.

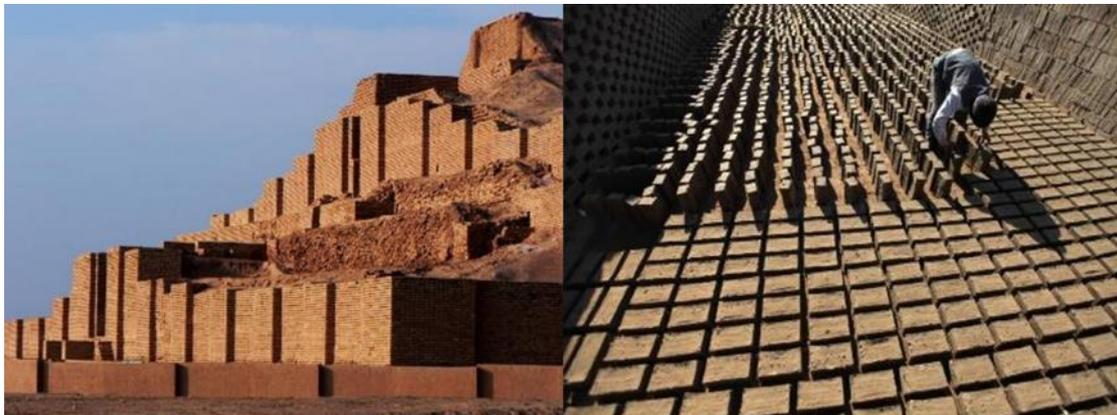


Figure 7 : La ziggourat de Tchoga Zanbil en Iran construite vers 1250 avant J.-C. (CRAterre, 2017) (*à gauche*)

Séchage des briques crues (Laboratoire Archéorient, 2017) (*à droite*)

Des briques de terre en forme de pain façonnées à la main vers 8000 av. J.-C. ont été découvertes à Jéricho en Cisjordanie et à Mureybet en Syrie. Les plus anciennes briques produites dans des moules sont arrivées environ mille ans plus tard et ont été repérées à Çatal Höyük, en Turquie. Une vingtaine de centres historiques en adobe sont classés au patrimoine mondial, dont Shibam au Yémen, Tombouctou au Mali, Alep en Syrie et Lima au Pérou en Amérique latine.

1.3 Le pisé

Le pisé est un mélange de terre graveleuse, très faiblement amendé d'eau, que l'on compacte en couches successives de terre pulvérulente d'environ 20 cm de hauteur dans un coffrage mobile, les « banches », pour l'élévation d'un mur (**Figure 8**). Le compactage peut être réalisé à l'aide d'une dame manuelle en bois ou en métal, d'un fouloir pneumatique, d'un marteau-piqueur ou d'une plaque vibrante. Ce procédé consiste à construire des murs massifs et porteurs de plus de 50 cm d'épaisseur afin d'assurer leur intégrité (Houben and Guillard, 2006). Le mélange étant à peine humide, le décoffrage est immédiat. Les strates compactées restent visibles, avec une texture riche par son grain et sa couleur. À cause de l'intensité du travail, le pisé est un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés. Dans certains pays, la réglementation exige une stabilisation avec environ 10 % de ciment. La forte proportion de cailloux et de graviers dans la terre en fait une sorte de béton de terre. Le pisé a été utilisé

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

pour la première fois à Carthage en 814 av. J.-C. (Delahousse, 2011). De nombreux sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO en témoignent : tronçons de la Grande Muraille de Chine, palais du Potala au Tibet et de l'Alhambra à Grenade, ksar d'Aït-Ben-Haddou au Maroc... En France, le pisé est traditionnel en Auvergne et surtout en Rhône-Alpes (40 % de l'architecture vernaculaire et plusieurs immeubles du Vieux Lyon). Sa renaissance doit beaucoup aux livres de l'architecte-entrepreneur François Cointeraux (1740-1830).



Figure 8 : Construction d'un mur en pisé (Abreu e lima *et al.*, 2016)

Le pisé ne peut être mis en œuvre qu'avec une teneur en eau précise, avec une faible marge de tolérance (Röhlen *et al.*, 2013). La teneur en eau usuelle est aux alentours de 8-12 % (Raj S. *et al.*, 2018). Le diamètre maximal des grains est de 5 cm et la présence des grains de plus de 5 mm de diamètre permet d'obtenir une résistance mécanique plus importante (Houben and Guillard, 2006). Une teneur en argile importante augmente le risque de retrait.

La masse volumique du pisé est comprise entre 1700 et 2400 kg.m⁻³ (François *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 minimale de 2 MPa s'il est porteur et une résistance à l'abrasion suffisante (Röhlen *et al.*, 2013). Généralement, le ciment est utilisé dans une proportion de 3 % à 6 % pour augmenter la résistance mécanique tout en limitant les impacts environnementaux (Suresh and Anand, 2017). Le dosage optimal de la chaux varie de 6 % à 12 % ; au-delà, la résistance à la compression diminue (Jayasinghe and Kamaladasa, 2007). La conductivité thermique du pisé varie en fonction de la masse volumique, entre 0,86 et 1,01 W.m⁻¹.K⁻¹ pour une masse volumique de 1980 à 2120 kg.m⁻³ (Hall and Allinson, 2009).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

1.4 Les BTC et BTCS

Les briques de terre comprimée (BTC) et les briques de terre comprimée stabilisée (BTCS) sont obtenues par compression de la terre dans des presses et sont immédiatement démoulées contrairement aux briques d'adobe (**Figure 9**). Pour la construction de blocs de terre compressée, Houben *et al.* recommandent un sol contenant : 0-40 % de gravier, 25-80 % de sable, 10-25 % de limon et 8-30 % d'argile (Houben and Guillard, 2006). Pour les BTCS, en général, 3 à 19 % de chaux hydraulique ou de ciment sont utilisés, avec une moyenne de 6 à 8 %.

La résistance en compression moyenne d'une brique est de 2,5 à 4 MPa. Dans certains cas particuliers, les briques de terre atteignent 12 MPa (Röhlen *et al.*, 2013). Les BTCS sont plus résistantes que les BTC, la résistance en compression est de 2,5 à 4 MPa pour les BTC et de 2 à 6 MPa pour les BTCS avec 8 % de ciment (Touré *et al.*, 2017). L'épaisseur minimale d'un mur porteur en BTC ou BTCS doit être de 20 cm. Il y a une corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique des BTC : les valeurs moyennes de la conductivité thermique augmentent de 0,52 à 0,93 W.m⁻¹.K⁻¹ lorsque la masse volumique augmente de 1500 à 2100 kg.m⁻³ (Zhang *et al.*, 2018).

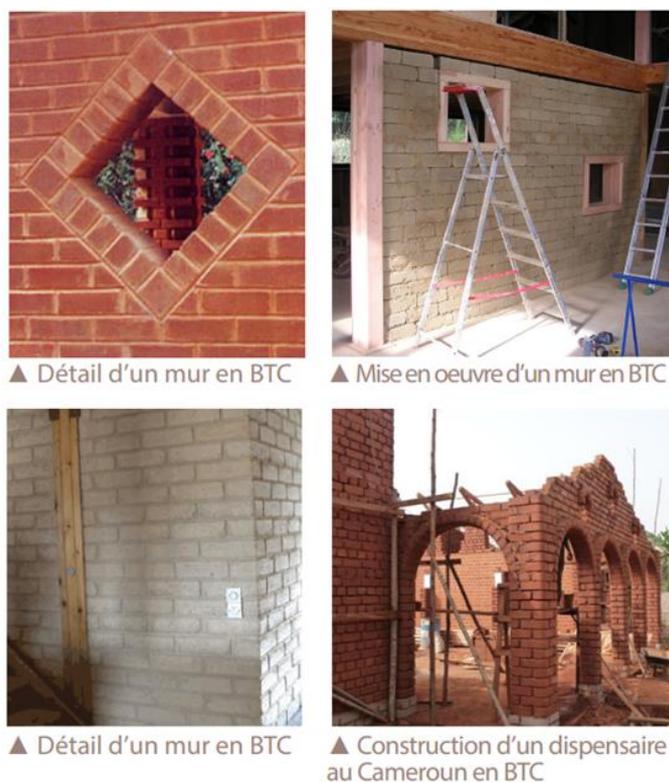


Figure 9 : Construction en BTC (Ecopôle, 2010)

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

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, etc.). Cependant, le coût de ces matériaux est plus important (Houben and Guillard, 2006).

1.5 La bauge

La bauge est la technique la moins mécanisée des techniques de construction citées précédemment. Elle est issue d'un mélange de terre additionnée de fibres, d'eau et parfois d'éléments minéraux (éclats de silex), afin de former une pâte maniable mise en œuvre sans coffrage, constituant des murs massifs et porteurs (**Figure 10**). Cette technique est généralement constituée d'un empilement de boules de terre, qui sont ensuite piétinées afin de former un mur monolithe. La surface peut ensuite être retaillée pour épouser au mieux la forme souhaitée.



Figure 10 : Maison d'artisan en bauge à Gévezé en Ille-et-Vilaine (*à gauche*)

Bâtiment agricole à Saint-Barnabé dans les Côtes-d'Armor (Atelier ALP, 2018) (*à droite*)

Le mur en bauge a une épaisseur allant de 40 à 60 cm, voire plus suivant l'étude structurelle. En France, les murs en bauge nécessitent un léger fruit, c'est-à-dire une largeur au sommet moindre qu'à la base. Les murs sont composés de couches successives de 60 à 80 cm de hauteur. Les murs sont ensuite compactés avec une dame et retaillés avec un outil tranchant. Après la constitution d'une couche, les faces sont battues pour éviter les fissures au séchage, puis taillées afin d'obtenir une surface plane. La version rurale française consiste à entasser à la fourche des paquets de terre, mais dans la plupart des régions du globe, les murs sont façonnés à la main comme une sculpture géante. La péninsule arabique possède de magnifiques exemples de construction en bauge, mais la bauge est aussi présente dans l'architecture vernaculaire africaine (Burkina Faso, Bénin, Ghana, Nigeria, etc.) et dans le patrimoine rural du Devon anglais et des Abruzzes italiennes, sans oublier les bourrines vendéennes et les longères bretonnes et normandes (Manche).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Les premières recherches ont présenté une étude plus approfondie sur la technique de la bauge, en la comparant à d'autres méthodes (Goodhew *et al.*, 2021; Keefe, 2012; Miccoli *et al.*, 2017; Minke, 2012; Röhlen *et al.*, 2013). Ces auteurs présentent la bauge comme un matériau qui a des caractéristiques intéressantes avec une meilleure durabilité dans le temps que les autres techniques de construction. La présence de fibres végétales permet d'obtenir des caractéristiques originales par rapport à d'autres méthodes. La méthode de la bauge peut être utilisée à l'heure actuelle ; néanmoins, des recherches sur la bauge comme écomatériau composite sont en cours afin d'améliorer la capacité portante des bâtiments en bauge et d'optimiser la méthode de mise en œuvre avec des solutions innovantes. Quelques résultats concernant les propriétés mécaniques et thermiques de la bauge sont présentés dans les **Tableau 1** et **Tableau 2**.

Tableau 1 : Conductivité thermique de la bauge selon la littérature

| Référence | Masse volumique [kg.m^{-3}] | λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] |
|----------------------------------|--|---|
| Goodhew <i>et al.</i> , 2021 | 1419 | 0,45 |
| Röhlen, Ziegert and Mochel, 2013 | 1400-1700 | 0,60-0,80 |
| Minke, 2000 | 1200-2000 | 0,47- 0,93 |

Tableau 2 : Résistance à la compression de la bauge selon la littérature

| Référence | σ [MPa] |
|-----------------------------------|----------------|
| Jiménez Rios and O'Dwyer, 2020 | 0,59-1,41 |
| Quagliarini and Maracchini, 2018 | 1,12-1,35 |
| Miccoli <i>et al.</i> , 2017 | 1,59 |
| Röhlen, Ziegert and Mochel, 2013 | 0,6-1,3 |
| Keefe, 2012 | 0,6-1,4 |
| Saxton, 1995 | 1,65 |
| Ziegert, 2006 | 0,7-1,2 |
| Akinkurolere <i>et al.</i> , 2006 | 0,6–2,2 |

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

1.6 La terre allégée

La terre allégée ou terre-paille à faible densité est une technique récente appliquée pour le remplissage de coffrage autour d'une ossature bois intégrée. Elle est constituée d'une terre argileuse (10 à 20 %) enrobant des granulats végétaux (80 à 90 %) : roseaux, tiges de colza, paille de chanvre, aiguilles de pin, copeaux de bois ou de chanvre, liège, etc. (**Figure 11**). La masse volumique sèche des mélanges varie entre 200 et 1200 kg.m⁻³. La mise en œuvre est réalisée à l'état humide, par projection mécanisée ou préfabrication (*Guides de Bonnes Pratiques de la Construction en Terre Crue*, 2018).



Figure 11 : Briques de terre allégée de la Maison de Soufflenheim (S'Lehmbau Atelier, 2017)

Dans l'ensemble des systèmes constructifs en terre, l'isolation n'était pas un élément majeur jusqu'au début du XX^e siècle. Le système de chauffage de ces habitats était généralement concentré dans une seule pièce, la notion de confort était alors bien différente d'aujourd'hui. C'est à la fin du XX^e siècle que la gestion de la température dans l'habitat évolue, avec la nécessité d'isoler les bâtiments suivant des réglementations thermiques ou des recommandations afin d'obtenir un meilleur confort thermique (Gallo, 2006). Les isolants sont donc des matériaux relativement nouveaux, permettant de répondre à un besoin de confort thermique dans l'ensemble de l'habitat. L'apparition des premiers isolants, à base de matériaux locaux peu transformés et simples à mettre en œuvre, semble liée à la guerre. C'est en Allemagne que l'on retrouve la plus ancienne construction en terre allégée (terre-paille), datant de la sortie de la Première Guerre mondiale (Marcom, 2011). La terre allégée se différencie du torchis par une proportion bien plus importante de fibres, la terre venant simplement lier les fibres entre elles. Cette technique est confirmée en Allemagne en 1944, puis fait l'objet d'une norme en 1951 (Horst, 2018). L'Allemagne d'après-guerre ayant peu accès au pétrole, cette technique permettait la reconstruction malgré les restrictions des pays occidentaux.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

En France, le premier mélange de terre allégée est constitué de chanvre et de chaux ; il apparaît en 1986 sous le nom de « béton de chanvre » (Jean-Claude Daniel *et al.*, 2019). En parallèle, les recherches sur les isolants biosourcés commencent, la production scientifique augmente progressivement jusqu'à aujourd'hui, où plusieurs techniques de construction en terre allégée sont étudiées. Le mélange chaux-chanvre est particulièrement étudié et le chanvre en général est le matériau issu de la biomasse le plus étudié parmi les isolants (Liu *et al.*, 2017).

2. Les sols

2.1 Généralités

Dans la littérature, les auteurs s'accordent sur l'origine des matériaux employés pour la construction en terre. Ils sont extraits du sol local, ont une teneur minimale en argile et très peu ou pas de matière organique (Bui *et al.*, 2020; Hall and Allinson, 2009; Jaquin and Augarde, 2012; Keefe, 2012).

Les sources des matériaux adaptés à la construction en terre concernent tous les matériaux meubles disponibles à la surface de la terre, c'est-à-dire le « sol » dans sa définition géotechnique. Ces matériaux sont produits par des processus géologiques, météorologiques et pédologiques. L'étude de ces matériaux concerne donc la géologie, la géomorphologie, la pédologie, l'agronomie et la géotechnique. Les limites entre ces disciplines ne sont pas claires et les termes et définitions utilisés sont différents, parfois incohérents, et finalement confus (Briaud, 2013; Ehlen, 2005).

Par définition, le mot « sol » désigne différents éléments en fonction du domaine d'étude. En pédologie, le sol correspond aux premières couches vivantes, contenant une quantité importante de matière organique. Puis se succèdent des couches de roches altérées avant d'atteindre la roche non altérée. La pédologie s'attache à étudier la pédogénèse, c'est-à-dire la formation et l'évolution des sols, notamment dues au phénomène d'altération des roches (Balesdent *et al.*, 2015). Dans notre étude, nous porterons une attention particulière à cette variabilité et à son influence sur les performances d'un matériau de construction.

En géotechnique, nous considérons le sol comme toutes les couches situées au-dessus de la roche dure non altérée. La géotechnique étudie le sol comme élément porteur pour l'implantation de bâtiments et le définit comme un ensemble de matériaux, liés ou non, existant naturellement et couvrant les cent premiers mètres de la croûte terrestre (Briaud, 2013). La **Figure 12** présente une synthèse de ces différents éléments de la surface jusqu'à la roche non altérée.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

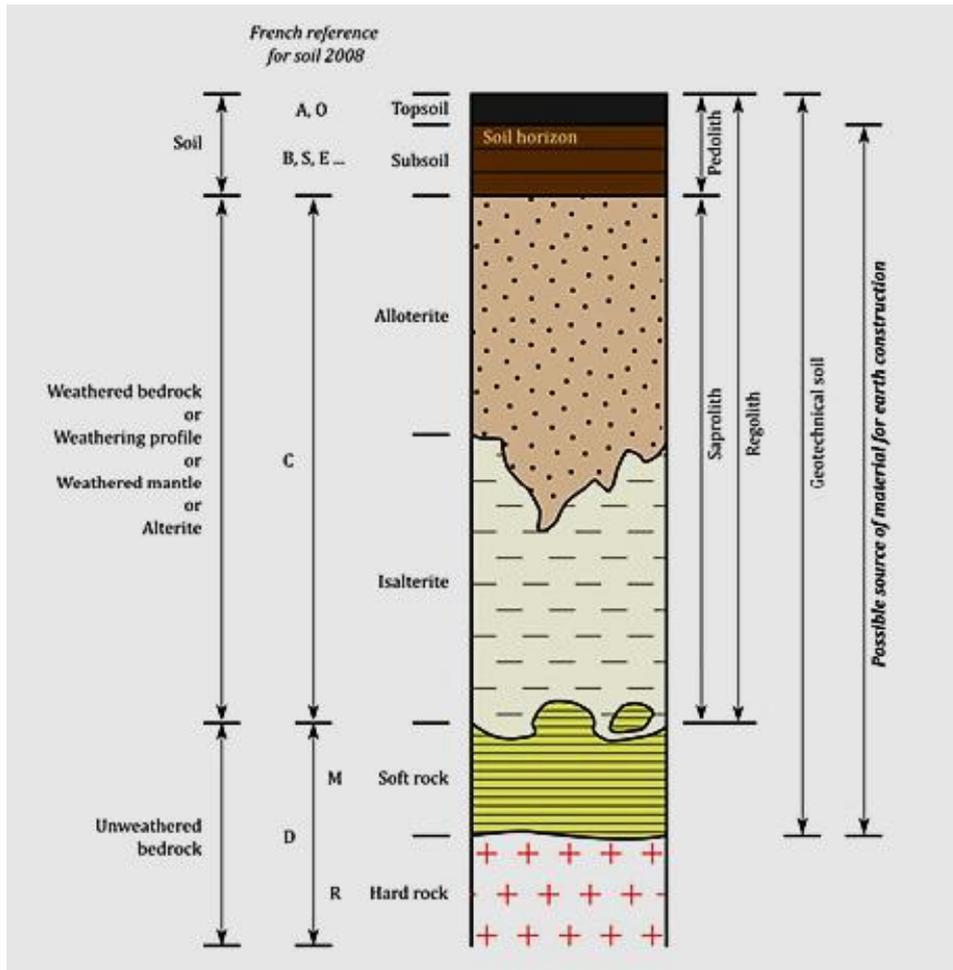


Figure 12 : Section verticale de matériaux altérés allant de la surface du sol au substratum rocheux non altéré, selon les définitions de plusieurs disciplines (Hamard *et al.*, 2013)

2.2 Évaluation de la qualité du sol pour la construction

Grâce à l'héritage de leurs prédécesseurs et à leur propre expérience, les anciens bâtisseurs avaient une connaissance spécifique de la manière de choisir la terre pour la construction (Keefe, 2012; Lahure, 1985; McCann, 2008). Ces connaissances ont été transmises oralement et faisaient appel à des sens tels que le toucher, la vue, l'odorat, le goût et l'ouïe, et nécessitaient un long apprentissage aux côtés d'un expert (Akinwumi *et al.*, 2015; Lahure, 1985). Aujourd'hui, ce savoir est perdu en Occident, et différentes approches sont proposées pour l'évaluation de l'aptitude de la terre dans le contexte de la construction moderne.

L'aptitude de la terre à la construction peut être déterminée grâce à une approche géotechnique visant à améliorer la résistance mécanique du sol, donc en améliorant la résistance mécanique des échantillons de terre en laboratoire (Ciancio *et al.*, 2013). Le critère le plus fréquemment cité pour évaluer l'aptitude de la terre est la texture, c'est-à-dire

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

l'équilibre entre les teneurs en argile, limon, sable et gravier (Jiménez Delgado and Guerrero, 2007). Le rapport des vides est minimisé afin d'augmenter le contact entre les particules du sol selon la formule de Fuller (Jaquin and Augarde, 2012; Maniatidis and Walker, 2003). Par conséquent, des approches de granulométrie adaptées à chaque technique de construction en terre ont été proposées dans la littérature (Hulst and Hulst, 1981; Lanas and Alvarez-Galindo, 2003; Morel and Charef, 2019; Viel *et al.*, 2018). Cependant, la texture de la terre recueillie dans les bâtiments du patrimoine en terre vernaculaire ne s'adapte pas à ces approches granulométriques (Amziane *et al.*, 2017; Laribi *et al.*, 2008). Ainsi, les enveloppes de classement disponibles dans la littérature n'ont pas réussi à rendre compte de la diversité de la terre traditionnellement utilisée dans l'architecture vernaculaire.

2.3 Structure des argiles

Plusieurs auteurs ont étudié l'origine des argiles. Selon Velde, 1992 (Velde, 1992), deux types de processus à la surface de la terre sont à l'origine des minéraux argileux : le premier est lié principalement à l'instabilité des minéraux silicatés et le second est relié au processus de la précipitation. Dans la croûte terrestre, les minéraux argileux sont le résultat des processus de recristallisation. Pour Jackson *et al* 1952 (Jackson *et al.*, 1952), les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles.

La phase solide du système argileux peut-être décrite à partir de trois unités structurales et de l'arrangement mutuel de ces unités : le feuillet, la particule et l'agrégat (Touret *et al.*, 1990). Les argiles sont constituées de minéraux dont les particules sont essentiellement des phyllosilicates (**Figure 13**).

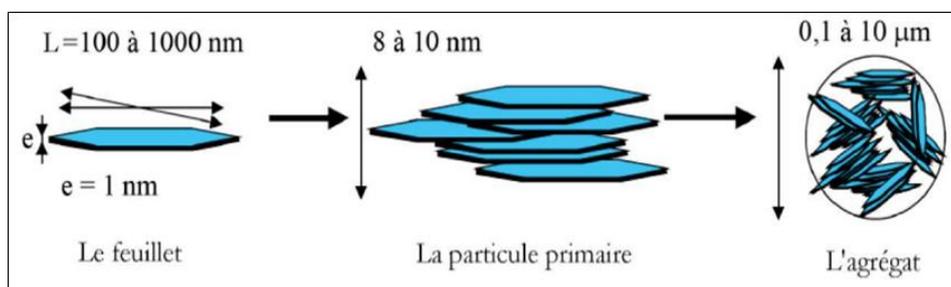


Figure 13 : Unités structurales de la montmorillonite (Touret *et al.*, 1990)

La structure des feuillets est organisée en plans ioniques successifs. Ces plans ioniques sont composés d'anions O^{2-} ou OH^- entre lesquels se dispersent des cations, particulièrement Si^{4+}

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

et Al^{3+} (Bouchet *et al.*, 2000). Les plans ioniques s'empilent pour former des couches tétraédriques (T) ou octaédriques (O). Ces couches s'assemblent pour former deux types de feuillets élémentaires (T-O ou T-O-T). Les feuillets s'accolent entre eux pour former des éléments ou unités structurales. L'espace situé entre deux feuillets argileux est appelé espace interfoliaire. Ce dernier peut être vide ou contenir des cations, secs ou hydratés, et peut même contenir des groupes hydroxyles ou des couches. L'assemblage des feuillets selon différentes dispositions (face-face et/ou face-bord) forme les particules argileuses (**Figure 14**).

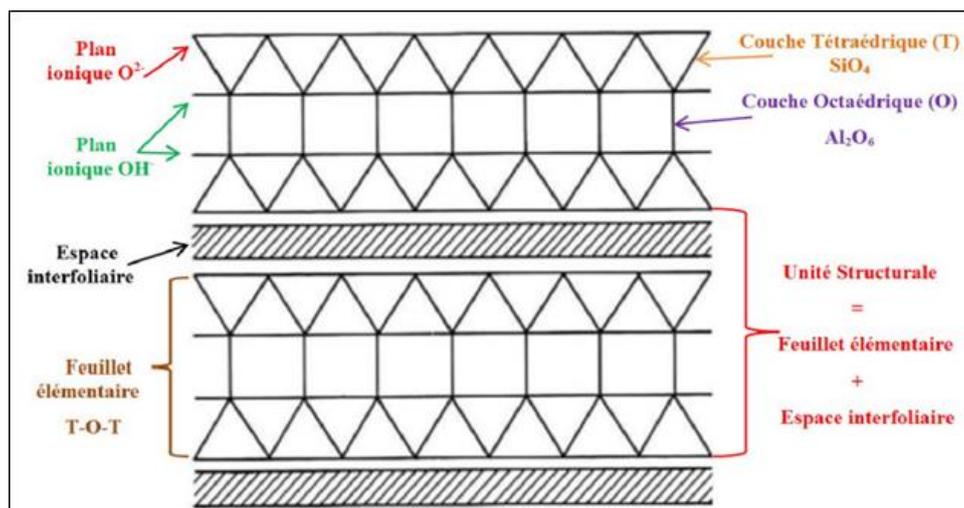


Figure 14 : Schéma d'une structure des phyllosilicates type T-O-T (Eid, 2012)

Les feuillets des phyllosilicates sont formés à partir de la combinaison de couches tétraédriques et octaédriques (**Figure 15**) :

- Couche tétraédrique (T) : le tétraèdre, de formule générale SiO_4 , est composé de quatre anions d'oxygène (O^{2-}) entourant un atome de silicium (Si^{4+}). Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches tétraédriques planes. Son épaisseur est de 4,6 Å.
- Couche octaédrique (O) : l'octaèdre, de formule générale Al_2O_6 , est composé de six anions hydroxyles (OH^-) enserrant deux atomes d'aluminium (Al^{3+}). Ces octaèdres se combinent entre eux pour former des couches octaédriques planes. Son épaisseur est de 5,05 Å.

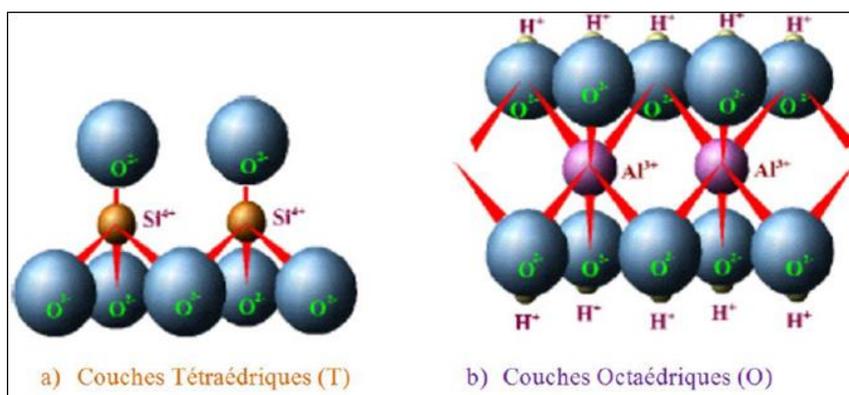


Figure 15 : Schéma d'une structure des phyllosilicates type T-O-T (Lasledj, 2009)

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

3. Les fibres végétales

3.1 Généralités

Par définition, les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les proportions de ces constituants dépendent de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante (Michaud, 2003). Depuis le XIX^e siècle, le développement de l'agriculture a permis d'obtenir des fibres végétales (Petitjean, 2003). Plusieurs variétés de fibres végétales provenaient de sources locales (Weismann and Bryce, 2010), à savoir : la paille issue de différents types de plantes (lin, blé, seigle, orge, lavande, chanvre, riz, etc.), des fibres broyées (chènevotte, anas de lin, roseaux, etc.), des granulats végétaux (balles de grains, colza, tournesol, copeaux de bois) ou minéraux (pouzzolane, argile cuite expansée, etc.).

Cette diversité reflète l'adaptation du processus de construction en terre-fibres selon les ressources disponibles dans l'environnement. De plus, la valorisation des fibres végétales permet une réduction de l'impact environnemental par rapport à l'utilisation des fibres polymères, compte tenu de leur caractère renouvelable, neutre en émissions de CO₂ et économe en énergie de production (Baley, 2005). Les fibres végétales utilisées dans la bauge ont été classées par Baley selon l'organigramme de la **Figure 16**.

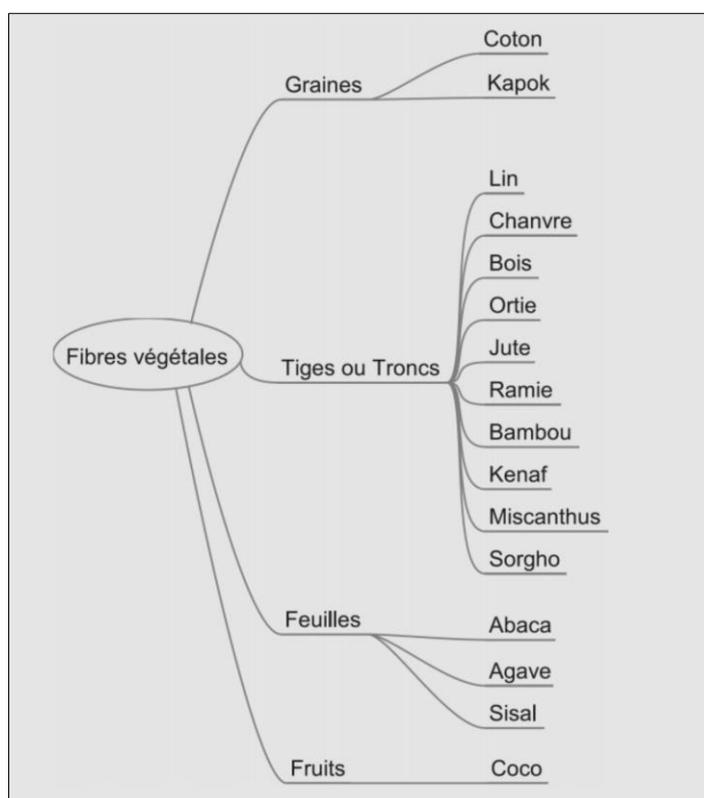


Figure 16 : Classification des fibres végétales (Baley, 2005)

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Le **Tableau 3** synthétise l'action des fibres à l'intérieur d'un mélange à base de terre selon la littérature (Danso, 2014, p. 90; Laborel-Préneron *et al.*, 2016; Röhlen *et al.*, 2013; Watson and McCabe, 2011).

Tableau 3 : Action des fibres à l'intérieur d'un mélange à base de terre selon la littérature

| Référence | Action des fibres |
|---------------------------------------|---|
| Laborel-Préneron <i>et al.</i> , 2016 | Répartir les fissures de retrait sur toute la masse du mur. |
| Danso, 2014 | Améliorer l'homogénéité du matériau, la résistance du mur et la résistance aux intempéries. |
| Röhlen, Ziegert and Mochel, 2013 | Rendre l'utilisation plus facile. |
| Watson and McCabe, 2011 | Faciliter le mélange. Accélérer le processus de séchage. Isoler le mur thermiquement. |

Le rôle essentiel des fibres dans la bauge est de diminuer le phénomène de retrait comme démontré dans les travaux de Bouhicha, 2005.

Concernant la conductivité thermique, Keefe a montré que sa réduction pour une paroi en bauge n'est significative que si le taux de fibres ajouté au mélange est important (environ 25 % en masse), sachant que la teneur en fibres de la bauge est généralement comprise entre 1 et 3,5 % en masse (Keefe, 2012).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé de la paille de lin et du roseau broyé. Nous allons donc présenter plus longuement les caractéristiques de ces deux plantes.

3.2 Le lin

Le lin est une plante de la famille des linacées et du genre *Linum*, avec plus de 200 espèces, dont la *Linum usitatissimum* est la plus répandue. Le lin est constitué d'une tige dont l'extrémité est formée de plusieurs petites fleurs bleues. Elle contient sur toute sa hauteur de longues fibres qui lui confèrent sa rigidité. Le lin est une fibre naturelle destinée à des applications multiples et innovantes, comme le textile.

Le lin est produit dans plusieurs pays du monde, notamment en Europe. La France est le premier producteur de lin fibre au monde avec 95 000 tonnes par an (**Tableau 4**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Tableau 4 : Production annuelle de lin dans le monde (Planetoscope-Statistiques, 2007)

| | Pays | Quantité (tonnes) |
|-------------------|-------------|--------------------------|
| Europe de l'Ouest | France | 95 000 |
| | Pays-Bas | 4 000 |
| | Belgique | 13 000 |
| Europe de l'Est | Biélorussie | 21 000 |
| | Ukraine | 6 000 |
| | Pologne | 1 500 |
| | Lituanie | 750 |
| Reste du monde | Russie | 20 000 |
| | Égypte | 7 000 |
| | Chine | 5 000 |

La France est le principal producteur de textile de lin en Europe et la qualité de la fibre de lin française est reconnue dans le monde entier. Les secteurs de production sont situés en Normandie, en Bretagne, en Picardie et dans le Nord-Pas-de-Calais. La Normandie, grâce à ses conditions climatiques exceptionnelles et au savoir-faire de ses liniculteurs, reste le bassin de production privilégié pour cette culture. Les liniculteurs normands assurent en effet 60 % de la production française et 45 % de la production européenne transformée (Planetoscope-Statistiques, 2007).

Le lin connaît un renouveau spectaculaire. En France, les surfaces cultivées sont passées de 5 000 à 15 000 hectares pour le lin graine entre 2002 et 2007. Le lin fibre (la variété utilisée pour le textile) a vu ses surfaces passer de 30 000 à 75 000 hectares dans le même temps (Planetoscope-Statistiques, 2007).

Les fibres de lin présentent des caractéristiques physiques et mécaniques prometteuses dans les matériaux composites (Dittenber and GangaRao, 2012). Nous allons donc présenter quelques caractéristiques morphologiques, biochimiques, physiques et mécaniques des fibres de lin.

3.2.1 Caractéristiques morphologiques

Les fibres de lin sont extraites des tiges de lin dont la hauteur varie de 80 cm à 120 cm pour un diamètre de 1 à 3 mm (**Figure 17**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART



Figure 17 : Paille de lin sous forme de balle (projet CobBauge)

Une fibre végétale est assimilable à un matériau multicouche composé de parois cylindriques concentriques. Elle est composée d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire. Cette dernière est constituée de trois couches : S1, S2 et S3 (**Figure 18**). Les trois couches S1, S2 et S3 se différencient par leur composition biochimique, par leur épaisseur ainsi que par leur arrangement interne. La couche S2 est la plus épaisse puisqu'elle occupe environ 80 % de l'épaisseur de la paroi végétale. Par conséquent, elle conditionne le comportement de l'ensemble.

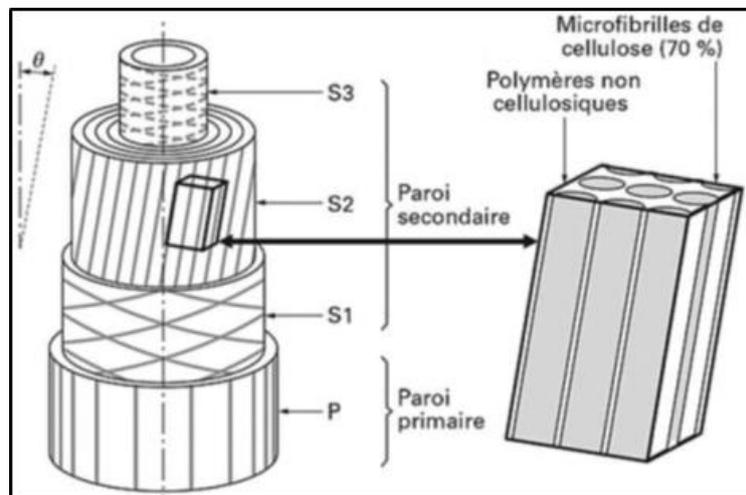


Figure 18 : Schéma de la microstructure d'une fibre végétale (Baley, 2002)

La section de la tige de lin est constituée, de la périphérie vers le centre, de l'épiderme, du cortex, du phloème (qui contient entre 20 et 40 faisceaux fibreux), du cambium, du xylème et d'une lacune (**Figure 19**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

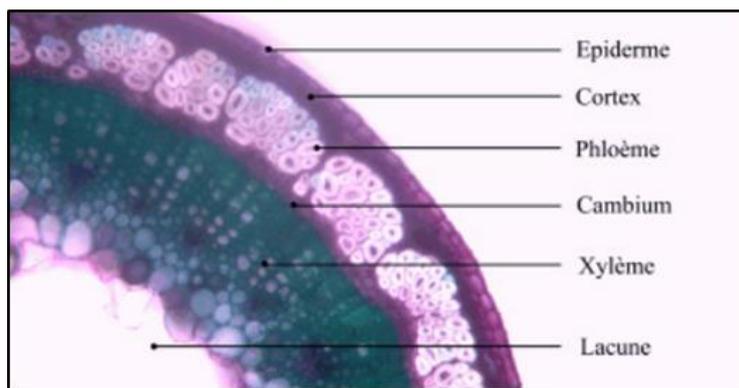


Figure 19 : Section de tige de lin au microscope optique (Charlet, 2008)

3.2.2 Propriétés physiques

La masse volumique du lin se situe aux alentours de 1540 kg.m^{-3} (Harris, 1954). Cependant, la méthode de mesure et les conditions climatiques influent sur la masse volumique du lin (Charlet, 2008). Étant donné que la porosité d'une fibre de lin est de l'ordre de 10 %, la masse volumique est donc de 1380 kg.m^{-3} (Sinha, 1974). Les fibres de lin ont une longueur généralement comprise entre 5 et 80 mm, avec une moyenne de 30 mm. Le diamètre d'une fibre de lin est d'environ $20 \mu\text{m}$. Les différentes valeurs trouvées dans la littérature sont présentées dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Données bibliographiques sur les dimensions d'une fibre de lin

| Référence | L (mm) | D (μm) |
|------------------------------|--------|---------------------|
| Page, 2017 | 10 | 14 |
| Rowell, Han and Rowell, 2000 | 9-70 | 5-38 |
| Harris, 1954 | 4-77 | 5-76 |
| Bossuyt, 1941 | 30-80 | 8-21 |

3.2.3 Propriétés mécaniques

L'intérêt de la fibre de lin est lié à ses bonnes propriétés mécaniques, dues en partie à la création de nombreuses liaisons hydrogène le long et entre les chaînes de cellulose (CARMA, 2006). Les essais de traction sur des fibres de lin sont délicats à mettre en place du fait des faibles dimensions de la fibre. Généralement, ces essais nécessitent des cellules de force de faible capacité et des mors adaptés. La courbe charge-déplacement typique d'une fibre de lin issue d'un essai de traction est composée de deux parties linéaires séparées par un domaine non linéaire (**Figure 20**) (Baley, 2002). La première partie linéaire de la courbe est associée à

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

la mise en charge globale de la fibre. La partie suivante est interprétée comme une déformation viscoélastique de la fibre, correspondant à un réarrangement des parties amorphes dans les parois cellulaires et à un alignement progressif des microfibrilles sur l'axe de traction. Enfin, la dernière partie linéaire correspond à la déformation élastique de la fibre avec sa nouvelle organisation fibrillaire (Thuault, 2011). Au travers des essais de traction cyclique charge-décharge, Baley a noté une augmentation progressive du module de Young avec le nombre de cycles (Baley, 2002). Il explique cette augmentation par une réorientation progressive des microfibrilles de cellulose avec l'axe de l'effort.

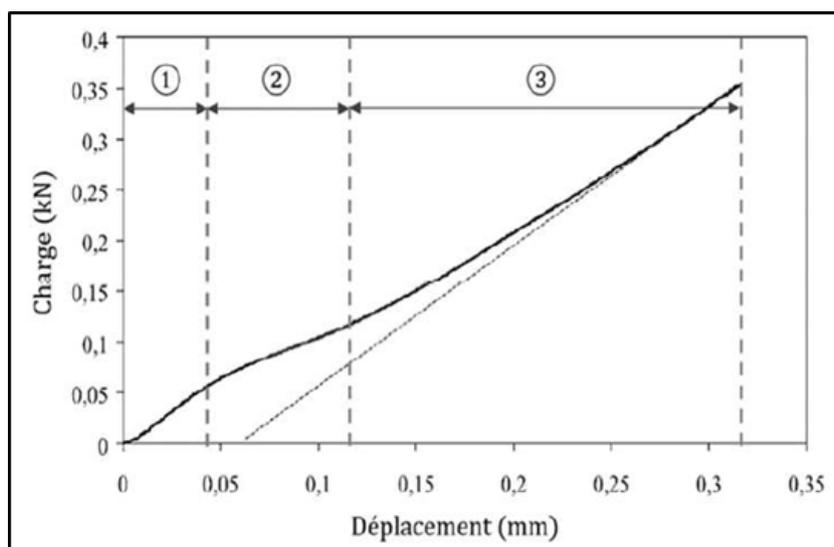


Figure 20 : Courbe typique charge-déplacement d'un essai de traction sur une fibre de lin (Baley, 2002)

À partir de cette courbe, il est possible de calculer la contrainte à la rupture σ_r , la déformation à la rupture ϵ_r et le module d'élasticité E. Le **Tableau 6** présente les valeurs trouvées dans la littérature.

Tableau 6 : Données bibliographiques sur les propriétés mécaniques d'une fibre de lin

| Référence | σ_r (MPa) | ϵ_r (%) | E (GPa) |
|--|------------------|------------------|---------|
| Centre of Lightweight structures, 2005 | 800-1500 | 1,2-1,6 | 60-80 |
| Oksman, 2001 | 600-1100 | 1,5-2,4 | 45-100 |
| Van de Velde and Kiekens, 2001 | 900 | 1,8 | 50 |
| Van den Oever <i>et al.</i> , 2000 | 600-1500 | 1,4 | 50-80 |
| Baley, 2002 Batra, 1998 Davies and Bruce, 1998 | 600-2000 | 1-4 | 12-85 |
| Sridhar <i>et al.</i> , 1982 | 345-1035 | 2,7-3,2 | 28 |

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

3.2.4 Propriétés hygroscopiques

La fibre de lin possède des propriétés hydrophiles importantes provoquant des gonflements et des retrait hygroscopiques dans les fibres (Faruk *et al.*, 2012). Les différents composants chimiques du lin font varier les propriétés mécaniques avec le taux d'humidité et la température (Cousins, 1976). La morphologie des pailles de lin liée à leurs parties poreuses diminue leur masse volumique, ce qui augmente leur capacité hygroscopique (Azwa *et al.*, 2013). L'interaction entre les fibres de lin et l'eau peut entraîner des conséquences sur le comportement des composites de terre et de fibres de lin à l'état frais comme à l'état durci. Le **Tableau 7** synthétise les coefficients d'absorption d'eau des fibres végétales les plus couramment utilisées comme renforts de composites. Les valeurs présentées proviennent de différentes études ayant pour but de mesurer les valeurs d'absorption d'eau de fibres végétales après 24 heures d'immersion.

Tableau 7 : Coefficient d'absorption d'eau de différentes fibres végétales

| Référence | Nature des fibres | Absorption (%) |
|------------------------------------|-------------------|----------------|
| Magniont, 2010 | Lin | 136 ± 25 % |
| Chafei, 2014 | | 152 ± 6 % |
| Magniont, 2010 | Chanvre | 158 ± 30 % |
| Ramakrishna and Sundararajan, 2005 | Jute | 281 % |
| | Sisal | 200 % |
| | Coco | 180 % |

3.2.5 Comportement thermique

Le comportement thermique de la fibre de lin est similaire à celui d'autres fibres végétales, comme le chanvre par exemple (Magniont, 2010). Des analyses thermogravimétriques (ATG) ont permis de déterminer le comportement thermique des fibres de lin (**Figure 21**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

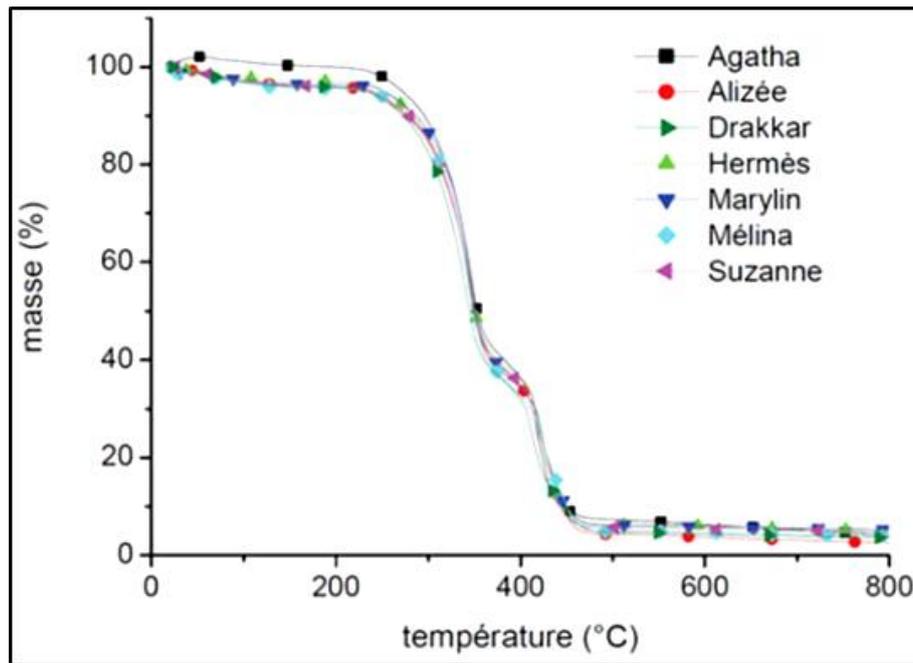


Figure 21 : Analyse thermogravimétrique de différentes variétés de fibres de lin (Thuault, 2011)

- Entre 20 et 220 °C, la perte de masse est d'environ 8 %. Elle correspond principalement à l'évaporation de l'eau libre contenue dans la fibre et à l'élimination d'éléments volatiles (Thuault, 2011).
- Entre 220 et 300 °C, la perte de masse est un peu plus importante (environ 20 %). Cela est caractéristique de la décomposition des éléments les moins stables thermiquement comme les hémicelluloses non structurales (Yao *et al.*, 2008), les graisses et les cires (Sedan *et al.*, 2007).
- Une première diminution très importante de la perte de masse est observée entre 300 et 350 °C. Elle correspond au début de la décomposition de la cellulose (Sedan *et al.*, 2007).
- La deuxième perte de masse importante qui survient entre 350 et 450 °C serait due à la décomposition des pectines (Sedan *et al.*, 2007). Toutefois, selon Mellon, elle pourrait aussi correspondre à la décomposition des hémicelluloses structurales (Mellon and Sharma, 2002). Enfin, d'autres auteurs attribuent cette perte de masse à la décomposition des particules de charbon, résidus de la décomposition des composants principaux (Yao *et al.*, 2008).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

3.3 Le roseau

Le roseau commun (*Phragmites australis*) appartient à la famille des graminées. C'est la plante vasculaire la plus répandue dans le monde (Clevering and Lissner, 1999). Le roseau est abondant dans les milieux naturels, surtout dans les zones humides, vaseuses ou inondées autour des marais, des lacs, des étangs, des fleuves, des fossés de drainage et autres voies d'eau à faible débit (Maheu-Giroux and De Blois, 2007).

Le roseau est utilisé par l'homme dès la préhistoire comme revêtement des toits et des sols, brise-vent et barrière, mais également pour se chauffer. Des fragments de roseau de 40 000 ans ont été retrouvés dans le Sud-Ouest des États-Unis, démontrant le caractère natif de celui-ci dans cette région (Swearingen and Saltonstall, 2012). En France, le chaume est un matériau naturel à base de roseau utilisé depuis des millénaires pour réaliser des toitures et protéger l'homme dans son habitation.

3.3.1 Morphologie

Le roseau commun est composé d'une tige solide dont la taille est comprise entre 1,5 et 4 m, et dont le diamètre varie de 5 à 15 mm à la base (**Figure 22**). Cette tige est divisée en tronçons séparés par des nœuds, les feuilles (ou limbes) sont plates et rigides et peuvent mesurer jusqu'à 60 cm de long et 8 à 60 mm de large, s'effilant en pointe. La ligule (appendice de la feuille des graminées, limite entre la gaine et le limbe) peut atteindre 1,5 mm de long et est bordée d'une frange de poils (Honoré, 2020).



Figure 22 : Fibres de roseau sous forme de bottes

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

3.3.2 Propriétés hygroscopiques

Gendelis *et al.*, 2019₂ ont réalisé pour le roseau des mesures d'adsorption et de désorption à la vapeur d'eau en utilisant la méthode gravimétrique dynamique, conformément à la norme ISO 12571. Les échantillons ont été séchés pour minimiser leur teneur en eau initiale. Ensuite, les échantillons ont été maintenus à une température de 23 °C, et dans une humidité relative de 50 % puis de 80 %, jusqu'à ce que la teneur en eau se stabilise, ce qui a été déterminé en pesant périodiquement les échantillons. La **Figure 23** présente les résultats de la teneur en eau à l'équilibre obtenus pour les processus d'adsorption et de désorption. Les processus d'augmentation (adsorption) et de diminution (désorption) créent une courbe d'hystérésis, ce qui est typique des matériaux poreux. D'après la **Figure 23**, nous constatons que :

- À 60 % d'humidité relative, le roseau présente des teneurs en eau de 11,9 % pour l'absorption et 12,8 % pour la désorption.
- À 90 % d'humidité relative, le roseau présente des teneurs en eau de 37 % pour l'absorption et 23 % pour la désorption.

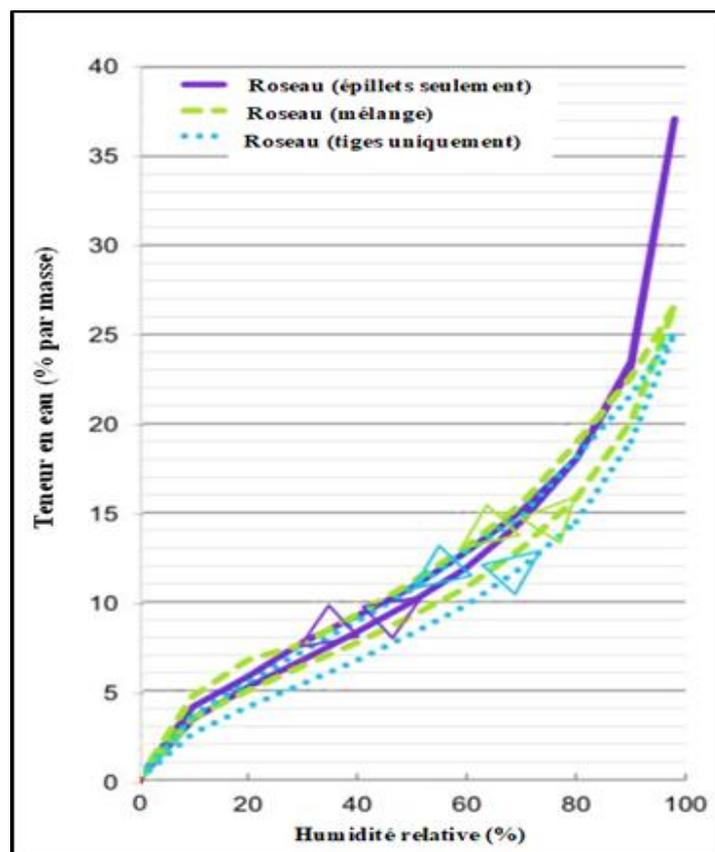


Figure 23 : Mesures des propriétés de sorption-désorption hygroscopique du roseau (Gendelis *et al.*, 2019)

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

3.3.3 Comportement thermique

Des ATG en dynamique ont été réalisées par Honoré pour évaluer la température de début de dégradation des charges végétales (Honoré, 2020). L'échantillon subit une augmentation de température de 20 à 700 °C sous un balayage d'air à une vitesse de 3 °C par minute. La masse de l'échantillon est relevée en temps réel, permettant ainsi de tracer la courbe de perte de masse en fonction de la température. La dérivée de cette perte de masse peut également être tracée pour permettre de distinguer plus précisément les pics liés à la dégradation des différents composés (cellulose, hémicellulose, lignine, etc.). Les résultats des ATG en perte de masse des farines des deux roseaux phragmites (Bretagne et Brenne) sont présentés dans la **Figure 24**.

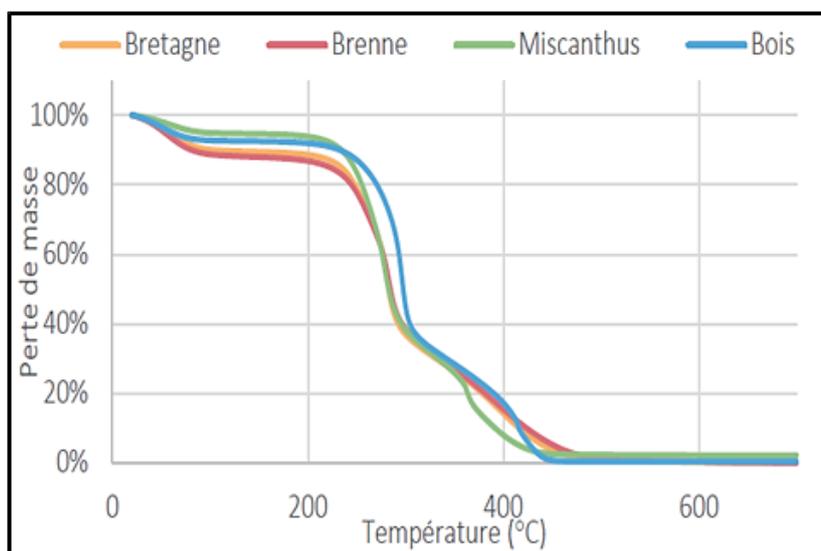


Figure 24 : Analyses thermogravimétriques des farines végétales en perte de masse (Honoré, 2020)

La perte de masse aux alentours de 100 °C correspond à l'évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon. Les farines de phragmites contiennent environ 10 % d'eau. La dégradation des farines débute à 220° C pour les deux roseaux avec une perte de masse de 5 µg/s.

Concernant la conductivité thermique, Asdrubali *et al.*, 2015 ont mesuré différents types d'échantillons avec la méthode de la plaque chaude gardée sur un isolant thermique biosourcé en roseau servant également de barrière acoustique. Les mesures ont été effectuées sur l'isolant dans différentes configurations des panneaux de roseau : orientations différentes du peigne, combinaison de différentes géométries du peigne, variation de l'épaisseur et de la masse volumique des panneaux et variation de la teneur en eau des roseaux. Les valeurs de conductivité thermique mesurées varient de 0,055 à 0,056 W.m⁻¹.K⁻¹ pour des masses volumiques de 130 à 190 kg.m⁻³.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

4. Caractéristiques des matériaux à base de terre et de fibres végétales

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont travaillé sur les procédures de fabrication des composites à base de terre et de fibres végétales, et sur le rôle des fibres végétales sur les propriétés physiques (masse volumique, retrait, absorption d'eau et isolation acoustique), mécaniques (résistance à la compression et module élastique, résistance à la traction et à la flexion), hygrothermiques (perméabilité à la vapeur, sorption-désorption et conductivité thermique) et de durabilité (résistance à l'eau, résistance à l'érosion éolienne, résistance au gel/dégel, biodégradation et développement de micro-organismes).

4.1 Propriétés physiques

4.1.1 Masse volumique

Cette propriété est importante, car elle peut être corrélée à de nombreuses propriétés du matériau à base de terre mélangée à des fibres, telles que les propriétés thermiques ou mécaniques.

L'augmentation de la teneur en fibres a conduit à une diminution de la teneur en terre et donc à une diminution de la masse volumique du composite (Demir, 2006; Khedari *et al.*, 2005). Par exemple, une teneur en résidus de coton de 40 % en volume a engendré une diminution de 29 % de la masse volumique du composite (Algin and Turgut, 2008). Notons que les masses volumiques de toutes les fibres végétales utilisées dans les références étudiées étaient inférieures à celle de la terre.

La **Figure 25** synthétise les masses volumiques sèches des matériaux terre-fibres étudiés en fonction de leur teneur massique en fibres. Les valeurs sont classées en fonction de la technique de construction. La diminution globale de la masse volumique avec l'augmentation de la teneur en fibres est bien illustrée, bien qu'une grande dispersion des valeurs puisse être notée, notamment pour les plus faibles teneurs en particules. Par exemple, pour une teneur en fibres de 10 %, la masse volumique est comprise entre 1010 kg.m^{-3} et 1810 kg.m^{-3} (Goodhew and Griffiths, 2005).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

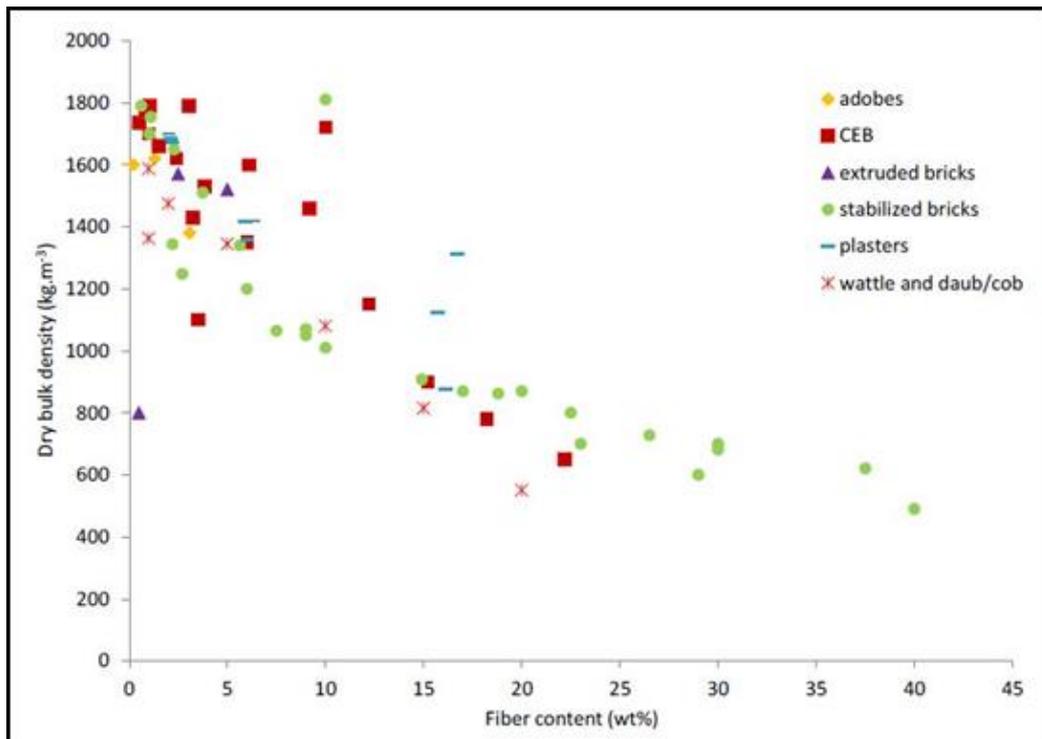


Figure 25 : Masse volumique sèche de différents matériaux en fonction de la teneur en fibres (Laborel-Préneron *et al.*, 2016)

4.1.2 Retrait

Le retrait est une variation dimensionnelle du matériau causée par l'évaporation de l'eau juste après la fabrication. Cette diminution de volume engendre des contraintes internes qui peuvent conduire à des fissures de retrait. Dans plusieurs études (Bouhicha *et al.*, 2005; Eid *et al.*, 2015; Hamard *et al.*, 2013), l'ajout de granulats ou de fibres végétales a permis de limiter la fissuration, car les particules s'opposaient à la déformation, limitant ainsi la contraction du sol et renforçant la matrice, en particulier pour les fibres longues où l'adhésion entre la fibre et la matrice était meilleure (Bouhicha *et al.*, 2005).

Dans une étude de Ghavami *et al.*, 1999, la longueur optimale des fibres de sisal pour réduire le retrait est de 5 cm pour une teneur en poids de 4 %. La réduction du retrait s'est produite plus tôt avec la paille (Bouhicha *et al.*, 2005) en raison de la structure creuse des tiges, ce qui a permis de réduire les risques de retrait. En effet, la structure creuse des tiges permet une évaporation accélérée de l'eau. En revanche, l'utilisation de plus de 10 % de résidus végétaux en poids n'est pas recommandée en raison de l'augmentation excessive des fissures de retrait engendrées.

Akinkurolere *et al.*, 2006, ont étudié le taux de séchage ainsi que les pertes d'eau réelles d'échantillons de bauge aux dimensions initiales similaires pour permettre une comparaison.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Les taux de séchage ne semblent pas être influencés par la présence de paille ou par la teneur en humidité et sont relativement uniformes jusqu'à ce que le retrait linéaire cesse. La **Figure 26** illustre la teneur en eau des échantillons en fonction de la teneur en paille lorsque le retrait a cessé. Ce sont les mélanges qui contenaient le plus de paille et qui nécessitaient le plus d'eau pour obtenir un mélange approprié qui ont eu tendance à se rétrécir le plus.

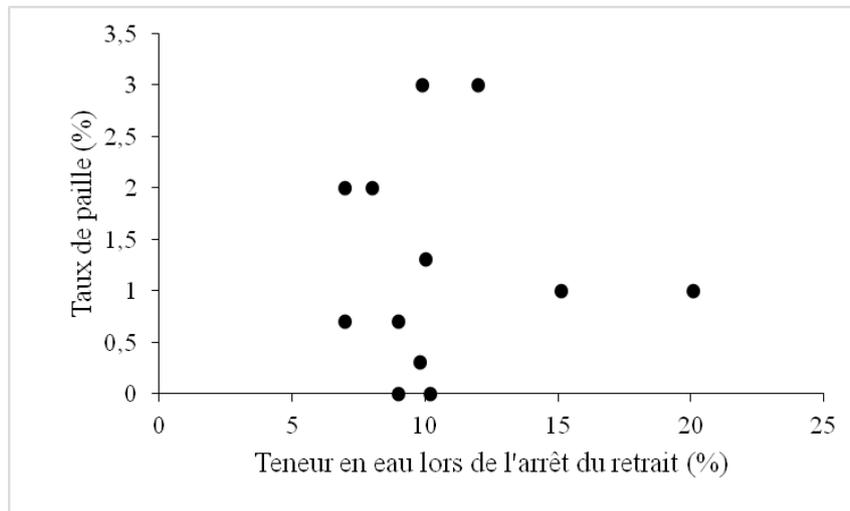


Figure 26 : Retrait par séchage des échantillons de bauge (Akinkurolere *et al.*, 2006)

Selon Sangma and Tripura, 2020, en faisant varier la température de 30 °C à 70 °C, les valeurs moyennes de retrait linéaire pour les échantillons non stabilisés et non renforcés vont de 3,18 % à 6,46 % pour des teneur en eau correspondantes de 31,7 % à 40,0 % (**Figure 27**). Nous pouvons observer que, pour une température donnée, la valeur du retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en eau. De plus, il y a une augmentation du retrait avec l'augmentation de la température de séchage de 30°C à 70°C, quelle que soit la teneur en eau.

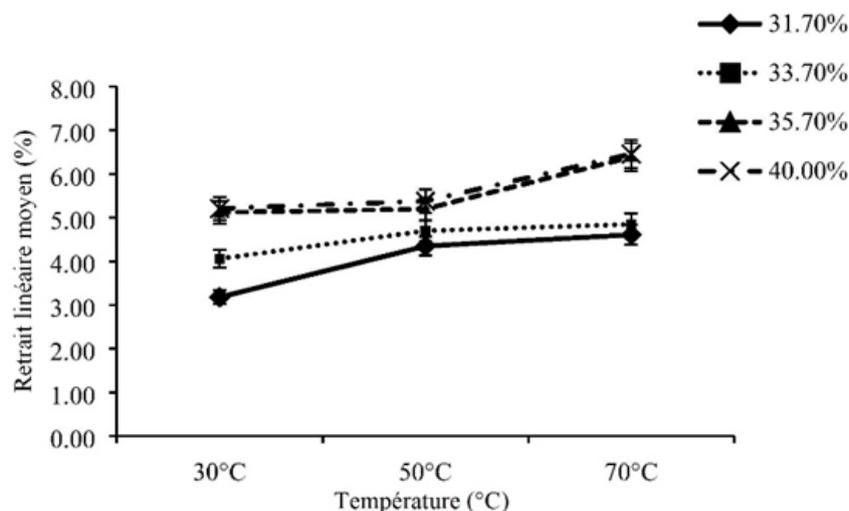


Figure 27 : Effet de la température sur le retrait d'échantillons non stabilisés et non renforcés

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

À une température de 30 °C à 70 °C et avec 3 % à 10 % de fibres de coco, le retrait linéaire varie de 0,7 % à 1,79 % pour une teneur en eau correspondante de 31,7 % à 40,0 % (**Figure 28**). La masse volumique sèche de l'échantillon diminue avec l'augmentation de la température. Un comportement de retrait similaire peut être observé avec la paille de fibre. Le retrait linéaire augmente d'environ 0,3 % lorsque la température augmente de 30 °C à 70 °C.

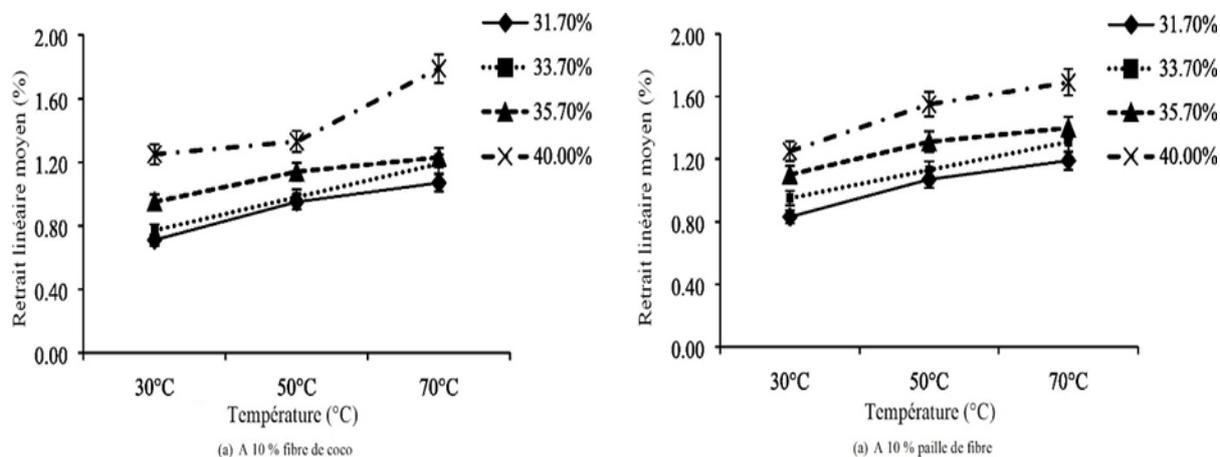


Figure 28 : Effet de la température sur le retrait des échantillons renforcés par des fibres

4.1.3 Absorption d'eau

L'influence des fibres sur l'absorption d'eau par les composites a été peu étudiée. Concernant les enduits, l'absorption n'est pas un critère indispensable, car ils sont supposés être à l'intérieur du bâtiment ou protégés de la pluie (Faria *et al.*, 2016). L'absorption d'eau par le matériau peut être mesurée par immersion ou par capillarité. Cependant, il est intéressant de mesurer comment les composites sont affectés par les remontées capillaires qui peuvent se produire à partir du sol. D'après les résultats, les blocs non stabilisés ne résistent pas à l'immersion (Achenza and Fenu, 2006; Chee-Ming, 2011).

Plusieurs études ont montré que l'absorption d'eau augmente avec la teneur en fibres. Dans Algin and Turgut, 2008, la quantité d'eau absorbée est proportionnelle à la teneur en déchets de coton. L'augmentation de la teneur en coton de 40 % (en volume) entraîne le doublement de l'absorption d'eau du matériau (de 12,5 % à 27,2 %). Dans Taallah *et al.*, 2014, l'augmentation de la teneur en fibres de 0,2 % conduit à une augmentation de l'absorption d'eau et du gonflement. L'effet de l'absorption d'eau par les fibres est important sur leur adhésion à la matrice. Le gonflement des particules, engendré par l'absorption d'eau pendant les 24 premières heures, repousse le sol. Après le séchage, le volume des particules diminue et des vides se créent autour d'elles (Ghavami *et al.*, 1999; Segetin *et al.*, 2007a) (**Figure 29**).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

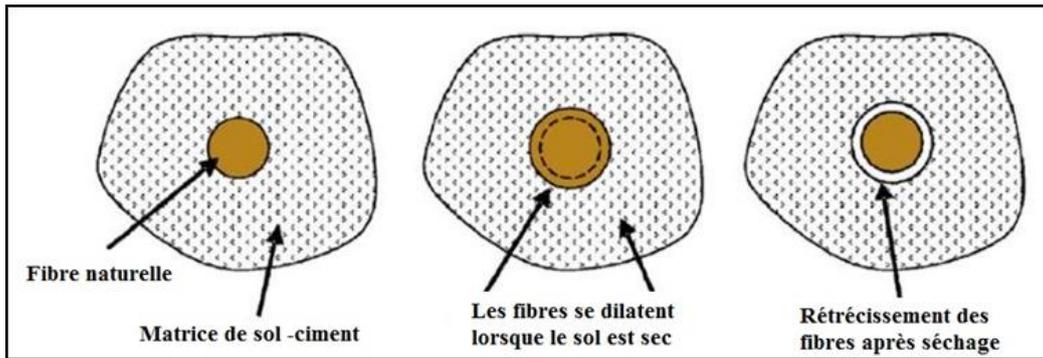


Figure 29 : Effet de l'absorption de l'eau sur la cohésion de fibres mélangées à la terre
(Segetin *et al.*, 2007a)

4.2 Propriétés mécaniques

De nombreuses études ont porté sur la détermination des propriétés mécaniques. Cependant, étant donné l'absence de normes établies, les paramètres d'essais (procédure, dimensions, formulation) varient selon les études. Par conséquent, une comparaison des valeurs obtenues ne pourra être effectuée, mais des tendances générales seront déterminées.

L'effet de l'ajout de fibres végétales sur la résistance à la compression diffère d'un auteur à l'autre (Binici *et al.*, 2005; Bouhicha *et al.*, 2005; Chee-Ming, 2011; Demir, 2008, 2006; Galán-Marín *et al.*, 2010; Millogo *et al.*, 2014; Yalley and Kwan, 2013). Par exemple, Bouhicha *et al.*, 2005, ont montré que la résistance de la terre la plus argileuse (entre 28 et 40 % d'argile) était améliorée de 10 à 20 % par l'ajout de 1,5 % de paille d'orge. Pour Demir, 2006, l'augmentation de la résistance est due à la composition des résidus utilisés, qui contiennent d'autres composants en plus de la cellulose. L'ajout de fibres d'ananas et de palme étudié par Chee-Ming, 2011, a amélioré la résistance uniquement lorsque la teneur en poids de ciment était supérieure à 15 %.

Millogo *et al.*, 2014, ont étudié des composites avec deux longueurs de fibres d'*Hibiscus cannabinus* (ou kénaf) et différentes proportions. L'optimum déterminé était une teneur en fibres de 0,4 %, qui augmentait la résistance d'environ 16 % pour les fibres courtes (3 cm) et de 8 % pour les fibres les plus longues (6 cm). Cette augmentation de la résistance à la compression s'explique par le fait que l'incorporation de fibres de kénaf a réduit la propagation des fissures dans les blocs grâce à la bonne adhérence des fibres à la matrice argileuse. D'autres auteurs ont montré que cette amélioration pouvait être améliorée de 37 % en utilisant de la laine de mouton (Galán-Marín *et al.*, 2010). Plusieurs auteurs (Heath *et al.*, 2009; Quagliarini and Lenci, 2010; Taallah *et al.*, 2014) ne rapportent aucune influence de

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

l'ajout d'agrégats ou de fibres végétales. Cependant, cela peut s'expliquer par la faible teneur en fibres utilisée (moins de 1 % en masse).

D'autres études montrent que la résistance à la compression est inversement proportionnelle à la teneur en fibres. Algin and Turgut, 2008, ont montré qu'un ajout de 7 % de coton engendrait une diminution de 71 % de la résistance du composite. Cela peut s'expliquer par une masse volumique sèche plus faible due à l'ajout de fibres végétales et une porosité plus importante (Al Rim *et al.*, 1999; Ghavami *et al.*, 1999). De plus, la faible adhérence entre les particules et la matrice argileuse participe à la diminution de la résistance à la compression. En effet, le glissement des fibres réduit l'homogénéité du matériau composite (Khedari *et al.*, 2005; Quagliarini and Lenci, 2010).

Cependant, aucune généralisation n'a pu être faite. L'influence des fibres semble dépendre du type de particules, de la composition du sol et de la méthode d'essai. En effet, en faisant varier uniquement le type de fibres, Chee-Ming, 2011, a montré que l'ajout de fibres de palme induisait une augmentation de la résistance à la compression, tandis que le contraire était observé pour les fibres d'ananas. Dans la plupart des cas, l'élasticité a été significativement améliorée avec les fibres. Les fissures existent, mais sont moins profondes (Bouhicha *et al.*, 2005; Quagliarini and Lenci, 2010). Cela s'explique par le fait que les fibres peuvent avoir un effet de liaison avec la matrice argileuse et leur compressibilité plus grande peut générer une résistance résiduelle élevée. Pendant la rupture de l'échantillon, le décollement des fibres indique une perte d'adhérence entre la matrice et les fibres.

La déformation atteinte à la rupture varie grandement en fonction du type et de la teneur en particules : 24 % avec 0,75 % de paille (Piattoni *et al.*, 2011), 13 % avec 5 % d'écorces de manioc (Villamizar *et al.*, 2012) et 10 % avec 4 % de coco (Ghavami *et al.*, 1999). En raison de leur proximité, on pourrait s'attendre à ce que les fibres se comportent comme un maillage, ce qui entraînerait la recompression de la terre. Cependant, ces valeurs de déformations ne peuvent être atteintes pour un bâtiment. Il est donc nécessaire d'étudier les matériaux pour des déformations plus « réalistes ». Dans la littérature, pour pallier cette problématique, la résistance mécanique a été étudiée à des déformations situées entre 1,5 et 7.5 % (Simons *et al.*, 2015; Flament, 2013 ;Le Guern *et al.*, 2018). Une déformation de 2 % a été retenue pour déterminer la résistance à la compression dans le cadre du projet CobBauge (Le Guern *et al.*, 2018).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

5. Suivi des bâtiments et des matériaux par des capteurs

Pour suivre la teneur en eau dans les murs, de nombreuses techniques utilisent la détermination de la permittivité diélectrique, étant donné qu'elle dépend fortement de la teneur en eau des matériaux. De nombreuses méthodes basées sur la mesure de l'impédance et de la capacité du sol permettent de connaître la permittivité diélectrique (Gaudu *et al.*, 1993; Eller and Denoth, 1996; Fen-Chong *et al.*, 2004). Sur chantier, les méthodes basées sur le principe de la réflectométrie sont préférées en raison de leur robustesse et de leur facilité d'utilisation.

Parmi les technologies alternatives de capteurs diélectriques, les oscillateurs de ligne de transmission sont particulièrement intéressants, car ils fonctionnent de manière similaire au réflectomètre sans avoir besoin d'une unité d'impulsion et d'échantillonnage séparée (Kelleners *et al.*, 2009). Les capteurs commerciaux basés sur cette technologie sont les réflectomètres de contenu en eau CS615, CS616, CS625, CS650 et CS655 (Campbell Scientific, 2020). Leur principe est basé sur la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique le long des tiges du capteur. Cette dernière dépend de la permittivité diélectrique du matériau entourant les deux tiges. Ensuite, l'équation de Topp est utilisée pour convertir la permittivité diélectrique en teneur en eau volumétrique (Topp *et al.*, 1980). Plusieurs auteurs ont effectué des études utilisant les capteurs CS616 et CS655 de Campbell Scientific (Rosa *et al.*, 2020; Singh, 2019). Ces capteurs sont utilisés pour mesurer localement le contenu volumétrique en eau (VWC). Ce type de capteur a déjà montré son efficacité dans la mesure de la teneur en eau de matériaux à base de terre (Chabriac *et al.*, 2014; Caldwell *et al.*, 2018), leur précision est égale à $\pm 3\%$ ($\pm 1\%$ avec une calibration spécifique du sol) (Campbell Scientific, 2020).

6. Caractéristiques hygrothermiques des matériaux à base de terre et de fibres végétales

6.1 Perméabilité à la vapeur d'eau

Plusieurs auteurs ont étudié la propriété de perméabilité à la vapeur d'eau (μ) des matériaux à base de terre et biosourcés (**Tableau 8**).

Faria *et al.*, 2016, ont mesuré un facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) de 8 avec la méthode de la coupelle humide, mais l'effet des fibres n'a pas été étudié. D'après Oudhof *et al.*, 2015, un mélange à combinaison de fibres végétales avec une matrice en terre et à faible masse volumique permet d'atteindre des performances encore meilleures que celles obtenues

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

avec du béton de chanvre. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) était plus faible : 3 avec la méthode de la coupelle humide et 5 avec celle de la coupelle sèche. Cependant, il a été démontré que la terre avait une perméabilité plus élevée que la plupart des matériaux de construction (Camões *et al.*, 2012), bien que l'ajout d'un stabilisateur puisse changer ce comportement. Dans la norme allemande sur les blocs de terre (DIN 18945, 2013), l'utilisation d'une gamme standard avec des valeurs entre 5 et 10 est suggérée, ce qui est en accord avec les valeurs mesurées sur les blocs de terre non fibrés (Cagnon *et al.*, 2014; Liuzzi *et al.*, 2013; Maillard and Aubert, 2014).

Tableau 8 : Valeurs du facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) selon la littérature

| Référence | Matériau | Masse volumique sèche [kg.m ⁻³] | μ |
|-------------------------------|---|--|------------|
| Allinson and Hall, 2010 | Pisé | 1900 | 14,34 |
| Cagnon <i>et al.</i> , 2014 | Brique en terre | 1940-2070 | 7-9 |
| Liuzzi <i>et al.</i> , 2013 | Composite d'argile stabilisée par de la chaux hydratée | 1829-2046 | 8,10-11,10 |
| Colinart <i>et al.</i> , 2020 | Terre allégée | 190-353 | 2,24-4,14 |
| Labat <i>et al.</i> , 2016 | Terre allégée | 241-531 | 4,8 |
| Volhard, 2016 | Terre allégée | 300-1200 | 2-5 |
| Niang <i>et al.</i> , 2018 | Composite d'argile-typha | 323-586 | 3,75-7,06 |

6.2 Absorption/désorption, comportement en sorption

Les matériaux poreux peuvent absorber une certaine quantité d'humidité contenue dans l'air ambiant et désorber plus ou moins la même quantité. La terre non cuite est connue pour sa grande capacité à équilibrer l'humidité de l'air, elle constitue un bon régulateur d'eau. L'absorption d'humidité est cinquante fois plus élevée pour les blocs non cuits que pour les briques cuites à haute température (Minke, 2013). Cependant, concernant les mélanges terre-fibres, seuls des mélanges d'enduits ont été étudiés pour cette propriété (Ashour *et al.*, 2015; Faria *et al.*, 2016; Lima and Faria, 2016; Maddison *et al.*, 2009).

Cette propriété de sorption et de désorption peut être considérée comme statique ou dynamique. Pour la propriété statique, il a été démontré que la teneur en humidité de l'enduit augmente lorsque l'humidité relative ambiante augmente et diminue lorsque la température ambiante augmente, mais avec un effet plus faible. Les enduits renforcés par de la paille

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

d'orge ou de blé et des copeaux de bois présentent un taux d'absorption plus élevé (jusqu'à 6,5 % pour la paille d'orge) que la terre seule (jusqu'à 1,7 %) (Ashour *et al.*, 2015). Bouasker *et al.*, 2014, ont déterminé les isothermes de sorption sur différentes pailles non combinées avec de la terre et ont montré que leur comportement était similaire pour la sorption. Pour la désorption, la diminution de la teneur en eau de la paille d'orge s'est produite à une humidité relative plus faible que pour les autres pailles.

Cependant, la teneur en eau d'un enduit est en équilibre dynamique permanent avec l'environnement. Une augmentation soudaine de l'humidité relative entraîne une régulation dynamique de l'humidité, qui passe de 50 % à 80 % avec les enduits fibrés (Lima and Faria, 2016; Maddison *et al.*, 2009). Selon Lima et Faria, 2016, les enduits contenant 2 % de copeaux de typha ont absorbé 38 g.m⁻² d'eau, alors que le même enduit sans typha a absorbé 30 g.m⁻².

Les enduits étudiés par Lima et Faria, 2016 appartiennent à la classe d'absorption supérieure définie par la norme allemande DIN 18947, avec une valeur supérieure à 60 g.m⁻² après 12 heures, mais aucune différence n'a été observée entre les différents types et proportions de fibres. Toute l'humidité absorbée a été désorbée par les échantillons après 12 heures (Faria *et al.*, 2016; Maddison *et al.*, 2009). Néanmoins, la sorption d'humidité était plus faible avec 2 % de laine de typha, avec une faible masse volumique, que sans laine de typha. D'après Minke, 2013, l'absorption d'eau augmente avec la teneur en poids des fibres. Mais, de manière générale, la régulation de l'humidité est très rapide en raison de la forte perméabilité des sols (Cagnon *et al.*, 2014).

6.3 Conductivité thermique

L'énergie de chauffage et de refroidissement peut être économisée en utilisant des matériaux à faible conductivité thermique pour les maisons et les bâtiments. Plusieurs auteurs ont étudié les propriétés thermiques des matériaux. Ces propriétés thermiques sont indispensables pour tous les matériaux de construction. Les petits bâtiments construits avec des blocs de terre fibrée sont 53,3 % plus frais en été et 41,5 % plus chauds en hiver que les bâtiments utilisant des blocs de pierre basaltique (Binici *et al.*, 2005). Le matériau à base de terre permet ainsi d'économiser 69 % de l'énergie de chauffage en hiver et 57 % de l'énergie de refroidissement en été.

Plusieurs auteurs ont démontré qu'une augmentation de la teneur en fibres entraînait une diminution de la conductivité thermique (Al Rim *et al.*, 1999; Ashour *et al.*, 2015; Khedari *et al.*, 2005; Millogo *et al.*, 2014; Simons *et al.*, 2015). Par exemple, cette valeur est passée de

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

0,24 à 0,008 W.m⁻¹.K⁻¹ lorsque la proportion de copeaux de bois a été augmentée de 10 à 50 % (Al Rim *et al.*, 1999).

Cette évolution pourrait être liée à la densité et à la porosité du composite. Une relation linéaire entre la conductivité thermique (λ) et la densité (d) a été trouvée dans Al Rim *et al.*, 1999 : $\lambda = 0.228d - 0.006$. Une autre étude (Laurent, 1987) a déterminé un modèle différent : $\lambda = 0.103 \cdot 10^{0.517d}$. Ces modèles permettent de montrer que la diminution de la densité (et donc l'augmentation de la porosité) conduit à une diminution de la conductivité thermique (Bouguerra *et al.*, 1998).

Cependant, la densité n'est pas le seul paramètre qui influence la conductivité thermique et une disparité des valeurs de conductivité peut être observée pour une même densité. Le type de fibre, la technique de fabrication ou la machine d'essai peuvent également jouer un rôle. Il a été également constaté que la tortuosité augmentait avec la teneur en copeaux de bois et un modèle théorique a été créé pour corrélérer cette caractéristique physique avec la conductivité thermique (Bouguerra *et al.*, 1998).

De plus, il a été constaté que la conductivité thermique diminuait lorsque la longueur des fibres augmentait, du fait d'une meilleure occupation du volume par les fibres les plus longues (Millogo *et al.*, 2014). L'effet du traitement des fibres sur les propriétés thermiques des composites de terre fibrée a également été étudié par Ledhem *et al.*, 2000. La conductivité thermique n'a pas été modifiée par le traitement à l'eau bouillante, mais a augmenté avec le traitement à l'huile de lin. Cette augmentation était attendue en raison de la conductivité thermique plus élevée de l'huile par rapport à l'air et de la masse volumique plus élevée du composite. L'isolation thermique a beaucoup diminué lorsque la teneur en eau a légèrement augmenté (Bal *et al.*, 2012; Kymäläinen and Sjöberg, 2008; Meukam *et al.*, 2003). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'air dans les pores a été remplacé par de l'eau, qui est un meilleur conducteur de chaleur (Meukam *et al.*, 2003).

Des modèles ont été proposés pour relier la teneur en eau à la conductivité thermique (Bal *et al.*, 2013) et à la capacité thermique (Bal *et al.*, 2012). La **Figure 30** récapitule les conductivités thermiques trouvées dans la littérature en fonction de la masse volumique sèche du matériau (Laborel-Préneron *et al.*, 2016).

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

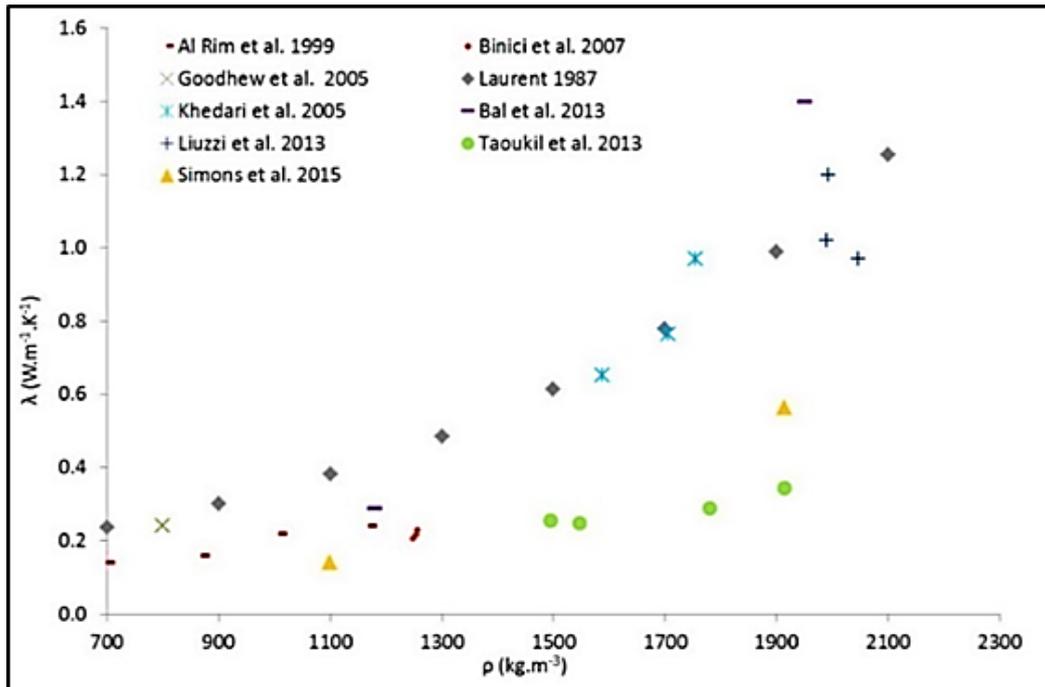


Figure 30 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche selon la littérature (Laborel-Préneron *et al.*, 2016)

7. Conclusion

Face aux enjeux du développement durable et du changement climatique, à la nécessité de diminuer la consommation d'énergie et par conséquent les émissions de CO₂, le secteur du bâtiment et plus précisément celui des matériaux de construction propose des solutions à base de matériaux locaux. La bauge est une construction en terre ancestrale, assez présente en Normandie, qui présente de nombreux avantages environnementaux. La technique traditionnelle de la bauge consiste à mélanger de la terre, de l'eau et des fibres en utilisant les pieds des personnes ou des animaux, puis à empiler les mottes à la main ou à l'aide d'une fourche, sans coffrage.

Selon l'étude bibliographique, il existe différentes études et formulations types de la bauge constituées essentiellement de limon, de sable et de fibres végétales. Ces fibres présentent généralement une masse comprise entre 1 et 3,5 % de la masse totale du mélange. En matière de comportement mécanique, la résistance à la compression varie de 0,6 à 1,65 MPa. Ce comportement est influencé par la teneur en eau, les paramètres de la fibre (dont la proportion et le type) et ceux de la terre (comme la granulométrie et la teneur en argile). Quant au comportement thermique, la conductivité thermique varie en fonction de la proportion en fibres, de la masse volumique et de la teneur en eau du mélange. Elle présente des valeurs

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

entre 0,45 et 0,93 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la bauge et entre 0,06 et 0,12 W.m⁻¹.K⁻¹ pour la terre allégée.

Les mélanges de terre et de fibres végétales sont également caractérisés par un comportement hygroscopique spécifique. C'est un matériau micro et macroporeux dont le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) moyenne à 23 °C est compris entre 7 et 9 pour la bauge et entre 2 et 4,8 pour la terre allégée.

Plusieurs expériences de constructions récentes ont montré que les techniques de mise en œuvre de bauge avaient évolué, notamment avec la mise en œuvre de bauge coffrée ou préfabriquée. Le travail assez long du malaxage, réalisé par piétinement, et le façonnage des murs sont des tâches qui imposent des contraintes physiques importantes aux ouvriers. De nombreuses entreprises contemporaines ont donc expérimenté l'adaptation de la technique à l'utilisation d'engins mécaniques tels que les malaxeurs ou les pelles. Quelques tentatives de coffrage ont été essayées, permettant de réduire une bonne partie du travail de façonnage des murs, mais elles n'ont jamais été développées de manière significative, probablement parce que le coffrage enlève une partie de la souplesse et de la simplicité du processus constructif.

En revanche, une méthode explorée en Normandie il y a près de dix ans, dans laquelle la bauge est appliquée sur des structures métalliques, a inspiré la création d'un coffrage régulièrement utilisé depuis, constitué d'une armature métallique perforée sous forme de petites mailles carrées (**Figure 51**).

CHAPITRE II
CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX
ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'étude bibliographique a mis en évidence le fait que peu de travaux ont été menés sur la caractérisation des matériaux de bauge et terre allégée utilisés sur chantier à l'échelle d'un bâtiment. Dans le cadre de cette thèse, nous allons caractériser les différents constituants qui seront utilisés dans la composition des matériaux (sols et fibres végétales) ainsi que les mélanges de bauge et de terre allégée. Ce chapitre détaille l'ensemble des essais accomplis pour caractériser les propriétés mécaniques, thermiques et hygrothermiques des deux matériaux de base et des deux types de mélanges. Sont également décrites les méthodes de mise en œuvre, de fabrication d'échantillons et d'essais qui seront appliquées pour les études en laboratoire et sur chantier.

1. Caractérisation des matériaux de l'étude

1.1 Sols

1.1.1 Présentation des sols

Pour les mélanges de bauge et de terre allégée, trois sols (sol 1, sol 2 et sol 3) ont été utilisés. Ils proviennent de la carrière de Lieusaint en Normandie. Ils ont été caractérisés d'un point de vue géotechnique et minéralogique.

1.1.2 Analyse granulométrique

Une analyse granulométrique a été effectuée sur les trois sols. Ce type d'analyse permet de déterminer la taille et les pourcentages pondéraux respectifs des différents grains constituant l'échantillon. L'analyse granulométrique sur les sols et la teneur en fines ont été réalisées selon la norme XP P94-041, et ont permis de tracer les courbes granulométriques des sols (**Figure 31**).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

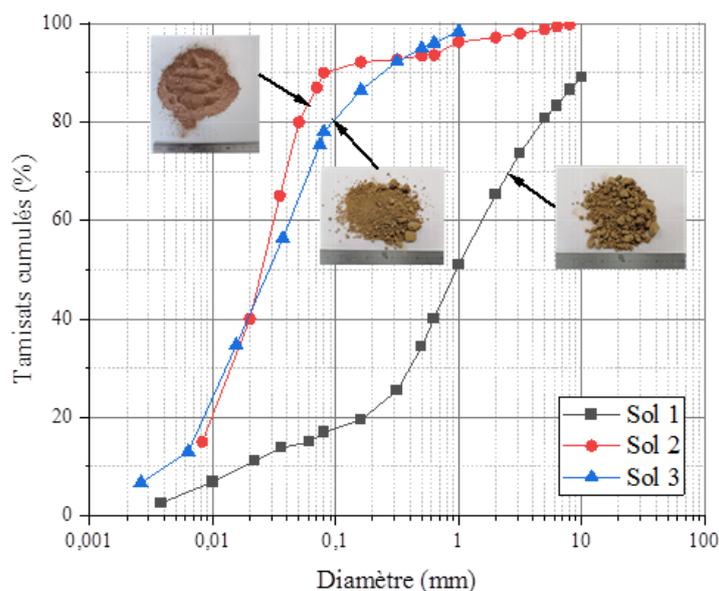


Figure 31 : Courbe granulométrique

Parmi les informations obtenues à partir d'une courbe granulométrique, le diamètre maximal (D_{max}), le tamisat à 2 mm et la teneur en fines ($D < 80 \mu\text{m}$) sont des paramètres qui permettent de classer les sols selon la norme NF P11-300 (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Paramètres obtenus à partir des courbes granulométriques

| Sols | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| D_{max} [mm] | 10 | 8 | 1 |
| Passant à 2 mm [%] | 65,3 | 97,2 | 100 |
| Particules < 80 μm [%] | 20 | 80 | 90 |

1.1.3 Activité argileuse

Les argiles confèrent au sol une capacité d'absorption d'eau qui peut entraîner 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 ont été utilisés : l'essai au bleu de méthylène, qui permet de déterminer l'activité des argiles selon la norme NF P94-068, et l'essai de limite d'Atterberg, réalisé selon la norme NF EN ISO 17892-12, qui permet de déterminer des caractéristiques intrinsèques du sol déterminées sur sa fraction 0-400 μm (**Figure 32**).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

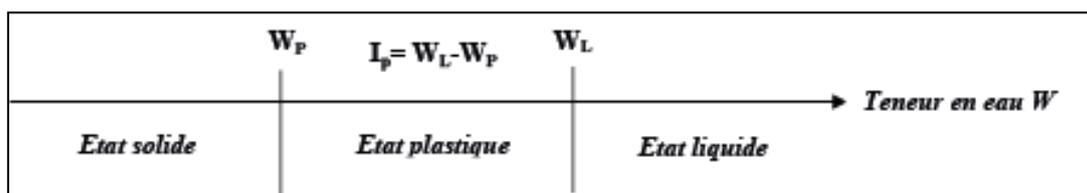


Figure 32 : Limites d'Atterberg et domaines rhéologiques

Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau 10**. En s'appuyant sur les essais au bleu de méthylène et limite d'Atterberg, les trois sols sont classés selon la norme NF P11-300. Les résultats montrent que le sol 3 possède l'activité argileuse la plus importante avec une valeur de bleu (VBs) de 6,49 g/100 g et un indice de plasticité (I_p) de 14,9.

Tableau 10 : Propriétés des trois sols

| Sols | Sol 1 | Sol 2 | Sol 3 |
|---|--------------------|---------------------|-----------------------|
| VBs [g/100 g] | 0,46 | 1,78 | 6,49 |
| Limite de liquidité (W_L) [%] | 22,8 | 28,5 | 57,4 |
| Limite de plasticité (W_P) [%] | 20,5 | 24,3 | 42,5 |
| Indice de plasticité (I_p) [%] | 2,3 | 4,2 | 14,9 |
| $\rho_{\text{spécifique}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | 2603 ± 4 | 2617 ± 2 | 2567 ± 1 |
| Nature de sol | Sable-limoneux fin | Limon peu plastique | Argile très plastique |

1.1.4 Masse volumique absolue

La mesure de la masse volumique absolue des sols a été effectuée après le passage à l'étuve à 40 °C. Un pycnomètre à hélium de type AccuPyc II 1340 de la marque Micromeritics® a été utilisé pour réaliser les mesures (**Figure 33**). 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 33 : Pycnomètre à hélium de type AccuPyc II 1340

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Le pycnomètre permet d'effectuer une mesure précise du volume de phase solide d'un échantillon de masse connue selon la norme NF EN 1097-7. En effet, le principe de mesure est d'introduire l'hélium dans une enceinte de référence avec une pression connue (P1) et d'étendre ensuite ce gaz dans l'enceinte qui contient l'échantillon en mesurant la nouvelle pression de l'échantillon (P2). Cette pression P2, dite d'expansion (P2<P1), permet de déterminer le volume du matériau par l'équation 1 :

$$V_{matériau} = V_{cellule} \times \left(1 - \frac{P_2}{P_1 - P_2}\right) \quad \text{Équation 1}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau 11**.

Tableau 11 : Résultats de masse volumique absolue des sols

| Nature | Masse volumique absolue (kg.m ⁻³) | Écart-type |
|--------------|---|------------|
| Sol 1 | 2603 | 4 |
| Sol 2 | 2617 | 2 |
| Sol 3 | 2567 | 1 |

1.1.5 Composition argileuse et minéralogique

Tout d'abord, les sols sont analysés avec la méthode de diffractométrie aux rayons X qui est une technique d'analyse de la microstructure de la matière (**Figure 34**).



Figure 34 : Diffractomètre, modèle Inel Equinox 3000

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Ensuite, une analyse par microscope à balayage (MEB) a été effectuée sur les sols étudiés. Le MEB permet la visualisation de la morphologie d'une matière à l'échelle du nanomètre. Les échantillons d'argiles sont réduits en poudre et posés sur un porte-échantillon à l'aide d'une gomme conductrice. L'ensemble est ensuite métallisé par une couche (Pd/Au) pour le rendre conducteur et limiter le phénomène du chargement des particules d'argile avant observation sous haute tension.

1.1.1.1. Composition minéralogique du sol 1

Selon le schéma de diffraction des rayons X (DRX) du sol 1 utilisé dans la bauge (**Figure 35**), celui-ci est composé à 99 % de quartz (SiO_2).

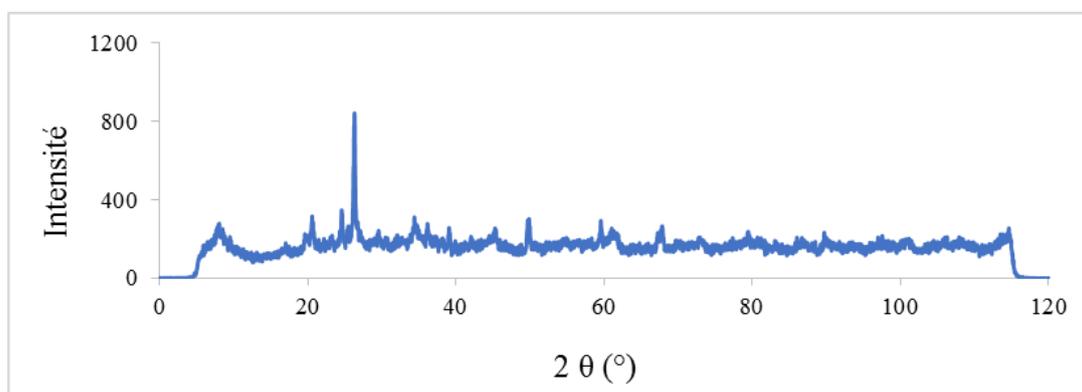


Figure 35 : Schéma DRX du sol 1

1.1.1.2. Composition minéralogique du sol 2

D'après l'identification quantitative des phases, le diagramme XRD du sol 2 est ajusté par les phases majeures suivantes : quartz (54,6 %), muscovite (26,1 %), montmorillonite (7,1 %) et albite (4,1 %), avec des occurrences mineures de goethite, kaolinite, illite, rutile et huntite (voir **Figure 36** et **Tableau 12**). Avec un taux de 7,1 %, la montmorillonite est la seule espèce d'argile gonflante détectée dans le sol 2. Aussi, les propriétés de retrait peuvent être affectées par la quantité de kaolinite et d'illite présentes, mais avec une faible capacité de retrait/gonflement.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

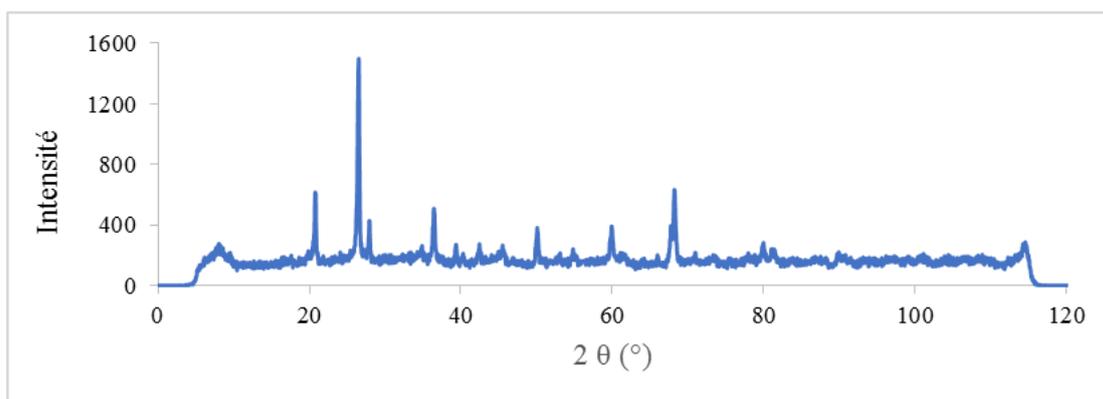


Figure 36 : Schéma DRX du sol 2

Tableau 12 : Composition minéralogique du sol 2

| <i>Phases</i> | <i>Volume (%)</i> |
|--|-------------------|
| Quartz SiO ₂ | 54,6 |
| Muscovite KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F, OH) ₂ | 26,1 |
| Montmorillonite (Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 7,1 |
| Albite NaAlSi ₃ O ₈ | 4,1 |
| Kaolinite Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | 2,1 |
| Goethite α-FeO(OH) | 2,1 |
| Rutile TiO ₂ | 1,5 |
| Illite (K, H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)] | 1,2 |
| Huntite Mg ₃ Ca(CO ₃) ₄ | 1,2 |

1.1.1.3. Composition minéralogique du sol 3

D'après la **Figure 37** et le **Tableau 13**, le sol 3 utilisé dans la fabrication de la terre allégée est constitué de quartz (40,5 %), kaolinite (33,2 %), albite (16,1 %) et calcite (10,2 %). Le mélange de la kaolinite avec l'eau donne au sol sa plasticité. Cependant, la kaolinite et l'illite ont une faible capacité de retrait-gonflement.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

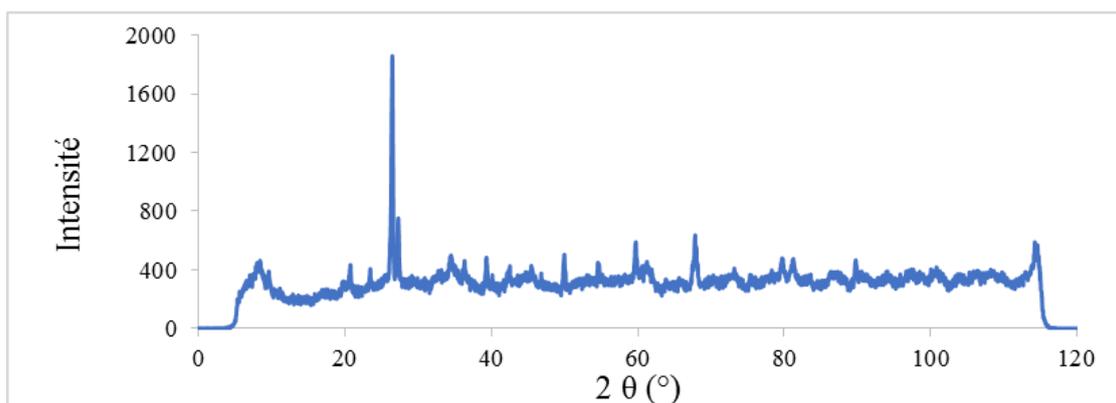


Figure 37 : Schéma DRX du sol 3

Tableau 13 : Composition minéralogique du sol 3

| <i>Phases</i> | <i>Volume (%)</i> |
|---|-------------------|
| Quartz SiO_2 | 40,5 |
| Kaolinite $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ | 33,2 |
| Albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | 16,1 |
| Calcite CaCO_3 | 10,2 |

1.2 Fibres végétales

1.2.1 Présentation des fibres végétales

Dans notre étude, deux types de fibres sont utilisées : de la paille de lin pour le mélange de bauge et du roseau pour le mélange de terre allégée. Le lin a été cultivé autour de Caen et la paille de lin a été produite dans la commune de Marchésieux. Le roseau jauni utilisé dans nos mélanges provient de Seine-Maritime, et a été récolté au pied du pont de Normandie. Il est utilisé essentiellement pour les toits de chaume.

1.2.2 Caractéristiques mécaniques des fibres

Les propriétés mécaniques de la paille de lin et du roseau ont été déterminées grâce à des essais de traction directe sur des fibres unitaires. Les longueurs respectives de paille de lin et de roseau utilisées pour les essais de traction sont de 4 et 3 cm. Trois essais de traction directe ont été réalisés (Figure 38).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Dans le cas de la paille de lin et du roseau, la forme de la fibre est considérée comme circulaire. La mesure de la section des fibres a été réalisée à l'aide d'un microscope d'une précision de 0,01 mm pour le lin et de 0,1 mm pour le roseau. La vitesse de chargement utilisée en déplacement est de 1 mm par minute (Le Hoang, 2013).



Figure 38 : Dispositif expérimental d'essai de traction des fibres (Phung, 2018)

Le **Tableau 14** présente les performances en traction directe des pailles de lin et du roseau.

Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques des fibres

| Fibre | Lin | Roseau |
|---|----------------------|-----------------------|
| Contrainte maximale en traction [MPa] | 112 ± 18 | 200 ± 10 |
| Module d'élasticité en traction [GPa] | 5,20 ± 0,8 | 35,9 ± 3 |
| Valeurs bibliographiques Contrainte maximale en traction [MPa] | 500 MPa (Page, 2017) | 503 ± 5 (Rigal, 2015) |

1.2.3 Masse volumique absolue

Comme pour les sols, la mesure de la masse volumique absolue des fibres a été réalisée après le passage à l'étuve à 40 °C. Le même pycnomètre à hélium de type AccuPyc II 1340 de la marque Micromeritics® que dans la partie 1.1.4 a été utilisé, avec le même principe de mesure selon la norme NF EN 1097-7. Les résultats sont présentés dans le **Tableau 15**.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Tableau 15 : Résultats de masse volumique absolue des fibres végétales

| Fibre | Masse volumique absolue (kg/m ³) | Écart-type |
|---------------|--|------------|
| Paille de lin | 1397 | 15 |
| Roseau | 1310 | 7 |

1.2.4 Cinétique d'absorption d'eau

Étant donné leur composition, les fibres utilisées sont très sensibles à l'eau. Leur cinétique d'absorption d'eau a donc été déterminée selon le protocole expérimental mis au point par le groupe RILEM TC 236-BBM (Amziane *et al.*, 2017). L'essai a été reproduit cinq fois pour chaque échantillon afin d'améliorer la précision des résultats. Au total, douze échantillons ont été analysés. Le protocole utilisé pour mesurer l'absorption d'eau des fibres était le suivant (Figure 39) :

- Sécher les fibres de lin et de roseau à 40 °C jusqu'à obtenir une variation de masse inférieure à 0,1 % en 24 heures.
- Peser les fibres séchées (M_f) puis les placer dans un sachet en plastique perméable.
- Immerger complètement le sachet rempli de fibres dans l'eau pendant une minute.
- Sortir le sachet de l'eau puis le placer dans la centrifugeuse et la faire tourner 30 secondes à 500 tr.min⁻¹.
- Peser le sachet de fibres essoré et noter la valeur M_I (1 min).
- Répéter toutes les étapes précédentes pour les cinq essais, avec les durées d'immersion suivantes : 5, 15, 60, 240, 1440 et 2880 minutes.
- Enfin, calculer la valeur d'absorption d'eau à l'aide de l'équation 2 :

$$M_{(t)} = \frac{M_1 - M_f}{M_f} \times 100$$

Équation 2



Immersion complète dans l'eau

Une centrifugeuse

Figure 39 : Protocole expérimental de la cinétique d'absorption des fibres

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

La cinétique d'absorption d'eau par les fibres végétales est présentée dans la **Figure 40**.

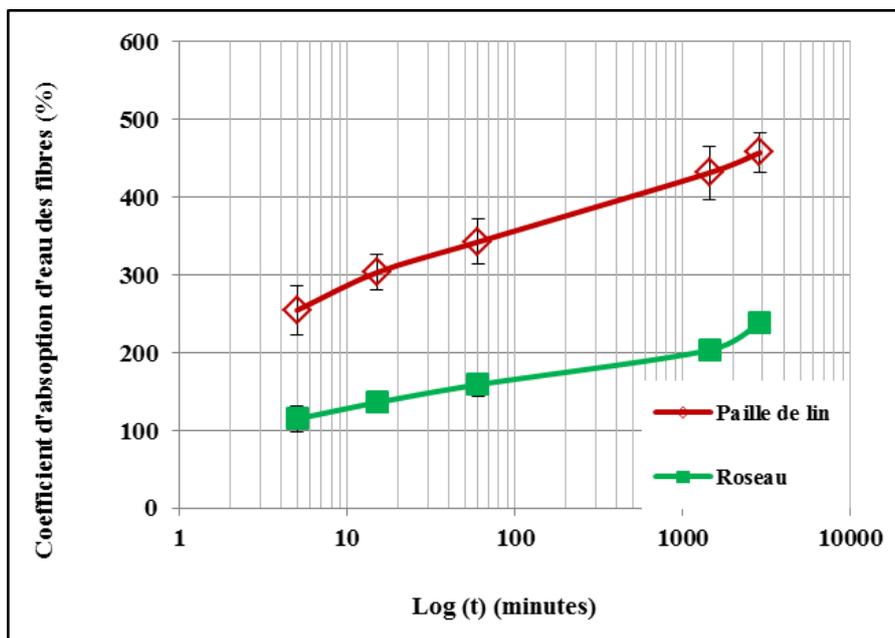


Figure 40 : Cinétique d'absorption d'eau par les fibres végétales

Le **Tableau 16** présente les résultats obtenus sur les fibres de lin et de roseau.

Tableau 16 : Propriétés des fibres végétales

| Fibres | Lin | Roseau |
|--|---------------|---------------|
| $W_{\text{absorption à 24 h}} [\%]$ | 450 ± 11 | 198 ± 4 |
| $\rho_{\text{spécifique}} [\text{kg/m}^3]$ | 1266 ± 55 | 1305 ± 11 |

2. Mélanges et caractérisation

2.1 Préparation et confection des éprouvettes sur chantier et en laboratoire

2.1.1 Mise en œuvre des mélanges sur chantier

La technique traditionnelle de la bauge consiste à mélanger de la terre, de l'eau et des fibres par piétinement, puis à empiler les mottes à la main ou à l'aide d'une fourche, sans coffrage. Au cours de ce processus, une quantité généreuse de matériau est utilisée et le trop-plein est ensuite taillé après un court temps de séchage pour produire la face finale. La surface obtenue peut ensuite être enduite ou battue pour densifier la surface et finir le mur. Dans notre cas, la nécessité d'utiliser deux mélanges différents de bauge pour la partie structurale et de terre allégée pour la partie thermique soulève une question fondamentale sur le processus de construction.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Pour construire le bâtiment prototype (**Figure 43**), deux formulations différentes de mélanges terre-fibres végétales ont été utilisées. La bauge est composée de sable limoneux fin (sol 1), d'un limon peu plastique (sol 2) et de paille de lin. Afin d'avoir un meilleur comportement mécanique, le sol 1 a été utilisé comme correcteur granulométrique. La terre allégée est composée d'argile très plastique (sol 3) et de roseau (**Tableau 17**).

Tableau 17 : Formulation des mélanges de bauge et de terre allégée sur chantier (% masse)

| Bauge | | | Terre allégée | |
|--------|-------|---------------|---------------|--------|
| Sol 1 | Sol 2 | Paille de lin | Sol 3 | Roseau |
| 32,5 % | 65 % | 2,5 % | 66,7 % | 33,3 % |

La composition des mélanges donnée précédemment est la composition théorique prévue au début du chantier. Une vérification des proportions réellement utilisées sera effectuée afin de reproduire ces formulations au laboratoire.

Les différents composants et outils de préparation sont présentés sur la **Figure 41**. Pour le malaxage, un godet de pelleuse a été utilisé pour la bauge et un malaxeur de béton a été utilisé pour la terre allégée.



Figure 41 : préparation de la bauge et de la terre allégée sur chantier

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Des échantillons cylindriques et prismatiques ont été préparés sur le chantier à l'aide d'un compactage manuel avec un bâton en bois et piétinement. Au total, douze échantillons cylindriques ($\varnothing 110 \text{ mm} \times H220 \text{ mm}$) ont été utilisés pour déterminer la masse volumique et la résistance à la compression. Douze échantillons prismatiques ($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$) ont été réalisés pour déterminer la masse volumique sèche et la conductivité thermique (**Figure 42**). Enfin, six grands échantillons ($600 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$) ont été obtenus par piétinement et utilisés pour déterminer la masse volumique sèche.



Figure 42 : Échantillons prismatiques et cylindriques

2.1.2 Suivi sur chantier

Un protocole expérimental sur chantier a été établi pour contrôler l'homogénéité des caractéristiques des deux matériaux (bauge et terre allégée) lors des quatre levées du bâtiment prototype (**Figure 43**). Ce protocole a pour objectif de suivre au laboratoire les échantillons conçus sur le chantier lors de la phase de construction.



Figure 43 : Bâtiment prototype en cours de construction (projet CobBauge)

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Les caractéristiques étudiées sont la teneur en eau initiale, la densité, la résistance mécanique, la conductivité thermique et la porosité accessible à l'eau. Elles seront corrélées avec les travaux de mise au point des mélanges en laboratoire.

▪ Teneur en eau

Durant les quatre levées du bâtiment, la teneur en eau sur chantier est mesurée selon la norme NF EN ISO 17892-1. Elle se situe entre 18 % et 21 % pour la bauge et entre 72 % et 83 % pour la terre allégée (**Tableau 18**). Ces mesures seront prises en considération pour la formulation des mélanges au laboratoire.

Tableau 18 : Résultats de teneur en eau sur chantier

| Échantillon | Bauge | Terre allégée |
|-------------|--------|---------------|
| 1 | 20,1 % | 72,7 % |
| 2 | 19,3 % | 79,4 % |
| 3 | 19,3 % | 80,2 % |
| 4 | 18,2 % | 83,2 % |
| 5 | 21,2 % | 83,8 % |

▪ Teneur réelle en fibres

Un protocole expérimental a été mis en œuvre pour suivre la variation de la teneur en fibres dans la bauge et la terre allégée pendant la phase de construction. Tout d'abord, les éprouvettes cylindriques sur chantier ($\varnothing 110$ mm \times H220 mm) ont été dissoutes et tamisées à des mailles de 6,3 - 5 - 3,15 - 2,5 - 0,9 - 0,5 mm (**Figure 44**).

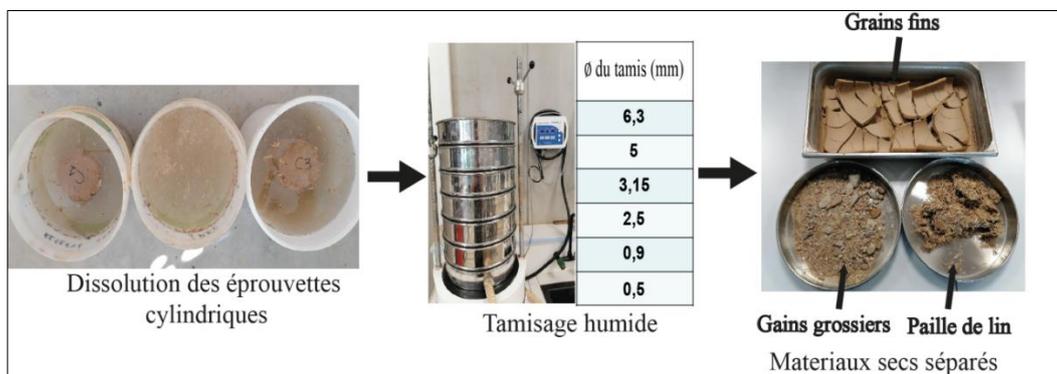


Figure 44 : Protocole expérimental de détermination de la teneur en fibres réelle dans la bauge

Les résultats, rapportés dans le **Tableau 19**, montrent que la teneur en paille de lin varie entre 2,1 et 2,3 %. Pour le mélange de terre allégée sur chantier, les teneurs en fibres de roseau et en terre ont été déterminées en fonction des volumes de seaux utilisés, selon les résultats

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

rapportés dans le **Tableau 20**. Les mélanges en laboratoire ont été formulés avec une teneur en paille de lin de 2,2 % pour la bauge et une teneur en roseau de 36 % pour la terre allégée.

Tableau 19 : Teneur en fibres de lin sur chantier

| Levées | Teneur réelle en fibres [%] | Teneur théorique de départ [%] |
|----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Levée 2 | 2,3 | 2,5 |
| Levée 3 | 2,1 | 2,5 |
| Levée 4 | 2,3 | 2,5 |
| Levée 5 | 2,2 | 2,5 |

Tableau 20 : Pourcentage de sol et de roseau dans la terre allégée sur chantier

| Matériau | Nombre de seaux | Masse totale [kg] | [%] |
|----------|-----------------|-------------------|-----|
| Sol 3 | 4,5 | 61,2 | 64 |
| Roseau | 4,5 | 33,8 | 36 |

2.1.3 Préparation des mélanges au laboratoire

Les formulations des mélanges de bauge et de terre allégée au laboratoire sont présentées dans le **Tableau 21**. La teneur en eau initiale réelle et la teneur en fibres ont été déterminées pour les échantillons sur chantier.

Tableau 21 : Formulation des mélanges de bauge et de terre allégée au laboratoire (% masse)

| Bauge | | | Terre allégée | |
|--------|--------|---------------|---------------|--------|
| Sol 1 | Sol 2 | Paille de lin | Sol 3 | Roseau |
| 32,6 % | 65,2 % | 2,2 % | 64 % | 36 % |

La teneur en eau initiale est de 20 % pour la bauge et 80 % pour la terre allégée. En raison de la forte absorption d'eau par la paille de lin, une période de repos est nécessaire pendant la préparation de la bauge pour assurer une bonne homogénéité de la teneur en eau et la cohésion du mélange. Concernant la terre allégée, une barbotine est d'abord réalisée avec le sol 3 et l'eau, puis cette barbotine est mélangée avec le roseau à l'aide d'un malaxeur à pales (**Figure 45**).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES



Figure 45 : Préparation de la bauge et de la terre allégée au laboratoire

2.2 Propriétés physiques

2.2.1 Masse volumique apparente

La masse volumique est mesurée sur les échantillons cylindriques ($\varnothing 110 \text{ mm} \times H 220 \text{ mm}$) selon la norme NF X31-501. Après séchage des échantillons à $40 \text{ }^\circ\text{C}$, le rapport entre la masse de l'échantillon sec (M_s) et le volume qu'il occupe (V) est donné par l'équation 3 :

$$M_v = \frac{M_s}{V} \quad \text{Équation 3}$$

2.2.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité totale est mesurée selon la norme NF ISO 5017 sur de petits échantillons ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$) imbibés dans une huile non mouillante (pétrole désaromatisé). Les échantillons sont séchés dans une étuve à $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ et ensuite placés 24 heures dans un dessiccateur dans des béciers remplis d'huile non mouillante et saturés sous vide. Cette durée permet à l'huile non mouillante de remplacer l'air dans les pores ouverts de l'échantillon. Enfin, les échantillons sont pesés sous air (M_a) et sous huile non mouillante (M_h). La porosité accessible à l'eau est ensuite déterminée selon l'équation 4 :

$$\Phi = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_h} \times 100 \quad \text{Équation 4}$$

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Avec :

Φ : porosité (%).

M_s : masse sèche (kg).

M_a : masse sous air (kg).

M_h : masse sous huile (kg).

2.2.3 Perméabilité à la vapeur

La perméabilité à la vapeur d'eau d'un matériau représente le rapport de la quantité de vapeur d'eau passant à travers le matériau étudié ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$) et son épaisseur (m). Le protocole expérimental est appliqué sur trois échantillons cylindriques ($\text{Ø}11$ cm, H5 cm) à la fois pour la bauge et la terre allégée (**Figure 46**). Le test a été réalisé avec la méthode de la coupelle sèche selon la norme NF ISO 12572.



Figure 46 : Essai expérimental de perméabilité à la vapeur d'eau

Avant le test, les échantillons ont été conservés dans un environnement à $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ et $50\% \pm 5\%$ d'humidité relative pendant 21 jours. La coupelle d'essai, dont le côté a été scellé avec un adhésif en aluminium, est positionnée au sommet du plat et maintenue en place par un support en plastique (**Figure 46**). Ensuite, selon un gradient d'humidité, la masse des échantillons est contrôlée jusqu'à atteindre l'équilibre. Le gradient d'humidité choisi était de 0 % d'humidité relative à l'intérieur de la coupelle et 50% d'humidité relative à l'extérieur pour une température de 23 °C . Cet essai nous permet de connaître le comportement des deux matériaux lorsque le transfert d'humidité est dominé par la diffusion de la vapeur d'eau. Le flux de vapeur à travers le matériau est obtenu en pesant l'assemblage de la coupelle et de l'échantillon. En régime permanent, le flux de vapeur d'eau (G) à travers l'échantillon est

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

donné par la pente de la ligne de régression de la masse de l'ensemble coupelle-échantillon en fonction du temps. Ce résultat est obtenu après avoir éliminé la phase initiale non linéaire de l'essai. Le flux ou transmission du taux de vapeur d'eau (g) est calculé selon l'équation 5.

$$g = \frac{G}{A} \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

A : section de l'échantillon (m^2)

G : flux de vapeur d'eau ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'ensemble (W) dépend de la différence de pression partielle de vapeur d'eau entre les côtés de l'échantillon (ΔP_v). Pour calculer la résistance à la vapeur d'eau (Z) à partir de la perméabilité à la vapeur d'eau (W), on utilise l'équation 6.

$$Z = \frac{1}{W} = \frac{A \times \Delta p_v}{G} \quad \text{Équation 6}$$

Puis, à partir de l'équation 7, la résistance à la vapeur d'eau de la couche d'air présente dans la coupelle (Z_a) est obtenue à partir de l'épaisseur de la couche d'air (d_a) et de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air à la pression atmosphérique (δ_a) qui est égale à $2 \times 10^{-10} kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$.

$$Z_a = \frac{d_a}{\delta_a} \quad \text{Équation 7}$$

La perméabilité à la vapeur d'eau corrigée (W_c) est obtenue en utilisant l'équation 8.

$$W_c = \frac{1}{Z - Z_a} \quad \text{Équation 8}$$

Ensuite, la perméabilité à la vapeur d'eau de l'échantillon (δ) est déterminée en utilisant l'épaisseur de l'échantillon E selon l'équation 9.

$$\delta = W_c \times E \quad \text{Équation 9}$$

Enfin, le facteur de résistance à la vapeur d'eau de l'échantillon (μ) est déterminé par l'équation 10.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad \text{Équation 10}$$

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.3 Propriétés mécaniques

La résistance à la compression uniaxiale a été mesurée sur douze échantillons cylindriques ($\varnothing 110 \text{ mm} \times H 220 \text{ mm}$) (**Figure 47**). La vitesse de chargement de la presse a été contrôlée en force avec un taux imposé de $0,4 \text{ kN/s}$ selon la norme NF EN 13286-41, 2003. En effet, le délai avant fissuration dans cette norme doit être compris entre 30 et 60 secondes. La valeur de $0,4 \text{ kN/s}$ semble être un bon choix pour obtenir une résistance mécanique comprise entre 1 et $2,5 \text{ MPa}$. Les performances mécaniques sont déterminées pour une déformation de 2 % (Le Guern *et al.*, 2018; Simons *et al.*, 2015). Cette valeur a été choisie pour être représentative d'un comportement en situation réelle.



Figure 47 : Essai de compression uniaxial

2.4 Propriétés thermiques

La conductivité thermique fait partie des propriétés hygrothermiques importantes de la bauge. Par définition, la conductivité thermique (λ), exprimée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, représente le transport de l'énergie, sous forme de chaleur, à travers un échantillon engendrant un gradient de température (**Figure 48**).

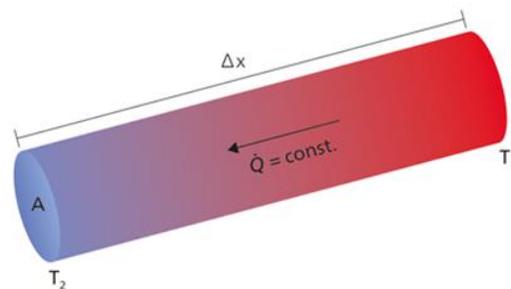


Figure 48 : Flux de chaleur à travers un élément cylindrique

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Selon la seconde loi de la thermodynamique (équation 11), la chaleur se dirige toujours dans la direction de la température la plus faible. La relation entre la chaleur transportée par unité de temps (dQ/dt ou flux de chaleur Q) et le gradient de température ($\Delta T/\Delta x$) à travers l'aire A (l'aire à travers laquelle la chaleur circule perpendiculairement à une vitesse constante) est décrite par l'équation de la conductivité thermique.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} ; \dot{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Équation 11}$$

Avec :

$\frac{dQ}{dt}$: flux de chaleur (J/s).

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

A : aire (m^2).

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$: gradient de température ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).

Dans notre étude, la conductivité thermique a été mesurée sur des échantillons prismatiques ($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$) à l'aide d'un fluxmètre thermique (**Figure 49**), conformément à la norme ISO 8301. Cette technique consiste à appliquer un gradient de température entre deux plaques pour mesurer le flux thermique à travers le matériau étudié. Lorsque l'état d'équilibre est atteint et que le flux thermique est constant, la conductivité thermique du matériau est calculée en utilisant la loi de Fourier à une température moyenne de 20°C (la plaque froide est à 10°C et la plaque chaude est à 30°C).



Figure 49 : Fluxmètre thermique (HFM Netzsch HFM 436 Lambda)

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3. Mise au point d'une chaîne de mesure au niveau du bâtiment

Le bâtiment expérimental étudié dans cette thèse est localisé à Saint-André-de-Bohon, près de Carentan, dans la Manche (**Figure 50**). Il possède une superficie de 20 m² (avec une superficie intérieure utile de 13 m²). Son enveloppe est composée de quatre murs porteurs en double couche : bauge à l'intérieur et terre allégée à l'extérieur. Ce système doit permettre au bâtiment de se conformer à la réglementation thermique française (RT 2012).



Figure 50 : Image du bâtiment expérimental illustrant les murs nord, sud et ouest

Deux épaisseurs différentes sont utilisées : 70 cm pour les murs nord et est (30 cm de terre allégée, 40 cm de bauge) et 50 cm pour les murs sud et ouest (25 cm de terre allégée, 25 cm de bauge). Le soubassement utilisé est composé de béton léger et cellulaire afin d'éviter les remontées capillaires et d'assurer une résistance thermique similaire à celle des murs en terre-fibres. Ce prototype est également destiné à établir différents détails architecturaux de construction pour l'utilisation de ce type de matériaux. À chaque nouvelle levée, les coffrages sont installés et disposés de manière à assurer une bonne liaison avec la levée précédente. Les deux couches de chaque mur sont construites en même temps afin d'assurer une liaison entre elles (**Figure 51**). C'est probablement l'argile présente dans la formulation de terre allégée qui permet de créer une liaison entre les couches de bauge et de terre allégée.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES



Figure 51 : Mise en œuvre des mélanges dans le coffrage

Une chaîne de mesure a été mise en place pour étudier la cinétique de séchage des deux matériaux (bauge et terre allégée) dans les murs du bâtiment. Pour cela, une centrale de mesure et de contrôle CR1000X de Campbell Scientific et des capteurs CS655 ont été utilisés. Les sondes CS655 mesurent la température et la teneur en eau volumique au sein des matériaux. Une station météorologique (WS-GP1) a été installée près du bâtiment afin de suivre l'environnement extérieur du bâtiment. Elle permet de mesurer la température extérieure, l'hygrométrie ambiante, le rayonnement solaire, le vent (vitesse et direction) et la pluviométrie. Enfin, des comparateurs ont été positionnés pour mesurer la stabilité dimensionnelle des murs.

3.1 Installation des capteurs CS655

Afin de déterminer le comportement des matériaux dans différentes conditions, les murs ont été instrumentés avec 55 capteurs connectés à la centrale d'acquisition (**Figure 52**). Les capteurs CS655 ont été placés de manière horizontale pour assurer un meilleur contact entre les mélanges et les sondes et pour éviter une déformation des tiges qui pourrait modifier les valeurs mesurées.

Les sondes ont été positionnées parallèlement aux surfaces des murs à deux hauteurs différentes : 25 et 50 cm de la base des levées 2 et 3. Dans les deux cas, les sondes sont à 12,5 cm de profondeur : depuis la surface intérieure dans le cas de la bauge et depuis la surface extérieure dans le cas de la terre allégée (cf. annexes 1, 2, 3, 4 et 5).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES



Figure 52 : Capteurs connectés à la centrale d'acquisition

3.2 Installation de la station météo WS-GP1

Afin d'étudier l'impact éventuel de l'exposition du bâtiment pilote sur l'évolution de la teneur en eau volumique (VWC), les sondes ont été placées sur les murs ouest, sud et nord (**Figure 50 et Figure 52**). La mise en place de sondes à deux hauteurs différentes permet d'observer un éventuel apport d'eau lors de la construction d'une couche supplémentaire (mélange humide) sur la couche contrôlée (mélange sec), et la profondeur de pénétration de cette eau. De plus, les conditions météorologiques du site sont mesurées par une station météorologique WS-GP1 (**Figure 53**).



Figure 53 : Station météorologique WS-GP1

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

La **Figure 54** présente les mesures effectuées par la station météo, enregistrées toutes les 15 minutes pendant plus d'un an et demi. Elles regroupent la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement et les précipitations.

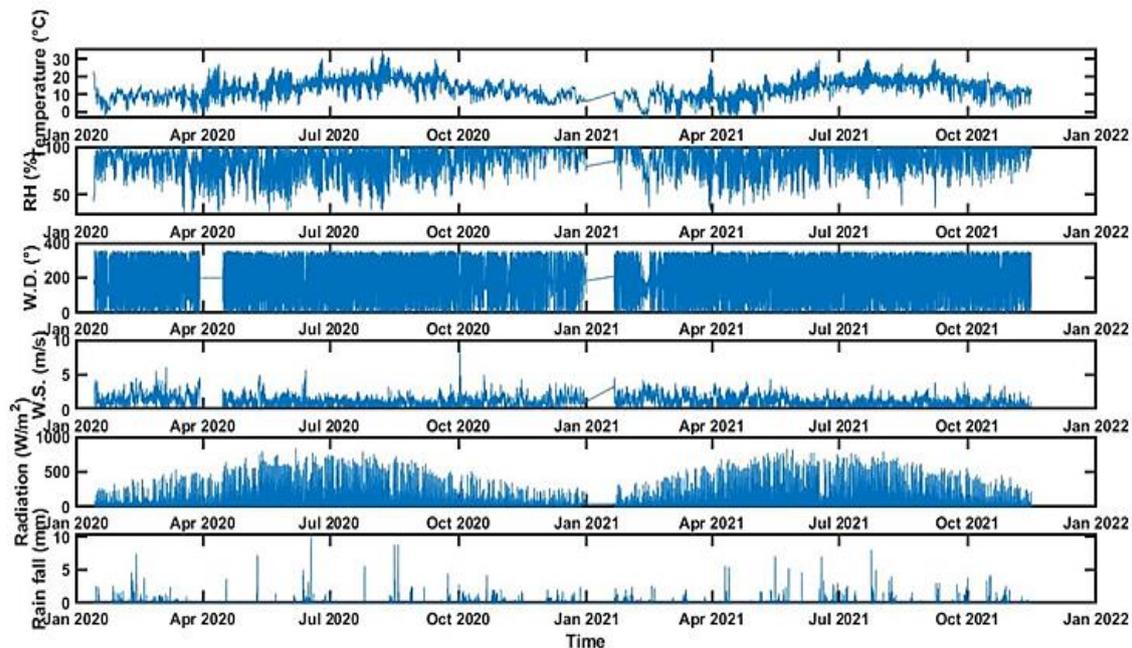


Figure 54 : Mesures effectuées par la station météorologique

3.3 Centrale d'acquisition CR1000X et multiplexeurs AM16/32B

3.3.1 Description de la centrale

La centrale de mesure et de contrôle CR1000X est fabriquée par Campbell Scientific. Cette centrale permet de connecter tous les capteurs utilisés pour les mesures sur les différents murs du bâtiment. Elle est couplée à deux multiplexeurs AM16/32B afin d'augmenter la capacité de connexion des capteurs. La centrale d'acquisition peut être connectée à différents capteurs qui peuvent fonctionner indépendamment en mode numérique ou analogique. L'unité de contrôle dispose de 16 entrées analogiques simples, qui peuvent être converties en 8 entrées différentielles en les couplant. Elle possède également 4 bornes de stimulation pour le fonctionnement de certains capteurs, 3 sorties 12V et une de 5V, ainsi que 4 ports numériques entrées/sorties. Le multiplexeur permet quant à lui de connecter 32 capteurs analogiques en entrées simples ou 16 en entrées différentielles. La centrale et les multiplexeurs sont connectés à une batterie 12V pour leur alimentation. Cette dernière peut être connectée directement au réseau 230V en continu dans le cadre d'une utilisation en laboratoire.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3.3.2 Programmation

La centrale d'acquisition est fournie avec un logiciel multitâche appelé *Loggernet* pour programmer les capteurs CS655. Il existe deux méthodes de programmation des capteurs connectés à la centrale d'acquisition :

- Une programmation symbolique via le logiciel « **ShortCut** » avec lequel on sélectionne simplement le(s) capteur(s) souhaité(s) à partir d'une liste et les paramètres à collecter. Le logiciel fournit ensuite un plan de branchement des câbles.
- Une programmation via le logiciel « **CRBasic** » dans un langage propre à Campbell, dans lequel l'utilisateur doit écrire lui-même l'ensemble de son programme.

L'inconvénient de la première méthode est la limitation du nombre de capteurs que l'on peut brancher sur la centrale. En effet, la centrale ne comporte que 6 bornes de masse et 12 de terre. Le logiciel *ShortCut* considère donc qu'il n'est plus possible d'ajouter de sonde lorsque toutes ces bornes sont occupées.

Il est en réalité possible d'augmenter la capacité de la centrale en bornes de terre et en masse en ajoutant un multiplexeur AM16/32. Ainsi, le passage par la deuxième méthode de programmation **CRBasic** devient nécessaire pour éviter cette contrainte. La fréquence d'enregistrement choisie pour les données des capteurs est de 15 minutes. Les données sont ensuite enregistrées dans la mémoire de la centrale et accessibles par simple branchement depuis un ordinateur.

3.4 Capteur de teneur en eau CS655

3.4.1 Description

La sonde CS655 est composée de deux tiges en acier inoxydable d'une longueur de 12 cm reliées à un circuit imprimé. Ce dernier est encapsulé dans de la résine époxy et un câble blindé est connecté au circuit. Les tiges courtes sont faciles à installer dans le sol et conviennent pour les sols ayant une conductivité électrique importante.

3.4.2 Fonctionnement des sondes

La sonde CS655 peut mesurer le temps de propagation des ondes, l'atténuation du signal et la température. La teneur en eau volumétrique (VWC) et la constante diélectrique sont ensuite déterminées à partir de ces valeurs (**Tableau 22**). La mesure de l'atténuation du signal corrige le moment où la réflexion des ondes est détectée. Cette correction améliore la mesure du

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

temps de propagation. Par conséquent, il est possible de mesurer précisément la teneur en eau dans le sol avec une conductivité $\leq 8 \text{ dS.m}^{-1}$ sans étalonner la sonde à l'avance.

Tableau 22: Gammes et exactitude des mesures (Campbell Scientific, 2020)

| | Conductivité électrique | Permittivité diélectrique relative | Teneur en eau volumique | Température du sol |
|--------------------------------------|---|---|--|--|
| Gamme pour solution CE | 0 à 8 dS/m | - | - | - |
| Gamme CE globale ou volumique | 0 à 8 dS/m | - | - | - |
| Gamme de mesures | - | 1 à 81 | 0 % à 100 % (avec la commande M4) | -50 °C à +70 °C |
| Exactitude des mesures | $\pm (5 \% \text{ de lecture} + 0,05 \text{ dS/m})$ | $\Rightarrow \pm (3 \% \text{ de lecture} + 0,8)$ pour une solution de 1 à 40 de conductivité électrique $\leq 8 \text{ dS/m}$. $\Rightarrow \pm 2\%$ pour une solution de 40 à 81 de conductivité électrique $\pm 2.8 \text{ dS/m}$ | $\Rightarrow \pm 1\% \text{ VWC}$ (avec étalonnage spécifique du sol) où la solution CE $< 3 \text{ dS/m}$ $\Rightarrow \pm 3\% \text{ VWC}$ (typique dans un sol minéral, où la conductivité électrique de la solution $\pm 10 \text{ dS/m}$) | $\Rightarrow \pm 0,1 \text{ °C}$ (pour des températures de sol allant de 0°C à 40°C lorsque la sonde est enterrée dans le sol) $\Rightarrow \pm 0,5 \text{ °C}$ (pour toute la plage de températures) |
| Fidélité des mesures | 0,5 % de la CEV (CE volumique) | $< 0,02$ | - | $\pm 0,02 \text{ °C}$ |
| Résolution | - | - | - | 0,001 °C |

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3.4.3 Méthode d'étalonnage des capteurs CS655 de teneur en eau

Les sondes des capteurs CS655 (12 cm) sont introduites dans deux échantillons de bauge et deux échantillons de terre allégée reproduits sur le chantier avec les dimensions

25 × 25 × 30 cm (**Figure 55**), avec une masse M_0 , une teneur en eau massique w et une permittivité diélectrique ϵ .

$$M_0 = M_{\text{échantillon}} - M_{\text{sonde}}$$

Avec : $M_{\text{sonde}} = 0,24$ kg (Campbell Scientific, 2020).



Figure 55 : Préparation des échantillons sur chantier pour étalonnage des capteurs

Le principe fondamental de la mesure de la teneur en eau du CS655 est que la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques le long des tiges des sondes dépend de la permittivité diélectrique du matériau entourant les tiges (Campbell Scientific, 2020).

Lorsque la teneur en eau augmente, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques diminue en raison de l'augmentation de la permittivité diélectrique. Les augmentations de la période d'oscillation résultant de l'atténuation du signal sont corrigées à l'aide d'une mesure de conductivité électrique. Une équation d'étalonnage convertit la période et la conductivité électrique en permittivité diélectrique globale.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

L'équation de Topp est utilisée pour convertir la permittivité en teneur en eau volumétrique. La relation entre la permittivité diélectrique et la teneur volumétrique en eau dans les sols minéraux a été décrite par (Topp *et al.*, 1980), de façon empirique en utilisant un polynôme du troisième degré :

$$\theta_v = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad \text{Équation 12}$$

Avec :

θ_v : teneur en eau volumétrique (m^3/m^3).

ε : permittivité diélectrique du sol (F.m^{-1}).

L'équation de Topp sous-estime la teneur en eau de certains éléments organiques, volcaniques et à texture fine des sols. De plus, les supports poreux avec une porosité supérieure à 0,5 ou une masse volumique supérieure à $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ peuvent nécessiter une équation d'étalonnage spécifique au support. Dans ces cas, d'après Campbell Scientific, 2020, nous pouvons développer une équation d'étalonnage pour déterminer la teneur volumétrique en eau à partir de la permittivité en fonction de la plage de teneurs en eau que l'on s'attend à mesurer avec la sonde.

Forme quadratique :

$$\theta_v(\varepsilon) = C_0 + C_1 \times \varepsilon + C_2 \times \varepsilon^2 \quad \text{Équation 13}$$

Forme polynomiale du 3^e degré :

$$\theta_v(\varepsilon) = C_0 + C_1 \times \varepsilon + C_2 \times \varepsilon^2 + C_3 \times \varepsilon^3 \quad \text{Équation 14}$$

Forme linéaire :

$$\theta_v(\varepsilon) = C_0 + C_1 \times \varepsilon^{0,5} \quad \text{Équation 15}$$

Avec :

θ_v : teneur volumétrique en eau

ε : permittivité diélectrique du sol

C_n : coefficient d'étalonnage.

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

La permittivité diélectrique ϵ pour un matériau donné dépend du volume et de la porosité (Zakri *et al.*, 1998). Nous pouvons contrôler le volume des pores par la densité sèche (d_s) du matériau, cette porosité peut être impactée par le mode de compactage et la teneur en eau w , (Mesbah *et al.*, 1999). Selon Chabriac *et al.*, 2014, pour l'étalonnage des capteurs CS655, nous pouvons nous appuyer sur 4 paramètres seulement au lieu de 12 en utilisant une relation bilinéaire. Ces paramètres sont les suivants :

w : teneur en eau massique

θ : teneur en eau volumique

T : température

ϵ : permittivité diélectrique.

La relation bilinéaire entre la teneur en eau volumique et la température est donnée par les équations 16 et 17 (Fabbri, 2006).

$$\epsilon = A.T.\theta + B.T + C.\theta + D \quad \text{Équation 16}$$

$$\epsilon' = A'.T.\theta + B'.T + C'.\theta + D' \quad \text{Équation 17}$$

D'après Fabbri, A, B, C, D et A', B', C', D' sont les coefficients d'étalonnage respectifs de deux sondes CS655 (Fabbri, 2006). Cette relation bilinéaire a été vérifiée pour les cycles gel/dégel des matériaux argileux (Fabbri, 2006) et permet de réaliser un étalonnage simple et rapide, par rapport à la relation de Topp proposée par Campbell Scientific, 2020. Dans notre cas, nous pouvons calculer la teneur en eau massique (w), la densité sèche (d_s) pour déduire la teneur en eau volumique (θ). La teneur en eau volumique θ est le rapport entre le volume d'eau dans le sol et le volume de l'échantillon.

La relation entre la teneur en eau volumique et massique est la suivante :

$$\theta = d_s \times w \quad \text{Équation 18}$$

d_s : densité sèche du mélange .

w : teneur en eau massique (%).

Note : La teneur volumique donnée par les capteurs correspond à un volume de sol de $0,0036 \text{ m}^3$ ($\sim 0,075 \text{ m}$ de rayon autour de chaque tige et $0,045 \text{ m}$ en bout de tige).

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

- **La démarche au laboratoire :**

1. Emballer les échantillons dans un film en plastique (**Figure 56**).
2. Peser les échantillons (M_0 humide) :
 - À température ambiante (20 °C) ;
 - Dans la chambre froide (0 °C).
3. Contrôler la température ambiante (40 °C) dans l'étuve.
4. Mesurer avec les capteurs :
 - La teneur en eau volumique ;
 - La température ;
 - La permittivité diélectrique.
7. Dès que la permittivité diélectrique est stable et/ou que la teneur en eau volumique est égale à 0 (échantillons complètement secs), et que la température est homogène en la comparant à celle de l'étuve, mesurer et calculer :
 - La masse des échantillons : $M_1 \text{ sec}$
 - La teneur en eau massique : $w (\%) = 100 \times [(M_1 - M_0) / M_1]$
 - La densité des échantillons : $d_s = M_1 / \text{Volume}$
8. Calculer la teneur en eau volumique par perte de masse $\theta = d_s \times w$
9. À partir des équations 16 et 17, calculer les coefficients d'étalonnage (A, B, C, D et A', B', C', D').
10. **Vérification d'étalonnage :** le séchage de chacun des échantillons étant effectué simultanément et dans les mêmes conditions (40 °C), on recalcule la teneur en eau volumique selon l'équation 19 à partir de la permittivité diélectrique ϵ mesurée par les sondes, de la teneur eau volumique contrôlée par pesées et des coefficients d'étalonnage A, B, C, D et A', B', C', D':

$$\theta = (\epsilon - B.T - D) / A.T + C$$

Équation 19

CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES



Figure 56 : Mesures de la teneur en eau volumique, de la température et de la permittivité diélectrique

3.5 Mesures de retrait

De nombreuses techniques peuvent être utilisées pour mesurer le retrait et les déformations sur chantier des bâtiments et des infrastructures : capteurs à fibre optique, technologie de balayage laser 3D, extensomètres, etc. Les capteurs à fibre optique et la technologie de balayage laser 3D ont été écartés pour des raisons économiques et de non-adéquation au site.

Les extensomètres peuvent être utilisés pour des contrôles non destructif et suivre les déformations sur chantier des éléments de construction de bâtiments ou d'ouvrages d'art (Álvarez-Vigil *et al.*, 2010), mais cette technologie n'a pas été retenue, compte tenu des contraintes du site, notamment la présence des coffrages et les problèmes de fixation sur de tels matériaux (**Figure 51**).

Une solution alternative, inspirée des études en laboratoire, a donc été conçue. Le retrait vertical sur chantier a été mesuré à l'aide de comparateurs SC25 de Borletti avec une plage de mesure de 25 mm et une résolution de 0,01 mm. Deux indicateurs à cadran ont été placés au centre de chaque couche de bauge et de terre allégée. L'extrémité de chaque indicateur était placée sur une latte métallique enfoncée dans le sol.

CHAPITRE III
REPRODUCTION DES MATÉRIAUX
EN LABORATOIRE

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

L'objectif de cette partie est de définir une méthode laboratoire reproductible et indépendante de l'opérateur. Pour cela, une machine Proctor automatique a été utilisée pour la fabrication des échantillons avec un compactage en 3 couches en utilisant différentes énergies. La machine Proctor nous permet de contrôler l'énergie de compactage et avoir des matériaux homogènes qui seront comparés à ceux sur le chantier.

Dans un premier temps, des données issues du chantier sont détaillées sous forme de cahier des charges afin de pouvoir identifier les paramètres clés sur la reproductibilité des résultats laboratoire par rapport aux résultats sur chantier. Ensuite, l'utilisation de différentes énergies de compactage par le biais d'une machine Proctor automatique permettra de reproduire une gamme de masses volumiques en laboratoire. Enfin, les différences entre les propriétés de mélanges en laboratoire et sur chantier sont étudiées afin de développer un protocole d'essais qui répond à la différence des effets d'échelles entre le laboratoire et le chantier.

1. Analyse des résultats sur chantier

1.1 Teneur en eau initiale

Durant les travaux de réalisation des quatre levées du bâtiment, la teneur en eau dans le mélange sur chantier était comprise entre 18 % et 21 % pour la bauge et entre 72 % et 83 % pour la terre allégée (**Figure 57**). Par rapport à la valeur moyenne (19,5 % pour la bauge et 77,5 % pour la terre allégée), les résultats montrent que la variation de la teneur en eau peut atteindre environ +7,7 % pour la bauge et +7,1 % pour la terre allégée pendant la phase de construction.

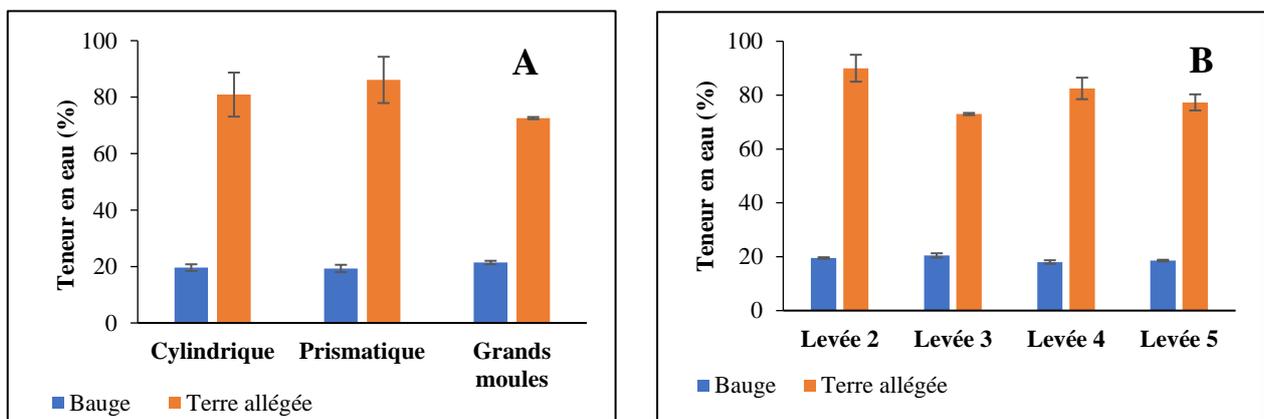


Figure 57 : Teneur en eau des mélanges sur chantier pour différentes formes d'échantillons (A) et levées (B).

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

La variation de la teneur en eau peut être due aux conditions climatiques, surtout pour la terre allégée. Elle peut également s'expliquer par le fait que les moules n'ont pas tous les mêmes dimensions, donc pas la même surface d'évaporation. De plus, la teneur en eau des moules de grande taille est mesurée directement à partir de la masse humide, tandis qu'elle est calculée à partir de la masse sèche pour les moules cylindriques et prismatiques.

Selon les résultats présentés dans la **Figure 57**, les mélanges bauge et terre allégée possèdent respectivement une teneur en eau initiale moyenne de 20 % et de 80 %. Le pourcentage de la teneur en eau initiale est lié à la masse sèche des mélanges sol-fibres.

1.2 Masse volumique sèche

Les masses volumiques sur chantier pour différentes levées ont été déterminées sur différentes dimensions d'échantillons. Les résultats présentés dans la **Figure 58** indiquent une variation de 4,75 % de la masse volumique sèche moyenne de la bauge : elle est de 1702 kg/m³ pour les spécimens prismatiques/cylindriques et de 1783 kg/m³ pour les grands moules. Dans le cas de la terre allégée, la variation de la masse volumique sèche est de 9,93 %, avec une moyenne de 487 kg/m³ pour les échantillons cylindriques/prismatiques et de 443 kg/m³ pour les grands moules (**Figure 58**).

Pour la bauge, la variation de la masse volumique sèche peut être due au volume de l'éprouvette, qui est plus important lorsque l'on utilise des grands moules. Il est fortement probable que l'élasticité des fibres de lin à 2,5 % (% massique) et un coefficient d'absorption d'eau important (450 %) puisse conduire à un gonflement immédiat après le compactage qui serait proportionnel à la taille de l'éprouvette. De plus, dans les grands moules, la masse volumique importante des sols 1 et 2 domine par rapport à la masse volumique de fibres de lin.

Pour la terre allégée, la variation de la masse volumique est plus importante lorsque l'on utilise des petits moules, car le volume de fibres de roseau est moins important que dans les grands moules. De plus, dans les grands moules, la masse volumique du roseau à 35 % (% massique) domine par rapport à la densité du sol 3.

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

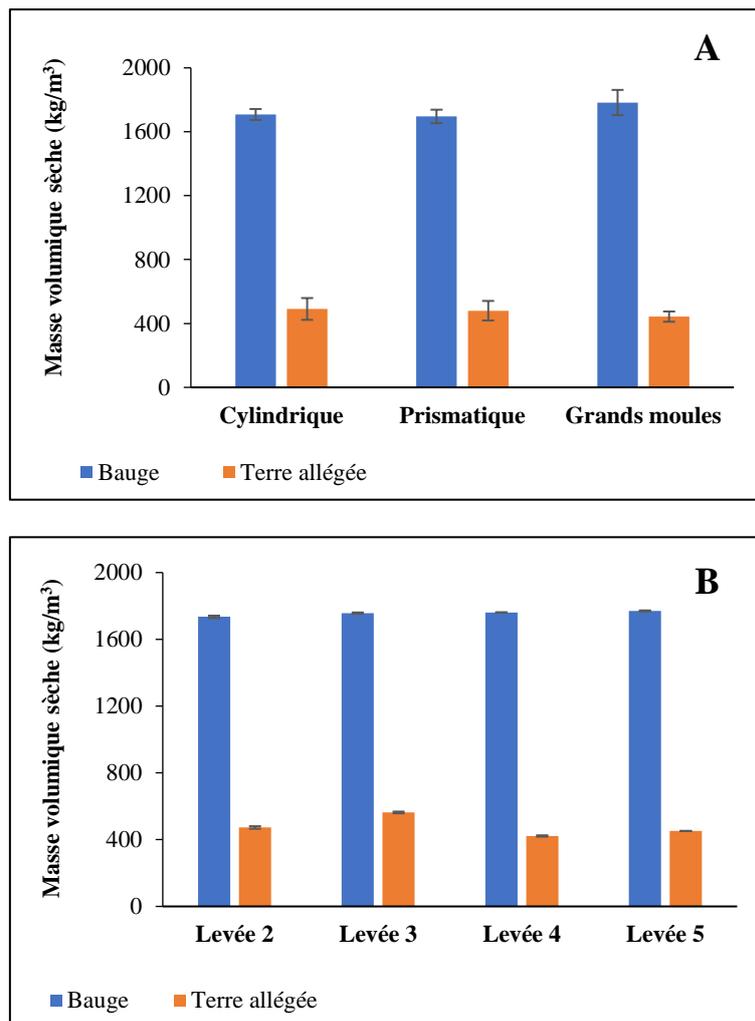


Figure 58 : Masse volumique sèche des mélanges sur chantier pour différentes formes d'échantillons (A) et levées (B).

L'analyse de la masse volumique sèche moyenne pour les différentes levées avec des échantillons cylindriques/prismatiques montre que la masse volumique sèche se situe entre 1691 et 1789 kg/m³ pour la bauge et entre 420 et 565 kg/m³ pour la terre allégée (**Figure 58**). En tenant compte des quatre levées, une variation de la masse volumique de 3 % pour la bauge et de 15 % pour la terre allégée peut être observée (**Figure 58**). La grande variation de la masse volumique sèche de la terre allégée est due à la variation de la teneur en eau (de 72 % à 83 %).

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

1.3 Propriétés mécaniques

Les résistances à la compression des échantillons des différentes levées sont présentées dans la **Figure 59**. Dans le cas de la bauge, la résistance à la compression à 2 % de déformation varie entre 0,96 et 1,35 MPa. Ces valeurs sont en accord avec celles de la littérature (cf. **Tableau 2**). La variation maximale de la résistance à la compression entre les quatre levées du bâtiment est de 16 %. Pour la terre allégée, les valeurs mesurées sont comprises entre 0,03 et 0,12 MPa. Ces valeurs sont faibles par rapport à celles de la bauge.

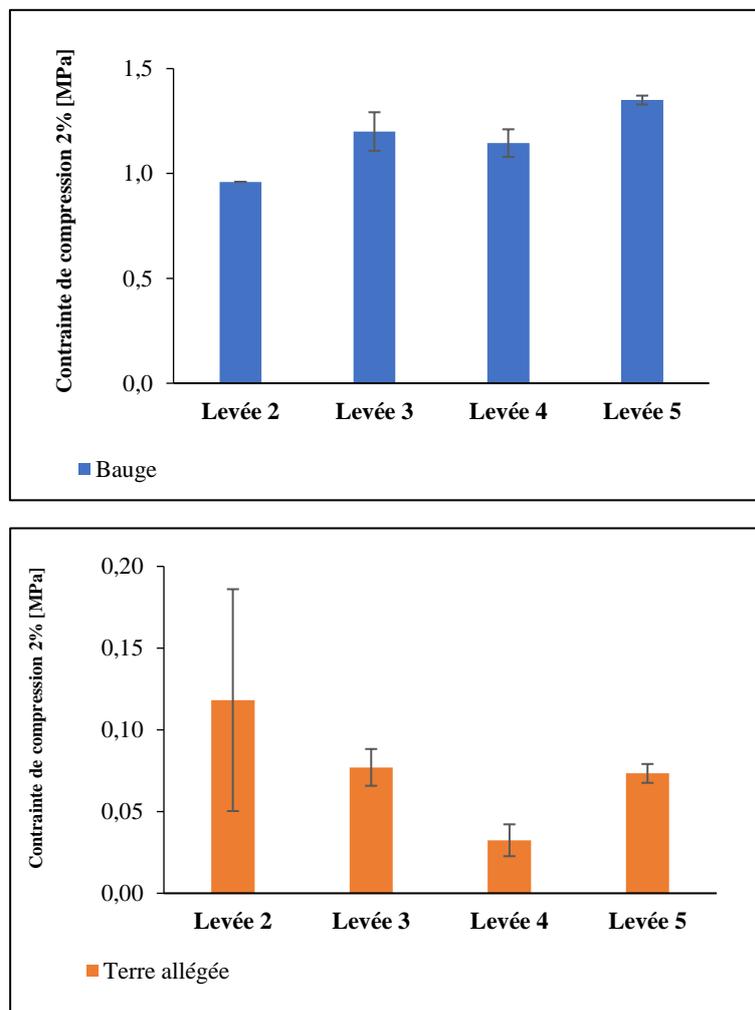


Figure 59 : Résistance à la compression sur chantier à 2 % de déformation

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

1.4 Conductivité thermique

Selon des travaux de recherches de Hamard *et al.*, 2016; Saxton, 1995, plusieurs études hygrothermiques ont été menées sur le pisé et d'autres formes de techniques de construction en terre. Peu d'investigations ont été réalisées sur les propriétés thermiques de la bauge et de la terre allégée. Les résultats sont présentés dans la **Figure 60**.

À l'exception de la levée 4 avec une valeur de $0,836 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, la conductivité thermique de la bauge varie peu entre $0,610$ et $0,650 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Pour la terre allégée, la conductivité thermique varie de $0,132$ à $0,146 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. En considérant les quatre levées, les conductivités thermiques de la bauge et de la terre allégée présentent une variation de 5 %.

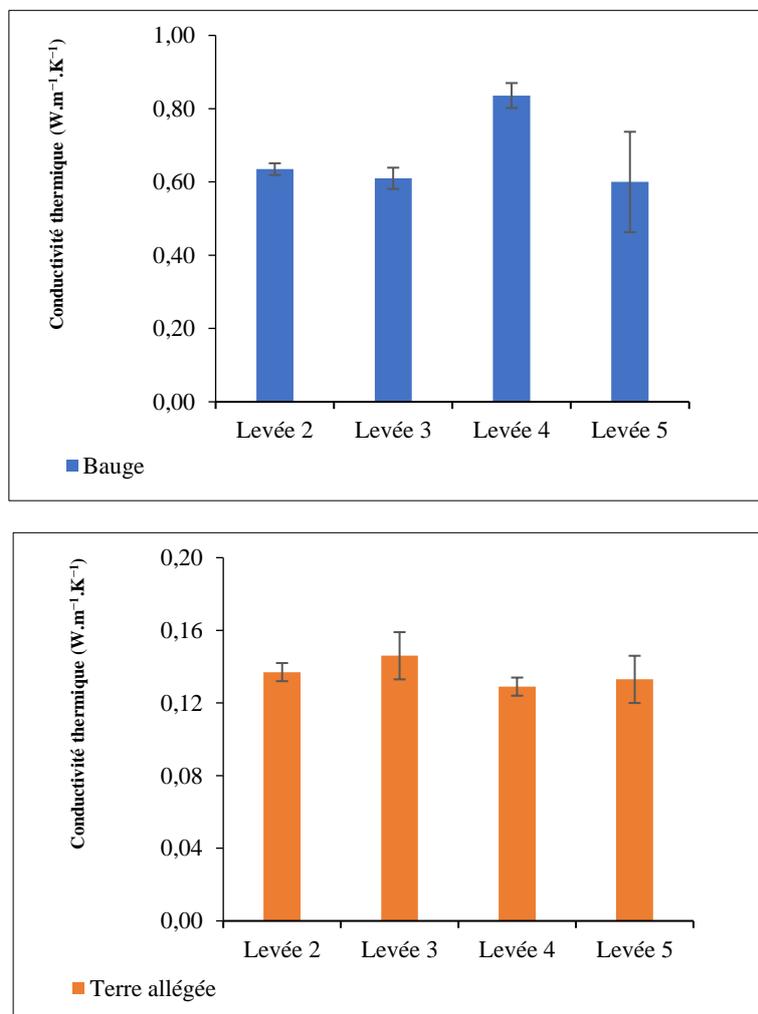


Figure 60 : Conductivité thermique de la bauge et de la terre allégée sur chantier

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

1.5 Porosité accessible à l'eau

La formation de porosité est liée à l'évaporation de l'eau colloïdale après séchage du mélange constitué essentiellement d'argile et de fibres végétales. D'après le **Tableau 23**, la porosité de la bauge est inférieure de 53,13 % à celle de la terre allégée.

Tableau 23 : Porosité de la bauge et de la terre allégée sur chantier

| Matériau | M _s [g] | M _a [g] | M _h [g] | Masse volumique sèche [kg/m ³] | Porosité "Φ" [%] |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|------------------|
| Bauge | 155,1 ± 10 | 176,7 ± 12 | 105,8 ± 7 | 1751 ± 39 | 30 ± 1 |
| Terre allégée | 36,1 ± 13 | 67,3 ± 23 | 18,2 ± 6 | 585 ± 13 | 64 ± 2 |

2. Analyse des résultats à l'échelle du laboratoire

Les formulations en laboratoire citées dans le chapitre II (cf. section 2.1.3) ont été analysées pour préparer des mélanges de bauge et de terre allégée plus représentatifs de ceux sur chantier et respecter ainsi le cahier des charges. Une machine Proctor automatique a été utilisée pour compacter les échantillons en appliquant différents nombres de coups correspondant à différentes énergies de compactage (**Tableau 24**).

Tableau 24 : Énergies de compactage en laboratoire

| | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nombre de coups | 8 | 14 | 20 | 26 | 32 |
| Énergie de compactage (MJ/m ³) | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |

Le moule Proctor de type A a été remplacé par un moule cylindrique similaire à celui utilisé pour les éprouvettes de compression (Ø110 mm × H220 mm). Pour déterminer l'énergie de compactage représentant au mieux la réalité du chantier, il a été choisi de se baser sur la masse volumique sèche obtenue.

2.1 Masse volumique sèche

Les masses volumiques sèches des échantillons obtenus pour les différentes énergies de compactage sont présentées dans la **Figure 61**. Les résultats indiquent que la masse volumique sèche moyenne de la bauge varie de manière proportionnelle avec l'énergie de compactage jusqu'à 0,6 MJ/m³ (entre 1549 kg/m³ et 1739 kg/m³), puis diminue. Pour la terre allégée, la masse volumique sèche se situe entre 460 et 636 kg/m³. Cette variation de la masse volumique sèche est due aux différentes énergies de compactage. Nous estimons qu'après le

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

compactage, l'absorption des fibres conduit à un gonflement immédiat, et augmente la porosité après évaporation de l'eau.

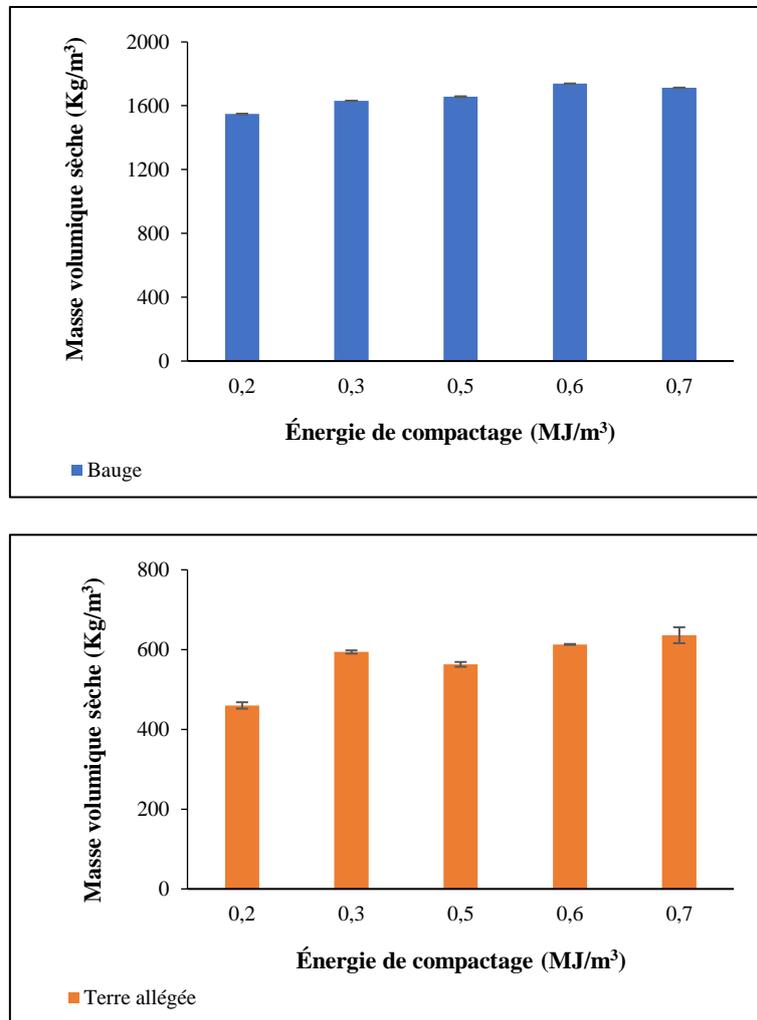


Figure 61 : Masse volumique sèche des mélanges en laboratoire pour différentes énergies de compactage

2.2 Propriétés mécaniques

Les résistances à la compression des échantillons aux différentes énergies de compactage sont présentées dans la Figure 62. Dans le cas de la bauge, la résistance à la compression à 2 % de déformation varie entre 0,78 et 1,45 MPa. Ces valeurs sont en accord avec celles de la littérature (cf. Tableau 2). Pour la terre allégée, les valeurs mesurées sont comprises entre 0,06 et 0,19 MPa. Ces valeurs sont faibles par rapport à celles de la bauge.

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

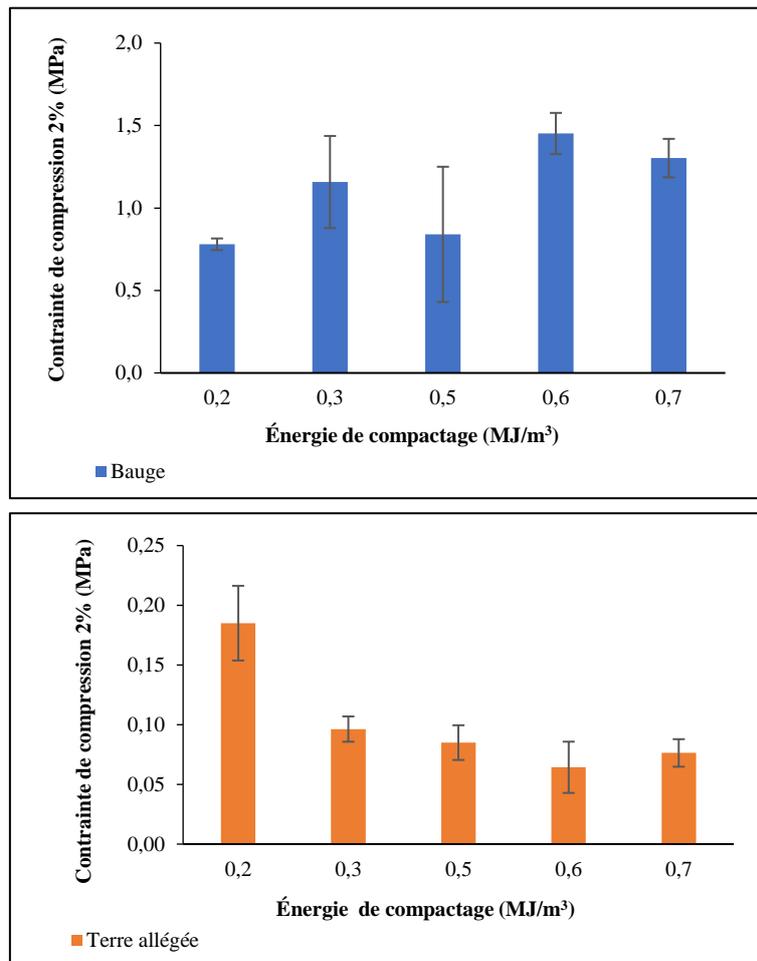


Figure 62 : Résistance à la compression en laboratoire à 2 % de déformation

2.3 Conductivité thermique

Les résultats sont présentés dans la Figure 63. La conductivité thermique de la bauge se situe entre 0,460 et 0,743 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pour la terre allégée, la conductivité thermique varie de 0,142 à 0,176 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

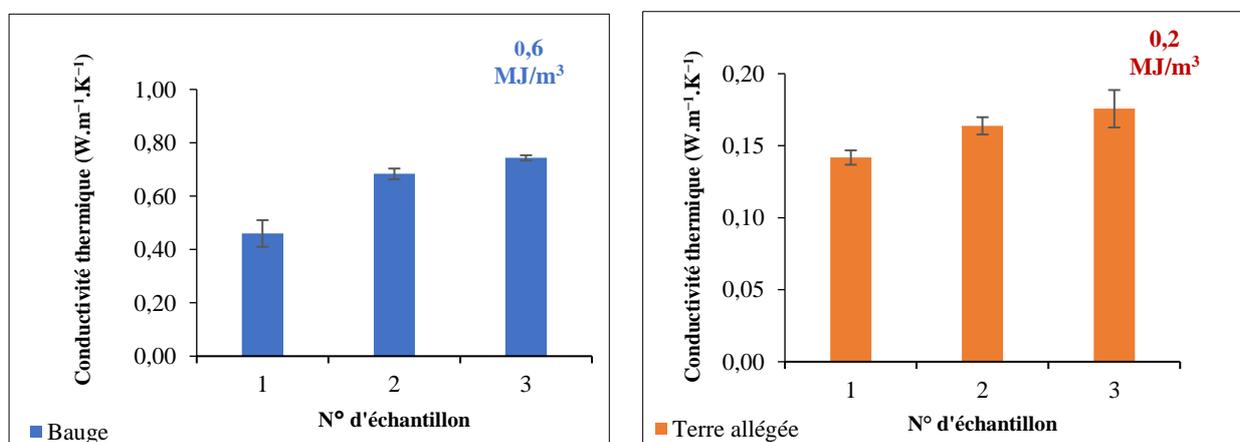


Figure 63 : Conductivité thermique de la bauge et de la terre allégée en laboratoire

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

Pour la bauge, la résistance à la compression à 2 % de déformation pour une énergie de compactage à 0,6 MJ/m³ est de 1,45 MPa, avec une conductivité thermique allant de 0,460 à 0,743 W.m⁻¹.K⁻¹. Pour la terre allégée, la résistance à la compression à 2 % de déformation pour une énergie de compactage à 0,2 MJ/m³ est de 0,19 MPa, avec une conductivité thermique allant de 0,142 à 0,176 W.m⁻¹. K⁻¹.

2.4 Porosité accessible à l'eau

La formation de porosité est liée à l'évaporation de l'eau colloïdale après séchage du mélange constitué essentiellement des argiles et fibres végétales. D'après le **Tableau 25**, la porosité de la bauge est inférieure de 45 % à celle de la terre allégée.

Tableau 25 : Porosité de la bauge et de la terre allégée au laboratoire

| Matériau | Énergie de compactage (MJ/m ³) | M _s [g] | M _a [g] | M _h [g] | Masse volumique sèche [kg/m ³] | Porosité "Φ" [%] |
|---------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--|------------------|
| Bauge | 0,6 | 114,7 ± 10 | 130,2 ± 11 | 77,8 ± 4 | 1756 ± 81 | 29 ± 3 |
| Terre allégée | 0,2 | 54,7 ± 13 | 94,6 ± 23 | 19,3 ± 5 | 581 ± 30 | 53 ± 3 |

3. Corrélation laboratoire-chantier

D'après les résultats obtenus (**Figure 64**), la reproduction en laboratoire de la masse volumique sur chantier de la bauge a nécessité une énergie de compactage de 0,6 MJ/m³. Pour la terre allégée, une énergie de compactage de 0,2 MJ/m³ s'est avérée nécessaire. En effet, la résistance à la compression et la conductivité thermique au laboratoire étaient plus élevées que celles sur chantier. Nous supposons que cela est dû au fait que le compactage Proctor rend le matériau plus homogène. Par conséquent, des facteurs de correction ont été appliqués aux valeurs du laboratoire pour prédire les valeurs sur chantier (**Tableau 26**).

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

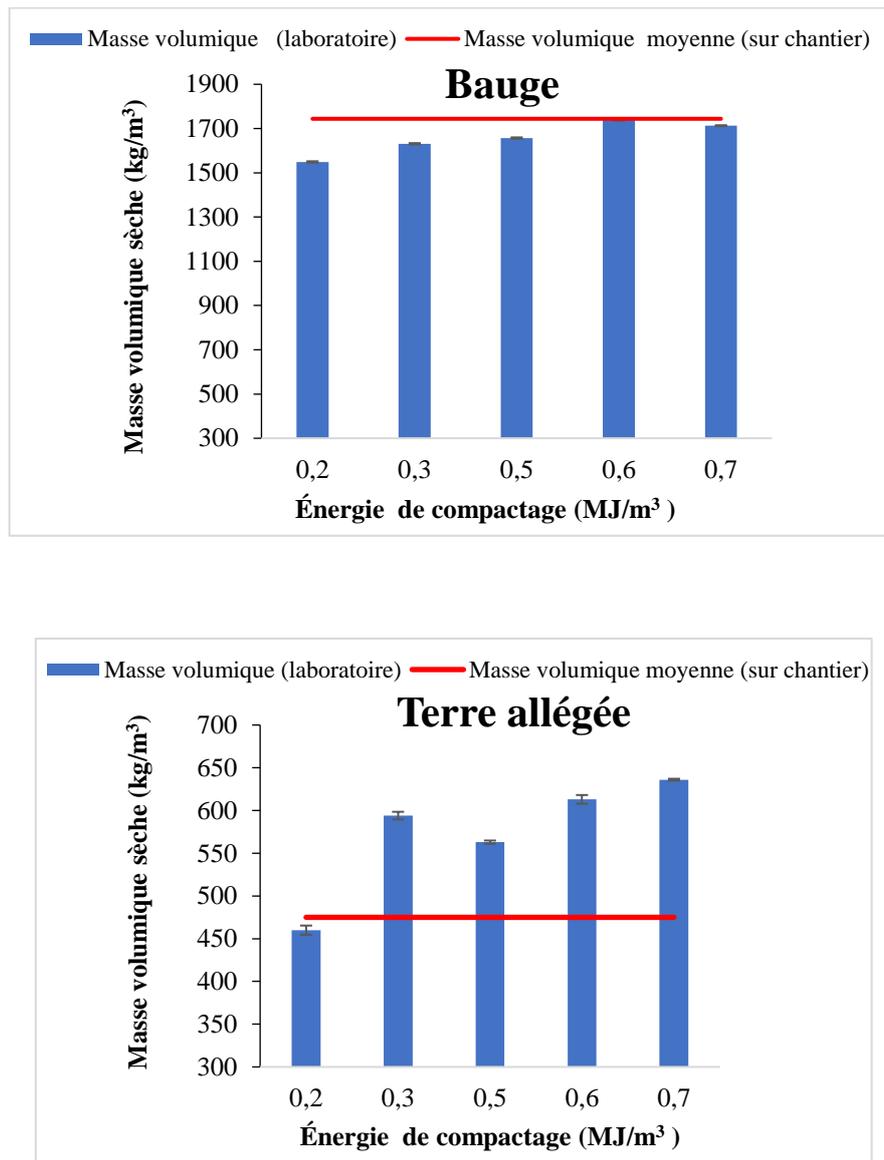


Figure 64 : Analyse de la masse volumique du mélange sur chantier et mélange au laboratoire

Tableau 26 : Facteurs de correction des mélanges du laboratoire

| Matériau | | $\sigma_{2\%}$ (MPa) | Facteur de correction de $\sigma_{2\%}$ | λ moyenne [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | Facteur de correction de λ |
|---------------|-------------|----------------------|---|---|------------------------------------|
| Bauge | Chantier | 1,35 ± 0,02 | 0,88 | 0,683 ± 0,054 | 1,17 |
| | Laboratoire | 1,54 ± 0,02 | | 0,713 ± 0,042 | |
| Terre allégée | Chantier | 0,08 ± 0,01 | 0,67 | 0,139 ± 0,009 | 2,44 |
| | Laboratoire | 0,12 ± 0,03 | | 0,160 ± 0,018 | |

CHAPITRE III : REPRODUCTION DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de la bauge et de la terre légère sur chantier et en laboratoire.

Les mélanges sur chantier ont été analysés pour évaluer la variabilité des propriétés entre quatre levées du bâtiment prototype. En ce qui concerne la bauge, la teneur en fibres varie de 2,1 % à 2,3 %, et la teneur en eau de 18 % à 21 %. La masse volumique sèche était comprise entre 1691 et 1789 kg/m³. La résistance à la compression à 2 % de déformation variait entre 0,96 et 1,45 MPa. Cela représente une variation de 16 % de la résistance à la compression de la bauge pendant la construction du prototype. À l'exception de la levée 4, la conductivité thermique a varié de 0,610 à 0,650 W.m⁻¹.K⁻¹.

La teneur en eau de la terre allégée varie de 72 % à 83 %, et sa masse volumique sèche était comprise entre 420 et 565 kg/m³. En ce qui concerne la conductivité thermique de la terre allégée, elle a varié de 0,132 à 0,146 W.m⁻¹.K⁻¹, ce qui représente une variation de 5 % de la conductivité thermique de la terre allégée pendant la construction du prototype.

Au laboratoire, une machine automatique Proctor a été utilisée avec différentes énergies de compactage pour préparer les échantillons. Les formulations du mélange en laboratoire étaient basées sur les pourcentages moyens des matériaux utilisés dans les mélanges sur chantier. Les masses volumiques ont été utilisées pour déterminer l'énergie de compactage permettant d'obtenir des matériaux similaires en laboratoire et sur chantier. Une énergie de compactage de 0,6 MJ/m³ s'est avérée appropriée pour la bauge et de 0,2 MJ/m³ pour la terre allégée. Ensuite, les propriétés mécaniques et thermiques des échantillons au laboratoire ont été mesurées. Les valeurs obtenues pour les échantillons au laboratoire étant différentes de celles sur chantier, des facteurs de correction ont été appliqués aux valeurs de laboratoire pour prédire les valeurs sur chantier.

CHAPITRE IV
ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT
EXPÉRIMENTAL

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

1. Résultats d'étalonnage des capteurs CS655 au laboratoire

Les étalonnages ont été réalisés dans des chambres climatiques à différentes températures (0 °C, 20 °C et 40 °C) sur deux échantillons de bauge et deux échantillons de terre allégée (25 × 25 × 30 cm) équipés de capteurs CS655 (**Figure 55**). Les résultats détaillés sont présentés ci-après.

1.1 Bauge

1.1.1 Étalonnage à 0 °C

Lors de l'étalonnage des capteurs à 0°C, pour une variation par diminution de 1 à 2 % de la teneur en eau des échantillons 1 et 2 de bauge, nous constatons une diminution linéaire de perte de masse allant d'une teneur en eau massique de 16 % à 4 % pour l'échantillon 1, et de 8,5 % à 2,4 % pour l'échantillon 2 (**Tableau 27**).

Tableau 27 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 0 °C

| Bauge 0 °C | Teneur en eau (%) | | |
|-----------------|-------------------|---------------|----------------------|
| Échantillon 1 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 9 | 6 | 16 |
| 2 | 17 | 11 | 12 |
| 3 | 10,3 | 7 | 8 |
| 4 | 8 | 4 | 5 |
| 5 | 5 | 3 | 4 |
| Échantillon 2 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 7 | 4,3 | 8,5 |
| 2 | 8,2 | 4,8 | 8 |
| 3 | 3,3 | 2,2 | 3,6 |
| 4 | 2 | 1,5 | 2,8 |
| 5 | 1,1 | 0,8 | 2,4 |

Concernant l'échantillon 1 (**Figure 65**), la comparaison des valeurs de teneur en eau massique mesurées par les capteurs et celles obtenues par perte de masse met en évidence une anomalie au niveau du point de mesure 2, avec l'augmentation de la teneur en eau de 6 à 11 %. Cela peut être dû à l'absorption par l'échantillon de l'humidité de la chambre climatique les premiers jours. Par la suite, les mesures des capteurs indiquent une diminution régulière de la

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

teneur en eau massique jusqu'à 3 %, ce qui veut dire que l'échantillon reste humide à l'intérieur et autour du capteur.

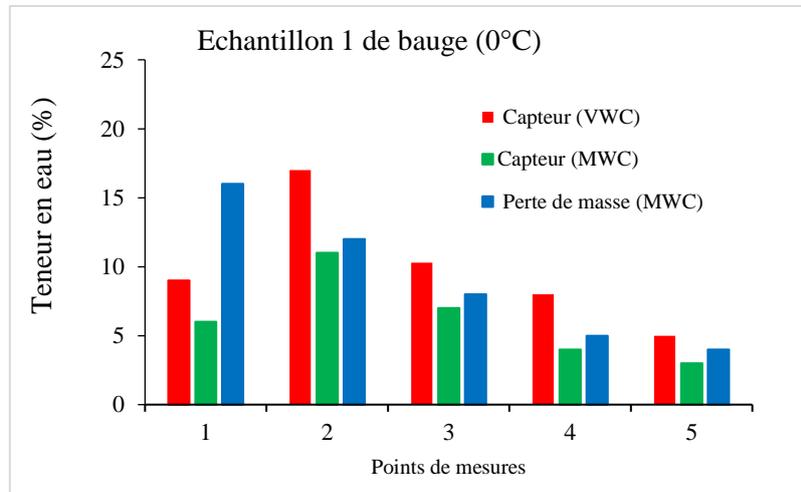


Figure 65 : Étalonnage de l'échantillon 1 de bauge à 0 °C en chambre climatique

Concernant l'échantillon 2, les mesures de teneur en eau massique par les capteurs ou par perte de masse suivent la même tendance que celles de l'échantillon 1 (**Figure 66**). Au niveau du point de mesure 2, une anomalie apparaît avec une légère augmentation de la teneur en eau de 4,3 à 4,8 %, peut-être due à l'absorption par l'échantillon de l'humidité de la chambre climatique les premiers jours. Les capteurs indiquent une diminution régulière de la teneur en eau massique jusqu'à 0,8 %. Dans ce cas, nous pouvons considérer que l'échantillon est sec.

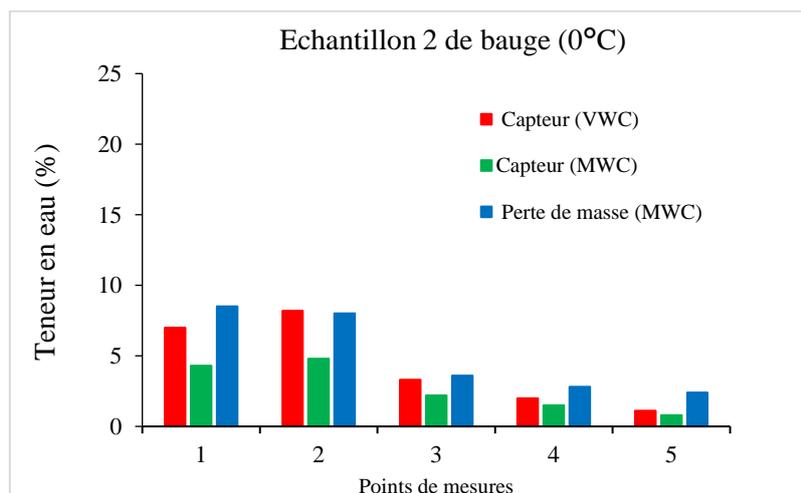


Figure 66 : Étalonnage de l'échantillon 2 de bauge à 0 °C en chambre climatique

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

1.1.2 Étalonnage à 20 °C

Lors de l'étalonnage des capteurs à 20 °C, pour une variation par diminution de 1 % de la teneur en eau des échantillons 1 et 2 de bauge, les mesures par perte de masse indiquent une diminution linéaire de la teneur en eau massique de 16,5 % à 3 % pour l'échantillon 1, et de 12 % à 1,6 % pour l'échantillon 2 (Tableau 28).

Tableau 28 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 20 °C

| Bauge 20 °C | Teneur en eau (%) | | |
|-----------------|-------------------|---------------|----------------------|
| | Échantillon 1 | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 24 | 16,1 | 16,5 |
| 2 | 16,2 | 12,1 | 13,5 |
| 3 | 11,9 | 7,3 | 8 |
| 4 | 8 | 5 | 5 |
| 5 | 5 | 3 | 3 |
| | Échantillon 2 | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 12,5 | 8,6 | 12 |
| 2 | 8,6 | 5,3 | 7 |
| 3 | 4,7 | 3 | 3,5 |
| 4 | 2,5 | 1,5 | 1,5 |
| 5 | 1,3 | 0,9 | 1,6 |

Pour l'échantillon 1 (Figure 67), les mesures de teneur en eau massique par les capteurs ou par perte de masse indiquent une diminution régulière jusqu'à 3 % de teneur en eau massique, du fait d'un séchage extérieur de l'échantillon qui reste humide à l'intérieur et autour du capteur. Nous pouvons considérer que la valeur du capteur est fiable.

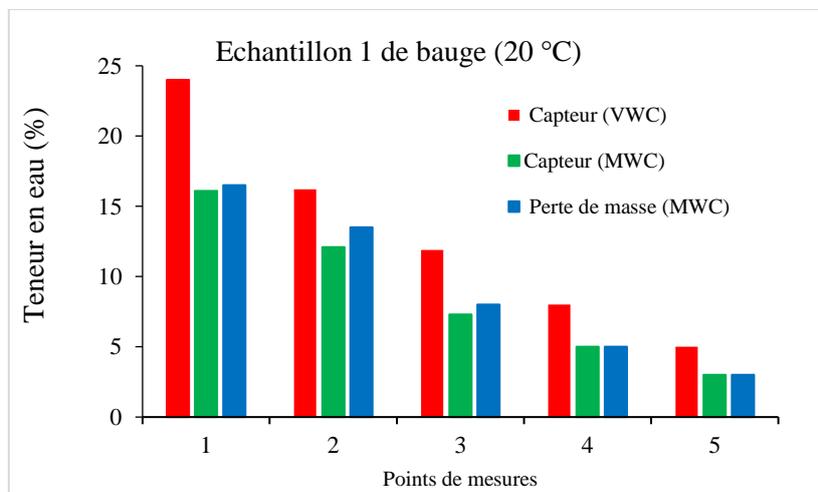


Figure 67 : Étalonnage de l'échantillon 1 de bauge à 20 °C à l'air ambiant

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Pour l'échantillon 2 (**Figure 68**), les mesures de teneur en eau massique par les capteurs et par perte de masse donnent les mêmes résultats : elles diminuent de façon régulière jusqu'à 0,9 %. Nous pouvons considérer que l'échantillon 2 est sec.

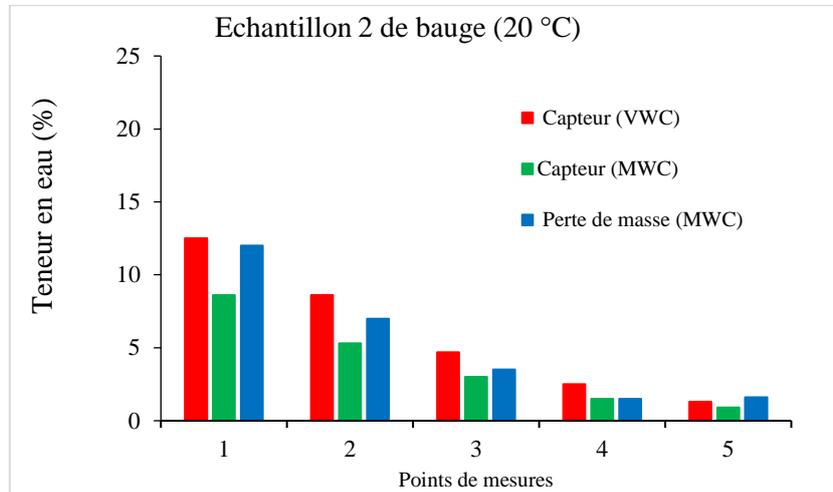


Figure 68 : Étalonnage de l'échantillon 2 de bauge à 20 °C à l'air ambiant

1.1.3 Étalonnage à 40 °C

Lors de l'étalonnage des capteurs à 40 °C, pour une variation par diminution de 2 % de la teneur en eau des échantillons 1 et 2 de bauge, les mesures par perte de masse indiquent une diminution linéaire de la teneur en eau massique de 12 % à 3 % pour l'échantillon 1, et de 6,7 % à 1,5 % pour l'échantillon 2 (**Tableau 29**).

Tableau 29 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 40 °C

| Bauge 40°C | Teneur en eau (%) | | |
|-----------------|-------------------|---------------|----------------------|
| Échantillon 1 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 22 | 14,8 | 12 |
| 2 | 13 | 9 | 5,7 |
| 3 | 10 | 7 | 6 |
| 4 | 7,2 | 4,5 | 3,8 |
| 5 | 4,8 | 3 | 3 |
| Échantillon 2 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 10 | 6 | 6,7 |
| 2 | 6 | 4,5 | 3,5 |
| 3 | 4,8 | 3 | 2,5 |
| 4 | 3 | 2 | 1,5 |
| 5 | 2,3 | 1,5 | 1,5 |

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Pour l'échantillon 1 (**Figure 69**), les mesures de teneur en eau massique par les capteurs ou par perte de masse indiquent une diminution régulière jusqu'à 3 % de teneur en eau massique, du fait d'un séchage extérieur de l'échantillon qui reste humide à l'intérieur et autour du capteur. Nous pouvons considérer que la valeur du capteur est fiable.

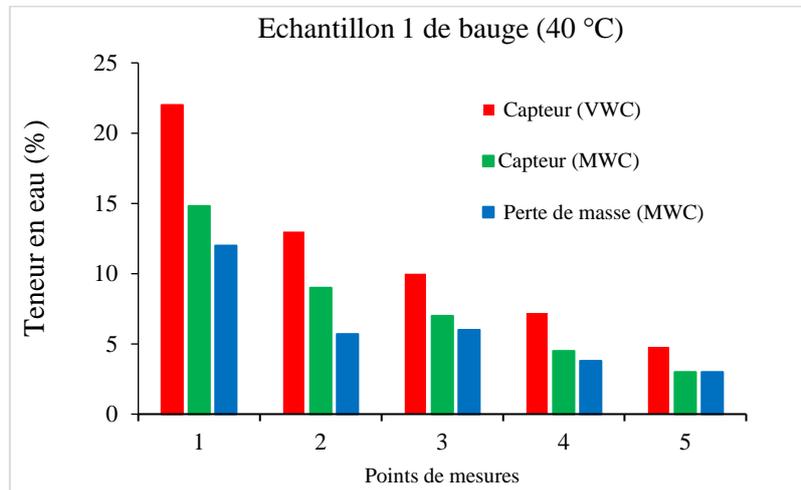


Figure 69 : Étalonnage de l'échantillon 1 de bauge à 40 °C à l'étuve

Pour l'échantillon 2 (**Figure 70**), les mesures de teneurs en eau massique par les capteurs et par perte de masse suivent la même tendance que celles de l'échantillon 1. Elles indiquent une diminution régulière jusqu'à 1,5 % de teneur en eau massique, du fait d'un séchage extérieur de l'échantillon qui reste humide à l'intérieur et autour du capteur. Nous pouvons considérer que la valeur du capteur est fiable.

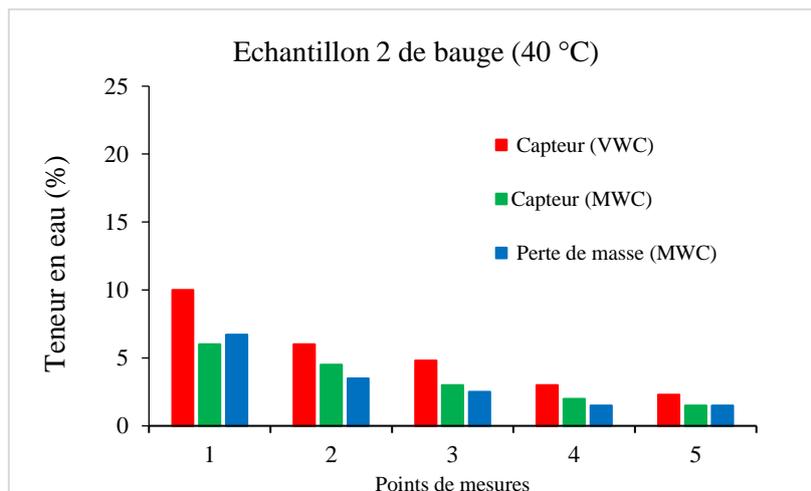


Figure 70 : Étalonnage de l'échantillon 2 de bauge à 40 °C à l'étuve

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

1.2 Terre allégée

1.2.1 Étalonnage à 0 °C

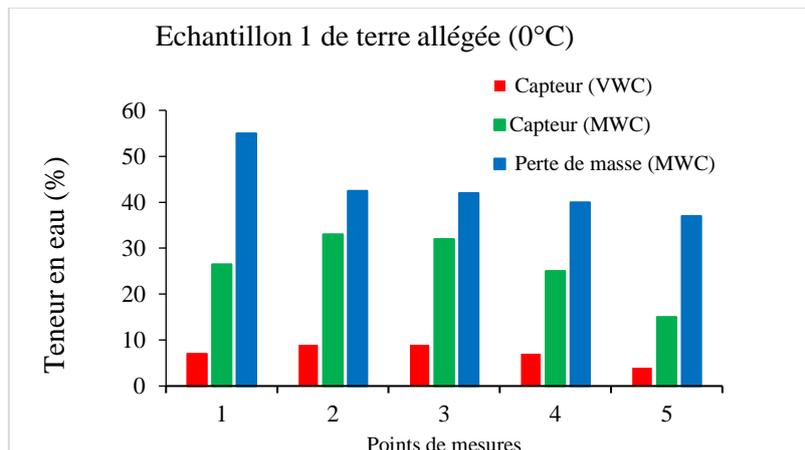
L'étalonnage des capteurs à 0 °C indique une diminution linéaire des mesures de teneur en eau massique par perte de masse de 55 % à 37 % pour l'échantillon 1, et de 46 % à 34 % pour l'échantillon 2 (Tableau 30).

Tableau 30 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 0 °C

| Terre allégée 0 °C | Teneur en eau (%) | | |
|--------------------|-------------------|---------------|----------------------|
| | Échantillon 1 | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 7 | 26,5 | 55 |
| 2 | 9 | 33 | 42,5 |
| 3 | 9 | 32 | 42 |
| 4 | 7 | 25 | 40 |
| 5 | 4 | 15 | 37 |
| | Échantillon 2 | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 0,8 | 5 | 46 |
| 2 | 8 | 23 | 45 |
| 3 | 8 | 22 | 40 |
| 4 | 7 | 19,5 | 39 |
| 5 | 5 | 16 | 34,5 |

Pour l'échantillon 1 (

Figure 71), les valeurs de teneur en eau massique obtenues par les capteurs mettent en évidence une anomalie au point de mesure 2, avec une augmentation de la teneur en eau de 26,5 à 33 % (Tableau 30). Ensuite, il y a une diminution régulière de la teneur en eau massique jusqu'à 37 % par perte de masse et 15 % selon le capteur. Nous constatons une différence de 22 % de teneur en eau massique entre les deux mesures. Dans chacun des cas, l'échantillon de terre allégée n'est pas sec.



CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Figure 71 : Étalonnage de l'échantillon 1 de terre allégée à 0 °C en chambre climatique

Pour l'échantillon 2 (**Figure 72**), les mesures de teneur en eau massique par le capteur et par perte de masse suivent la même tendance que celles de l'échantillon 1. Elles diminuent régulièrement jusqu'à 1,5 % de teneur en eau massique, du fait d'un séchage extérieur.

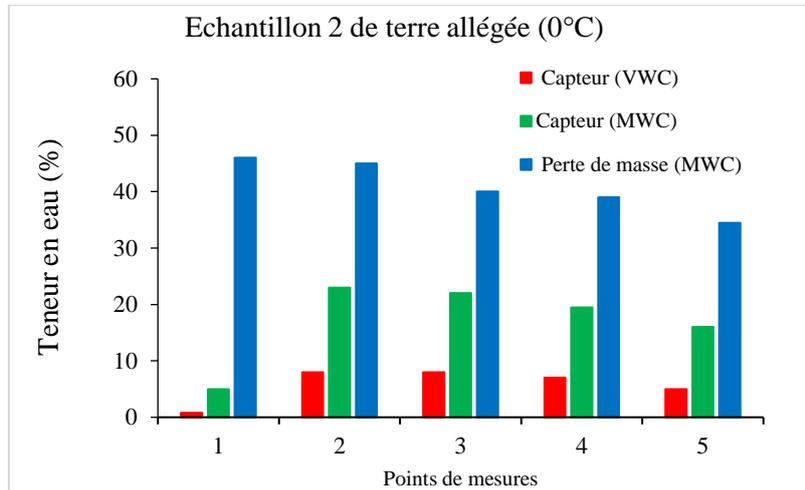


Figure 72 : Étalonnage de l'échantillon 2 de terre allégée à 0 °C en chambre climatique

1.2.2 Étalonnage à 20 °C

Lors de l'étalonnage des capteurs à 20 °C, les mesures de teneur en eau par perte de masse indiquent une diminution linéaire de 46 % à 34 % pour l'échantillon 1, et de 48 % à 32 % pour l'échantillon 2 (**Tableau 31**).

Tableau 31 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 20 °C

| Terre allégée 20 °C | Teneur en eau (%) | | |
|---------------------|-------------------|---------------|----------------------|
| | Échantillon 1 | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 2 | 6 | 46 |
| 2 | 7 | 22 | 45 |
| 3 | 7 | 21,5 | 40 |
| 4 | 6 | 19 | 39 |
| 5 | 5 | 17 | 34 |
| Échantillon 2 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 9 | 28 | 48 |
| 2 | 8 | 22,5 | 40 |
| 3 | 7 | 20,9 | 40 |
| 4 | 6 | 19 | 38 |
| 5 | 6 | 17 | 32 |

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Pour l'échantillon 1 (**Figure 73**), la comparaison des mesures de teneur en eau massique par les capteurs et par perte de masse met en évidence une anomalie au niveau du point 2, avec l'augmentation de la teneur en eau de 6 à 22 % selon les capteurs, alors que la tendance est décroissante par perte de masse.

Ensuite, les mesures de teneur en eau massique diminuent régulièrement jusqu'à 34 % par perte de masse et 17 % selon le capteur, avec une différence de 17% de teneur en eau massique entre les deux mesures. Dans ce cas, l'échantillon de terre allégée n'est pas sec.

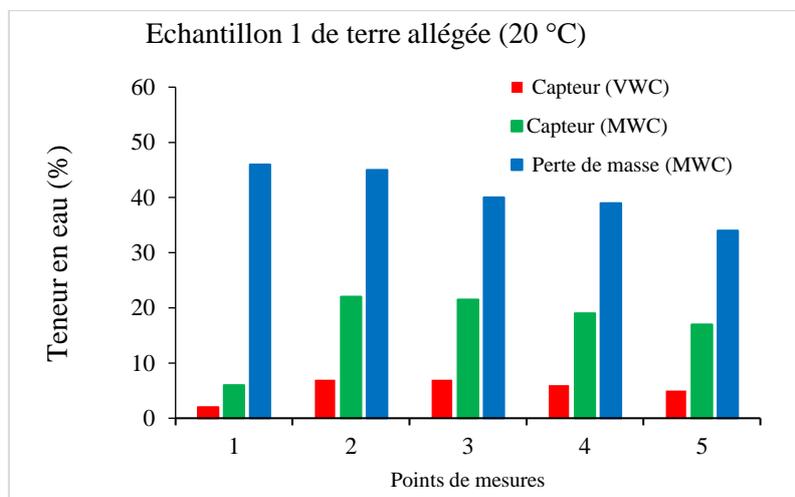
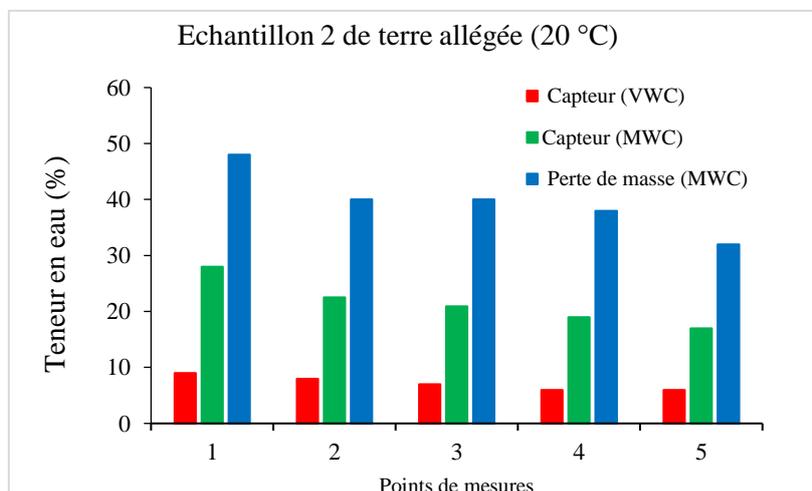


Figure 73 : Étalonnage de l'échantillon 1 de terre allégée à 20 °C à l'air ambiant

Pour l'échantillon 2 (**Figure 74**), l'étude des mesures de teneur en eau massique par les capteurs et par perte de masse indique une tendance décroissante, jusqu'à 32 % par perte de masse et 17 % selon les capteurs, avec une différence de 15% entre les deux mesures. Dans ce cas, l'échantillon de terre allégée n'est pas sec.



CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Figure 74 : Étalonnage de l'échantillon 2 de terre allégée à 20 °C à l'air ambiant

1.2.3 Étalonnage à 40 °C

Lors de l'étalonnage des capteurs à 40° C, les mesures de teneur en eau par perte de masse indiquent une diminution linéaire de 46 % à 28 % pour l'échantillon 1, et de 43 % à 21 % pour l'échantillon 2 (**Tableau 32**).

Tableau 32 : Étalonnage des échantillons 1 et 2 à 40 °C

| Terre allégée 40 °C | Teneur en eau (%) | | |
|---------------------|-------------------|---------------|----------------------|
| Échantillon 1 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 9 | 34 | 46 |
| 2 | 9,5 | 39 | 39 |
| 3 | 8 | 29 | 39 |
| 4 | 5 | 18 | 32 |
| 5 | 5 | 15 | 28 |
| Échantillon 2 | | | |
| Point de mesure | Capteur (VWC) | Capteur (MWC) | Perte de masse (MWC) |
| 1 | 3 | 18 | 43 |
| 2 | 8 | 22 | 40 |
| 3 | 5 | 15 | 37 |
| 4 | 5 | 15 | 31 |
| 5 | 4 | 11 | 21 |

Pour l'échantillon 1 (**Figure 75**), la comparaison des mesures de teneur en eau massique par le capteur et par perte de masse met en évidence une anomalie au niveau du point 2, avec l'augmentation de la teneur en eau de 34 à 39 % selon les capteurs, mais une tendance décroissante par perte de masse. Ensuite, les mesures de teneur en eau massique diminuent régulièrement, jusqu'à 28 % par perte de masse et 15 % selon les capteurs, avec une différence de 13 % entre les deux mesures. Dans ce cas, l'échantillon de terre allégée n'est pas sec.

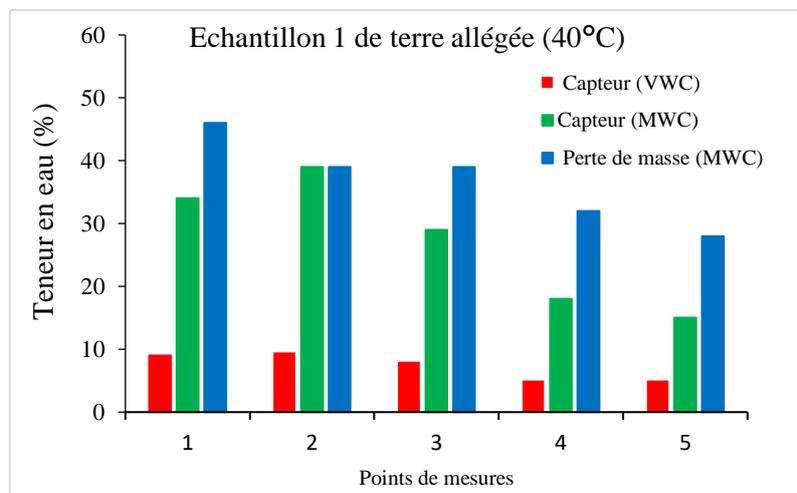


Figure 75 : Étalonnage de l'échantillon 1 de terre allégée à 40 °C à l'étuve

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Pour l'échantillon 2 (Figure 76), la comparaison des mesures de teneur en eau massique par les capteurs et par perte de masse indique une tendance décroissante à partir du point 2 selon les capteurs et à partir du point 1 par perte de masse.

Ensuite, les mesures de teneur en eau massique diminuent régulièrement jusqu'à 21 % par perte de masse et 11 % par capteur, avec une différence de 10 % entre les deux mesures. Dans ce cas, l'échantillon de terre allégée n'est pas sec.

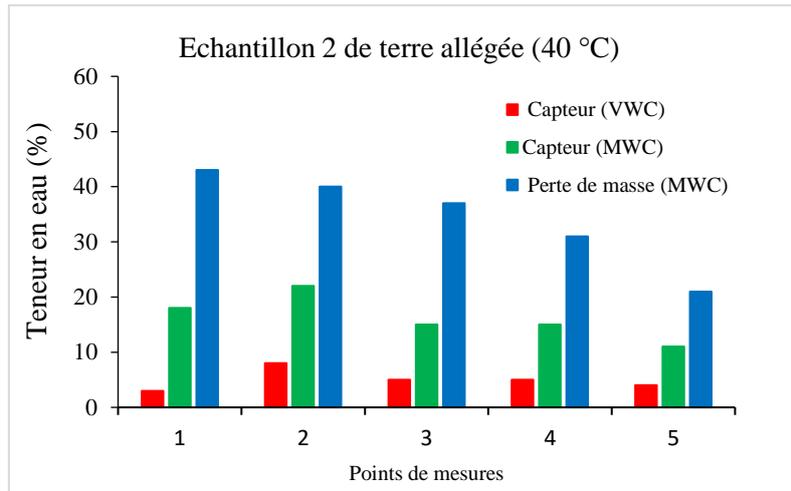


Figure 76 : Étalonnage de l'échantillon 2 de terre allégée à 40 °C à l'étuve

2. Traitement des données issues de la bauge et de la terre allégée

2.1 Cinétique de séchage des murs

La Figure 77 présente l'évolution de la teneur en eau de la bauge et de la terre allégée dans la levée 2. Dans le cas de la bauge, la teneur en eau volumétrique (VWC) décroît fortement pendant les quinze premiers jours après la mise en œuvre de la bauge.

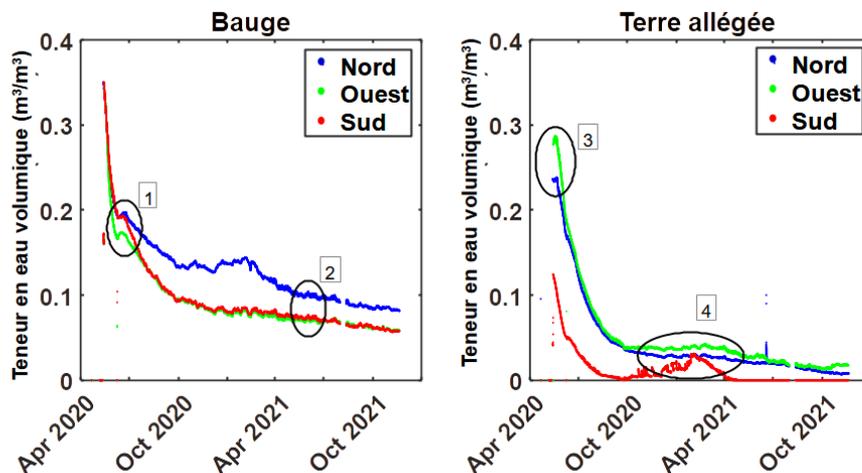


Figure 77 : Évolution de la teneur en eau dans les murs nord, ouest et sud (levée 2)

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Lors de la mise en œuvre de la levée 3 (**Figure 78**), la diminution de la teneur en eau est entravée (légère stabilisation présentée par l'indice 1 sur (**Figure 77**), puis la décroissance reprend avec une allure plus faible. En effet, la diminution de la teneur en eau est stable pendant 16 jours au sommet de la levée (à 50 cm de la base de la levée) et environ 10 jours à sa base (25 cm de la base de la levée). Ceci peut être dû à l'apport d'eau par la nouvelle levée de 70 cm au sommet de la levée déployée.



Figure 78 : Bâtiment pilote avec les différentes levées

Après le mois d'octobre, le rayonnement solaire moyen et la température commencent à diminuer, ce qui entraîne un changement dans la tendance de l'évolution (

Figure 77). Dans les murs sud et ouest du bâtiment prototype, qui sont plus exposés au vent ($0,4 \text{ m.s}^{-1}$), la tendance devient quasi-linéaire avec une faible pente.

A partir du mois de juin, le mur nord présente une sorte de stabilisation avec une VWC de $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Ceci est temporaire, car lorsque le rayonnement solaire et la température recommencent à augmenter après le mois de février, la VWC du mur nord suit à nouveau une diminution quasi-exponentielle et retrouve ensuite une pente linéaire, similaire à celle des murs sud et ouest (cf. indice 2 de (**Figure 77**)).

Concernant la construction en terre allégée, les courbes de la **Figure 77** ont révélé une grande diminution de la VWC de $0,3$ à $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Ce constat est également réalisé pour une même levée. Ces variations peuvent être dues à de nombreux facteurs liés :

- au mode de préparation des matériaux sur le chantier, notamment l'utilisation de moins d'eau pendant la préparation, à une teneur en fibres plus faible et à la densité du mélange.

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Par ailleurs, pendant les premiers jours (environ 8 jours), la VWC reste approximativement constante dans la terre allégée (cf. indice 3 sur la **Figure 77**). Cela peut être dû aux processus d'échange d'eau entre l'argile et les fibres de roseau constituant le mélange. En effet, nous émettons l'hypothèse que les fibres de roseau ont absorbé beaucoup d'eau pendant le mélange et que cette eau se lie aux fibres de roseau avec les particules d'argile au lieu d'aller dans l'air ambiant. Après cette période, le processus de séchage commence.

- Dans le mur sud, plus exposé au vent et intempéries, une VWC présente des pics entre les mois d'octobre et février dans la terre allégée (cf. indice 4 sur la **Figure 77**). Cela est dû aux précipitations durant la période hivernale.
- au moment où le mélange est mis en œuvre dans le coffrage (évaporation) et à l'ajout d'eau par les artisans lors de la mise en œuvre. En effet, la terre allégée est préparée en petites quantités, puis mise dans de grands sacs de 100 litres avant une mise en œuvre directe dans les coffrages. Elle peut parfois rester quelques heures dans les sacs avant leur utilisation. Cet entreposage peut conduire à la perte d'une grande quantité d'eau et à une variation de la teneur en eau durant la mise en œuvre. Ce phénomène est moins évident dans le cas de la bauge car, contrairement à la terre allégée, la bauge est préparée quelques jours en amont avant les différentes levées des murs, ce qui résout le problème de la VWC initiale.

2.2 Impact des conditions climatiques sur les murs

La teneur en eau volumétrique diminue de façon exponentielle dans les murs nord, sud et ouest (**Figure 79**). Néanmoins, un comportement différent est observé sur la bauge : la VWC commence à diminuer directement après sa mise en œuvre dans les coffrages. De plus, l'effet sur la teneur en eau (VWC) due à l'ajout d'une nouvelle levée en bauge sur les levées sèches est moins marqué que dans le cas de la terre allégée. Cela peut être imputé au même phénomène observé au début de la mise en œuvre : les particules d'eau sont absorbées par les fibres et/ou l'argile contenue dans les sols. Par conséquent, une légère quantité d'eau migre vers le bas dans la levée précédente. Le fait que la terre allégée se trouve dans les murs côté extérieur la rend plus exposée et sensible aux variations des conditions climatiques (vitesse de vent : de 0,9 à 4 m.s⁻¹ ; température : de -3 °C à 30 °C ; humidité relative : de 5 à 90 %).

Le bâtiment étudié dans cette thèse est implanté en France à Saint-André-de-Bohon, dans une configuration d'orientation de vent sud-ouest dominant. Les murs du bâtiment ont été couverts par des bottes de paille de blé en haut, mais pas sur les côtés. Entre octobre et avril,

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

différents pics peuvent être observés sur la teneur en eau de la terre allégée, notamment pour les murs sud et ouest qui sont particulièrement affectés par le vent et la pluie. L'implantation du bâtiment est importante sur le comportement à l'état frais des matériaux.

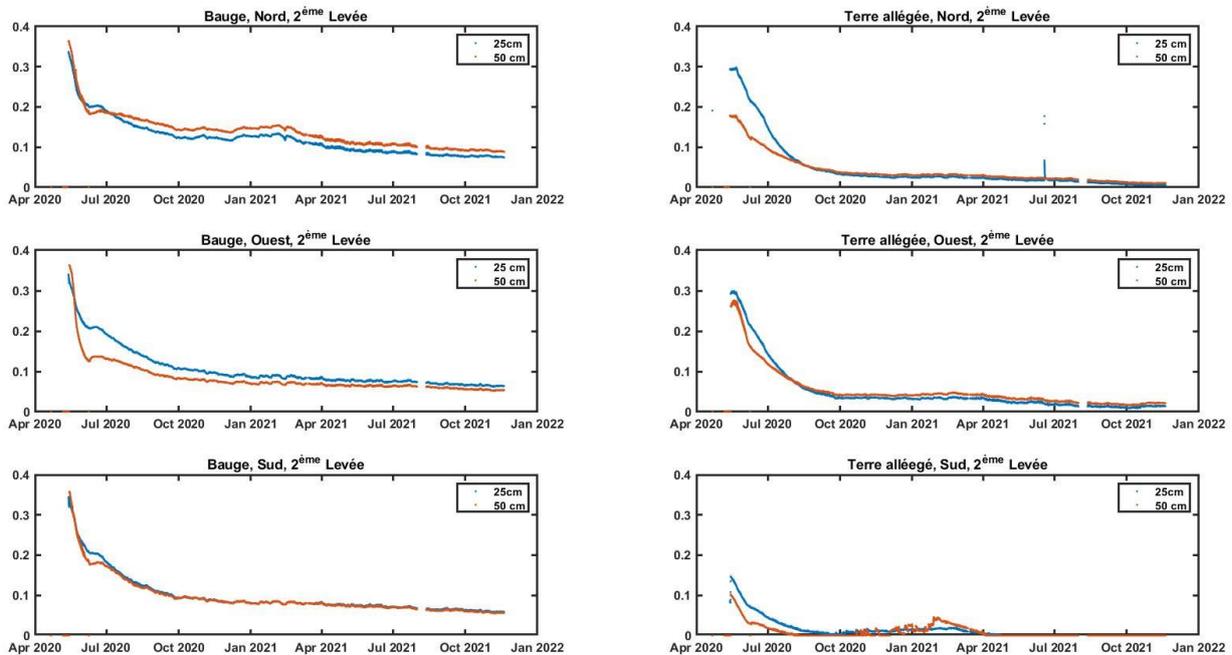


Figure 79 : Impact de la hauteur sur l'évolution de la teneur en eau dans les murs nord, sud et ouest

2.3 Taux de séchage différentiel

Le taux de séchage différentiel peut être observé entre la partie supérieure (50 cm) [en rouge] et inférieure (25 cm) [en bleu] de la même levée (cf. annexes 1, 2, 3, 4 et 5). En effet, avant d'ajouter une nouvelle levée, la partie supérieure d'une couche de bauge sèche plus rapidement que la partie inférieure (**Figure 79**). Cela pourrait être dû au fait que les sondes supérieures sont plus sensibles à la présence d'eau dans la levée. De plus, les flux d'eau de la nouvelle levée vers les levées existantes entraînent une modification de sa cinétique de séchage. En effet, l'apport d'eau de la nouvelle levée vient ralentir le séchage de la partie supérieure de la levée. Après un certain temps, les parties supérieures et inférieures de la levée sèchent à nouveau approximativement au même rythme.

En ce qui concerne la terre allégée, le fait que l'eau entre en contact avec les particules d'argile et les fibres de roseau avant la vaporisation laisse penser que le taux de séchage sera similaire

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

quelle que soit la hauteur. Du fait de l'écart entre les teneurs en eau initiales mesurées à différentes hauteurs, la différence de vitesse de séchage est moins évidente (**Figure 79**).

2.4 Modélisation du séchage

Pour la bauge ou la terre allégée, la VWC suit une fonction de décroissance exponentielle (**Figure 80**). Les données récupérées par douze capteurs placés dans les deux couches (six dans la bauge et six dans la terre allégée) ont été ajustées numériquement. Les données expérimentales peuvent être mieux modélisées par un modèle exponentiel à deux termes (équation 20).

$$f(x) = a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot e^{d \cdot x} \quad \text{Équation 20}$$

Avec :

$f(x)$: VWC (m^3/m^3) et x : Temps (jours)

Dans le cas de la bauge, les constantes a , b , c et d sont les suivantes :

$a = 0,001266$, $b = -3,024$, $c = 0,1154$, $d = -0,05605$.

Dans le cas de la terre allégée, les constantes d'ajustement sont les suivantes :

$a = 0,000147$, $b = -4,239$, $c = 0,02047$, $d = -0,3323$.

On peut affirmer que la loi qui régit le séchage de la bauge et de la terre allégée est considérée comme générale pour des matériaux et des conditions similaires à ceux étudiés dans le présent travail. Cependant, les paramètres d'ajustement ne sont valables que pour les mélanges et les conditions rapportés dans la présente étude.

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

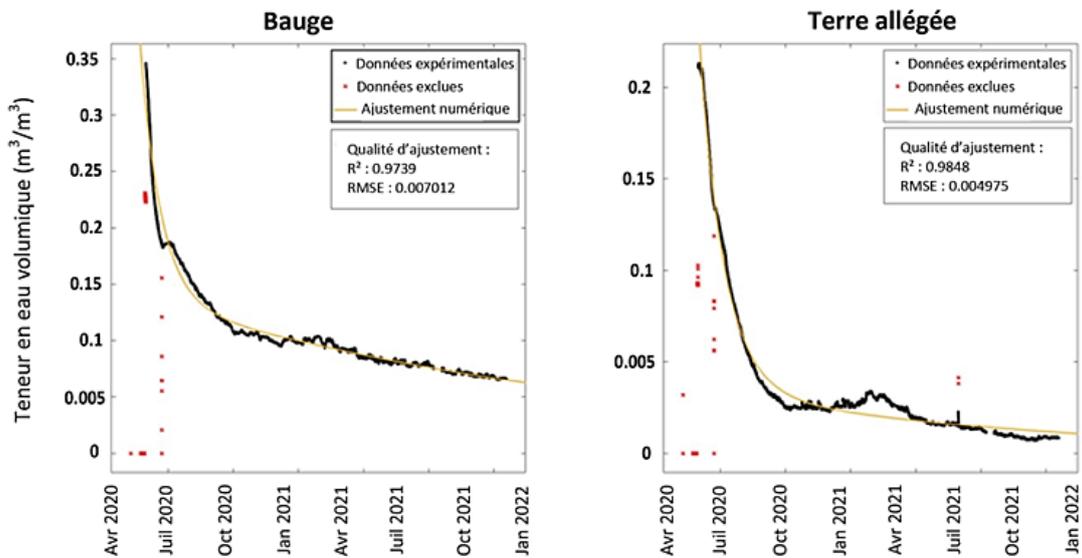


Figure 80 : Ajustement numérique de l'évolution de la teneur en eau

3. Traitement des données des comparateurs de retrait

Les taux de retrait dans les couches de bauge et de terre allégée mises en œuvre dans les murs du bâtiment sont présentés sur la **Figure 81**. On peut constater que le retrait dans les couches de la bauge et de la terre allégée présente la même allure avec une décroissance exponentielle.

Pendant les trois premières semaines, le retrait est plus élevé dans la bauge que celle de la terre allégée (**Figure 79**). En effet, au cours de la première semaine, la pente du retrait dans la couche de bauge est plus forte que celle de la terre allégée. Ceci est dû à l'effet de la densité qui est plus sensible dans la bauge. Après quatre semaines, même si le comportement au retrait n'est pas complètement stabilisé, les deux couches ne subissent plus de retrait avec des valeurs comprises entre 3 et 4 %.

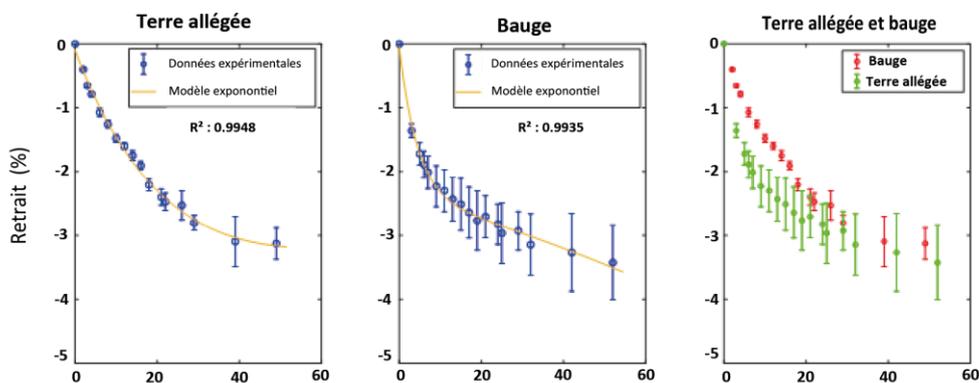


Figure 81 : Taux de retrait dans la bauge et la terre allégée

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

De la même manière que la teneur en eau volumétrique (**Figure 82**), le retrait peut également être modélisé par l'équation 21 :

$$f(x) = a \cdot e^{b \cdot x} + c \cdot e^{d \cdot x} \quad \text{Équation 21}$$

$f(x)$: Retrait (%) et x : Temps (jours)

- ✓ Dans le cas de la bauge, les constantes a , b , c et d sont les suivantes :

$a = -2,369$, $b = 0,007512$, $c = 2,33$ et $d = -0,2285$, avec un R^2 égal à $0,9935$.

- ✓ Dans le cas de la terre légère, les constantes a , b , c et d sont les suivantes :

$a = -4.818$, $b = -0.004899$, $c = 4.723$ et $d = -0.04117$, avec un R^2 de $0,9948$.

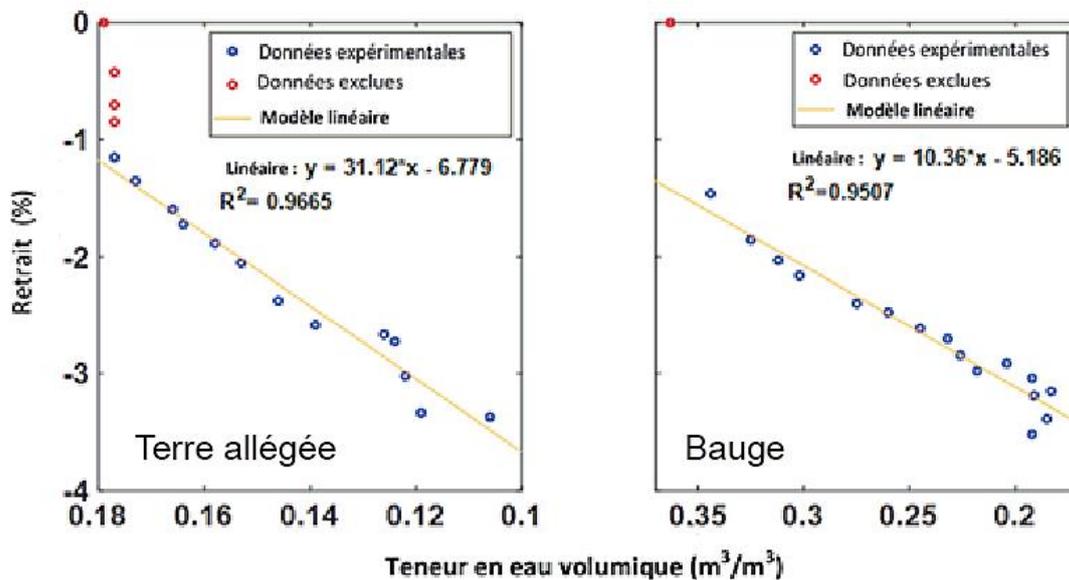


Figure 82 : Taux de retrait en fonction de la teneur en eau

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons quantifié les processus de retrait et de séchage dans les couches de bauge et de terre allégée constituant un système de double paroi CobBauge, dans le but de mieux comprendre ces deux processus essentiels à la construction en terre.

Le séchage et le retrait de la bauge ou de la terre allégée décroissent selon une loi exponentielle à deux termes que l'on peut approximer. Une exception a été observée pour la terre allégée pendant la première semaine après la construction, avec une teneur en eau volumétrique inchangée. Ceci est imputé aux processus d'échange d'eau entre l'argile et les fibres de roseau dans le mélange.

La diminution de la teneur en eau volumétrique dans les deux couches en fonction du temps est mieux ajustée par un modèle exponentiel à deux termes. Il a également été observé que la teneur en eau volumétrique initiale était plus homogène dans la bauge que dans la terre allégée.

Ces variations sont probablement dues à plusieurs facteurs : la méthode de préparation du matériau, l'évaporation et l'ajout d'eau par les artisans pendant la construction. La bauge est préparée quelques jours avant pour toutes les levées des murs : la teneur en eau initiale est donc supposée homogène.

De plus, un taux de séchage différentiel entre la partie supérieure (50 cm) et la partie inférieure (25 cm) d'une même levée a été observé, en particulier dans pour la bauge. En ce qui concerne l'effet de l'épaisseur, il a été constaté que les murs épais sèchent plus lentement que les murs minces. Cinq mois après sa mise en œuvre, la bauge du mur nord contient environ 40 % d'eau de plus que celle des murs sud ou ouest. Après un an, la différence est d'environ 27 %.

Par ailleurs, le retrait dans les deux couches suit une décroissance exponentielle. Pendant les trois premières semaines, nous avons déterminé sur chantier un retrait avec un tassement plus important dans la couche de bauge. Ceci est probablement dû à l'effet de la densité qui est plus sensible dans la bauge que dans la terre allégée. Quelques semaines plus tard, la différence de retrait dans les deux couches diminue sensiblement et tend vers un niveau de stabilisation aux environs de 3 à 4 %. De même, comme pour la teneur en eau volumétrique, le retrait dans les deux couches peut être mieux ajusté par une exponentielle à deux termes.

CHAPITRE IV : ESSAIS À L'ÉCHELLE D'UN BÂTIMENT EXPÉRIMENTAL

Compte tenu de la décroissance exponentielle de la teneur en eau et du retrait en fonction du temps après la mise en œuvre, une corrélation entre ces deux processus a été étudiée. Une corrélation linéaire a été obtenue entre la teneur en eau et le retrait dans les couches de bauge et de terre allégée. L'analyse de cette corrélation nous a conduit à supposer qu'environ un tiers du retrait qui se produit dans les couches est un tassement typique sous l'effet de la gravité. Les deux autres tiers du retrait global sont directement liés au processus de séchage.

CHAPITRE V

**CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET
COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE
EN LABORATOIRE**

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Au cours des dernières années, plusieurs scientifiques se sont intéressés aux performances hygrothermiques des écomatériaux de construction et ont mené des études expérimentales pour recueillir des données hygrothermiques de matériaux de construction à base de terre (Azahry *et al.*, 2018; Cagnon *et al.*, 2014; Faria *et al.*, 2016; Liuzzi *et al.*, 2013; Vincelas *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2018). Les propriétés hygrothermiques ont été très peu étudiées pour ce type de matériau, d'où la nécessité d'approfondir ces études afin de mieux exploiter les performances en termes d'isolation thermique et de confort (Allinson and Hall, 2010; Ashour *et al.*, 2015; Cagnon *et al.*, 2014; Faria *et al.*, 2016; Labat *et al.*, 2016). Dans ce chapitre, nous allons analyser la cinétique de séchage et les propriétés hygrothermiques de la bauge et de la terre allégée dans une chambre climatique, afin de les confronter aux données obtenues sur chantier et déterminer les propriétés hygrothermiques de nos matériaux.

1. Suivi de cinétique de séchage

1.1 Cinétique de séchage sur chantier

La station météo nous permet de relever les valeurs de température, d'humidité et de vitesse du vent dans l'environnement du bâtiment. L'évolution de la teneur en eau dans la bauge est présentée sur la **Figure 83**.

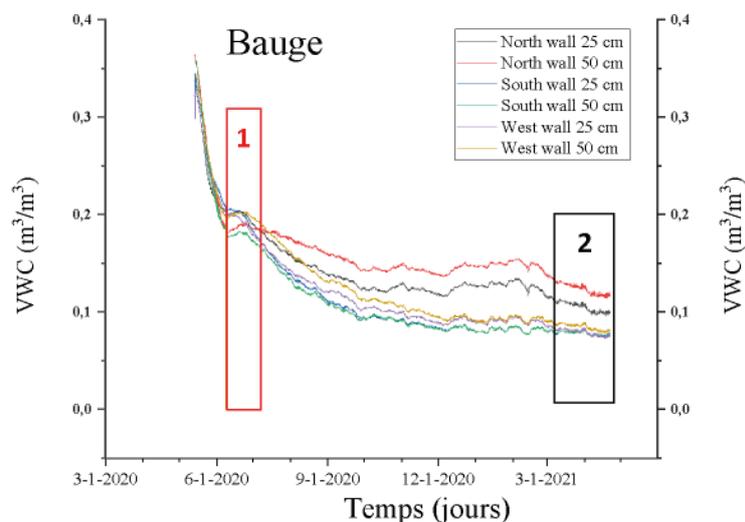


Figure 83 : Cinétique de séchage sur chantier des murs en bauge

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Tout d'abord, au niveau des différentes couches de bauge, la teneur en eau volumétrique (VWC) diminue pendant les premiers jours après la mise en œuvre de la bauge. Au-delà de 25 jours de séchage, lors de la construction d'une levée supérieure, la teneur en eau se stabilise à $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (cf. phase 1 de la **Figure 83**). Cela peut s'expliquer par le fait que l'eau de la nouvelle levée est principalement fixée au sommet de la levée existante (**Figure 84**).

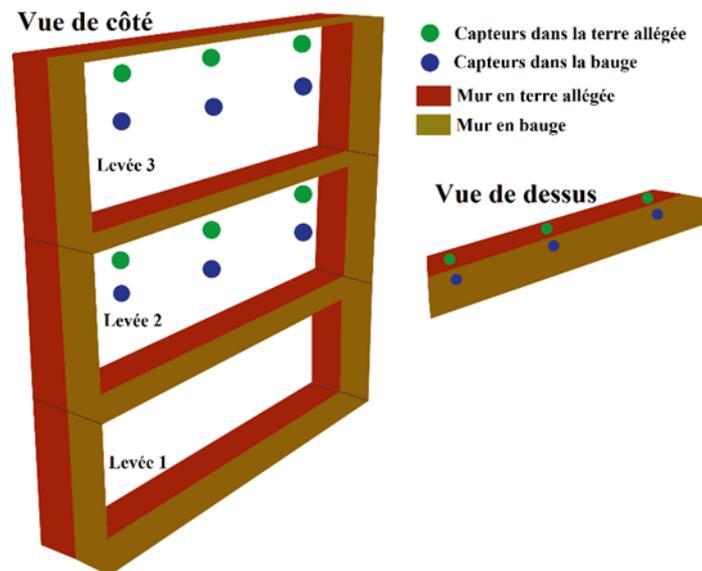


Figure 84 : Schéma de distribution des capteurs

Après cette période d'un mois, la VWC diminue à nouveau, mais avec une pente plus faible. Sur les murs sud et ouest, plus exposés au vent avec une vitesse comprise entre $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la courbe devient linéaire avec une faible pente (contrairement au mur nord), et une sorte de stabilisation de la VWC est observée entre $0,07$ et $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Lorsque les températures commencent à augmenter, entre mars et août (de 28 à $35 \text{ }^\circ\text{C}$), le mur nord suit une courbe de décroissance, mais reste plus humide que les murs sud et ouest plus exposés au vent et à l'ensoleillement (cf. phase 2 de la **Figure 83**).

Concernant la couche de terre allégée, la courbe de teneur en eau indique une très grande variation de la teneur en eau initiale, y compris dans la même levée (cf. phase 1 de la **Figure 85**). Ces fortes variations sont dues au processus de préparation et de mise en œuvre du matériau et notamment à l'ajout d'eau par les artisans pendant le malaxage.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

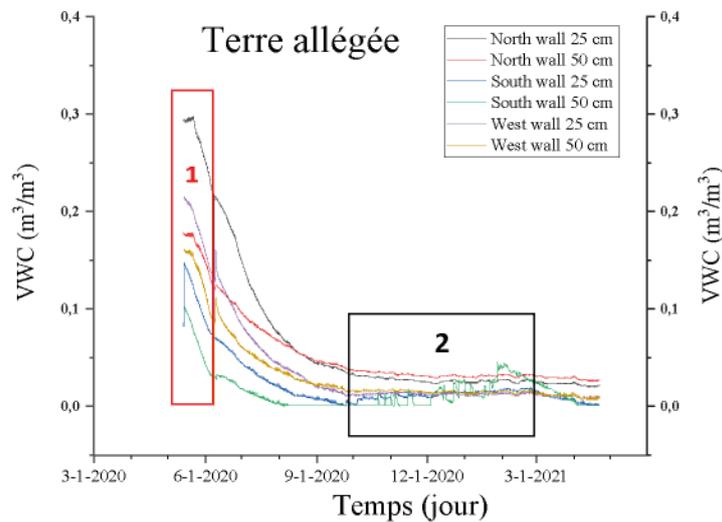


Figure 85 : Cinétique de séchage sur chantier des murs en terre allégée

La mise en œuvre du mur peut conduire à des couches avec des teneurs en eau différentes, car entre le moment de fabrication/malaxage et celui de montage des coffrages, le matériau peut rester quelques heures dans le malaxeur avant son déploiement. Cela peut conduire à une forte perte d'eau par évaporation et à une variation de la teneur en eau pendant la construction (jusqu'à -10 %).

La VWC de la terre allégée diminue ensuite avec une pente abrupte, ce qui est différent du cas de la bauge. De plus, l'effet de l'ajout d'une nouvelle levée sur la levée sèche est moins marqué dans le cas de la terre allégée que pour la bauge. La terre allégée constituant l'enveloppe extérieure du bâtiment, elle est plus exposée aux variations des conditions climatiques. Pendant la période hivernale, entre octobre 2020 et février 2021, la teneur en eau de la terre allégée présente de fortes variations, notamment sur les murs sud et ouest (cf. phase 2 de la **Figure 85**).

1.2 Cinétique de séchage en laboratoire

Cette partie s'appuie sur une simulation été-hiver dans des chambres climatiques, en se référant aux données météorologiques issues d'une station météo afin de se rapprocher le plus possible des conditions réelles sur chantier. Des données sur le suivi de la teneur en eau par perte de masse dans la bauge et la terre allégée sont présentées respectivement sur la **Figure 86** et la **Figure 87**.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

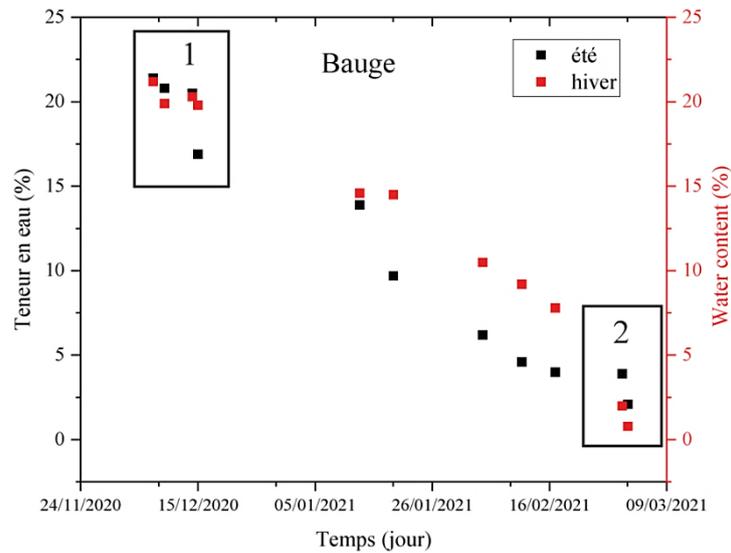


Figure 86 : Cinétique de séchage de la bauge en laboratoire

Au cours de la première semaine d'essai au laboratoire, les cinétiques de séchage de la bauge sont similaires (cf. phase 1 de la **Figure 86**), en raison de l'homogénéité du matériau préparé et reposé pendant 24 heures. Ensuite, une diminution est observée, associée à une différence de teneur en eau de 2 à 4 % entre l'hiver et l'été. Après trois mois, les échantillons sont presque secs avec une teneur en eau stable de 2,1 % en hiver et de 0,8 % en été (cf. phase 2 de la **Figure 86**).

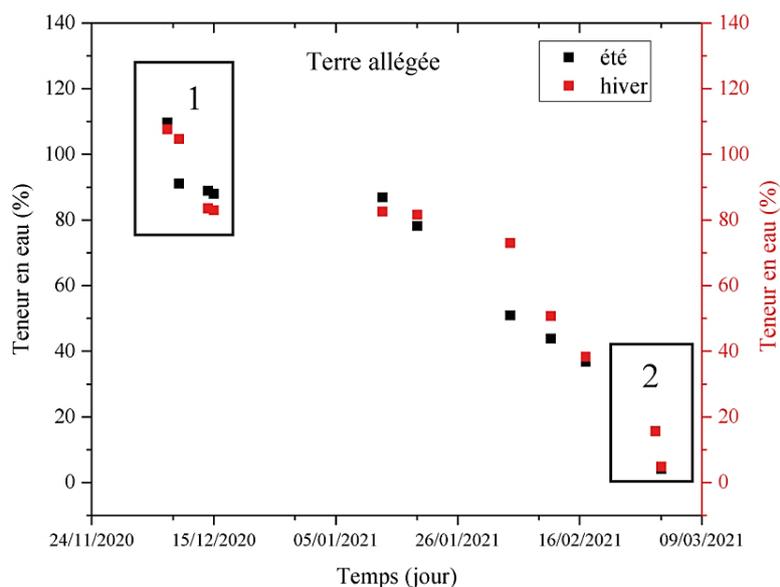


Figure 87 : Cinétique de séchage de la terre allégée en laboratoire

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Au cours de la première semaine, les cinétiques de séchage de la terre allégée en hiver et en été varient en fonction de la teneur en eau : 85-105 % en hiver et 90-110 % en été (cf. phase 1 de la **Figure 87**). Ensuite, une diminution de la cinétique de séchage est observée, avec une différence de 4 à 20 % de la teneur en eau. Après trois mois, les échantillons deviennent presque secs avec une teneur en eau stable de 4 % (cf. phase 2 de la **Figure 87**).

2. Suivi du retrait et tassement au laboratoire

À partir de l'étude du séchage, deux aspects doivent être pris en compte : l'état final du matériau et la cinétique du phénomène. L'état final du matériau, c'est-à-dire l'état du matériau lorsqu'il est en équilibre avec le milieu extérieur, dépend principalement des conditions thermodynamiques extérieures et de la microstructure du matériau. La cinétique de séchage dépend quant à elle non seulement des conditions extérieures, mais également de la morphologie du matériau, de la surface de séchage et de la porosité.

Les phénomènes de retrait et tassement se produisent durant le séchage et l'évaporation de l'eau. Initialement, le matériau contient une quantité d'eau homogène dans son volume. Dans notre étude, nous avons utilisé deux échantillons de bauge et deux échantillons de terre allégée de $25 \times 50 \times 40$ cm, et deux échantillons de bauge et deux échantillons de terre allégée de $25 \times 50 \times 25$ cm, avec coffrage et sans coffrage, dans des conditions ambiantes ($T : 23^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR} : 50\%$). Ces échantillons ont été instrumentés avec des comparateurs pour mesurer le retrait (**Figure 88**).



Figure 88 : Dispositif expérimental des échantillons avec les comparateurs

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

La **Figure 89** présente les mesures de retrait sur deux échantillons de bauge ($25 \times 50 \times 40$ cm). Durant les deux premiers jours, le retrait initial est similaire pour les deux échantillons avec une variation relative horizontale de 0,75 %.

À partir du 5^e jour, nous constatons un retrait plus important sur l'échantillon 2 sans coffrage, de 2 % puis 3,25 %. À partir du 15^e jour, le taux de retrait total de l'échantillon 2 est de 4,25 % et reste stable. Celui de l'échantillon 1 avec coffrage est de 1,75 %.

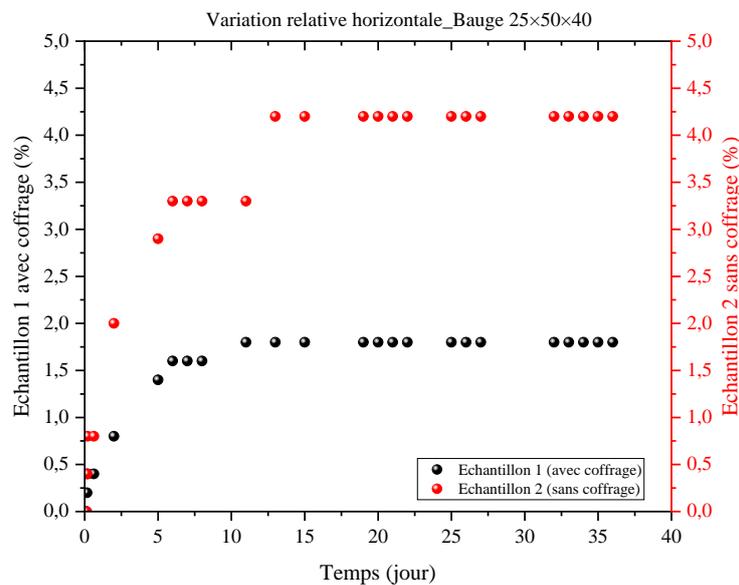


Figure 89 : Variation relative horizontale de retrait dans la bauge ($25 \times 50 \times 40$ cm)

Les mesures de retrait sur les deux échantillons de bauge de dimensions $40 \times 50 \times 40$ cm sont présentées sur la **Figure 90**. Elles évoluent de manière similaire, avec une différence de l'ordre de 0,5 %. Le retrait total des deux échantillons se stabilise à partir du 20^e jour, pour atteindre 3,25 % pour l'échantillon 1 avec coffrage et 2,75 % pour l'échantillon 2 sans coffrage.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

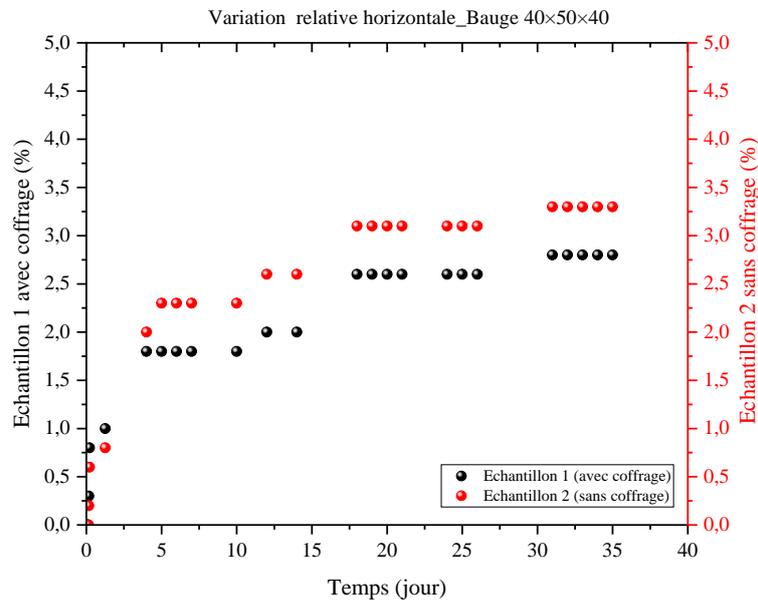


Figure 90 : Variation relative horizontale de retrait dans la bauge (40 × 50 × 40 cm)

La **Figure 91** présente les mesures de retrait sur deux échantillons de terre allégée (25 × 50 × 40 cm). Durant les deux premiers jours, le retrait initial est très faible. À partir du 2^e jour, nous constatons un retrait plus important sur l'échantillon 2 sans coffrage, de 0,4 % puis 1,25 %. À partir du 20^e jour, le taux de retrait total de l'échantillon 2 est de 2 %. Celui de l'échantillon 1 avec coffrage est de 1 %.

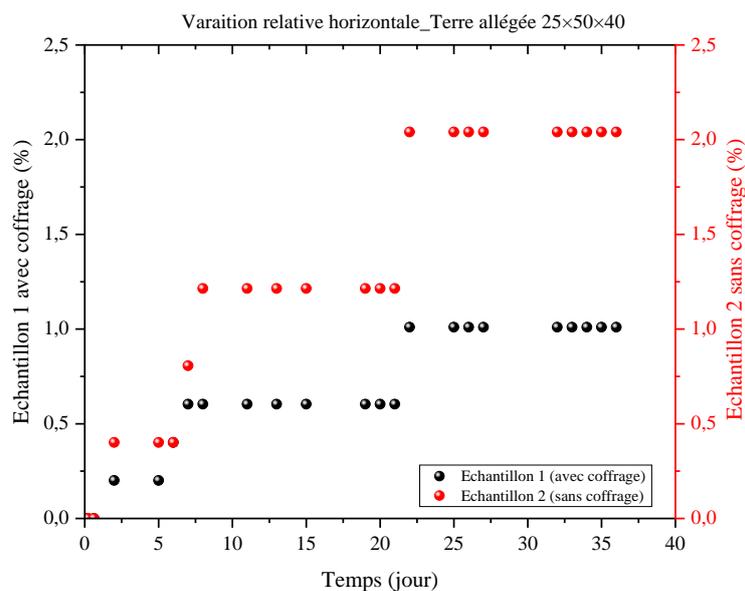


Figure 91 : Variation relative horizontale de retrait dans la terre allégée (25 × 50 × 40 cm)

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Les mesures de retrait sur les deux échantillons de terre allégée ($40 \times 50 \times 40$ cm) sont présentées sur la **Figure 93**. Elles évoluent de manière similaire, avec une faible différence de l'ordre de 0,1 à 0,2 %. Le retrait total des deux échantillons se stabilise à partir du 20^e jour, pour atteindre 1,2 % pour l'échantillon 1 avec coffrage et 1,3 % pour l'échantillon 2 sans coffrage.

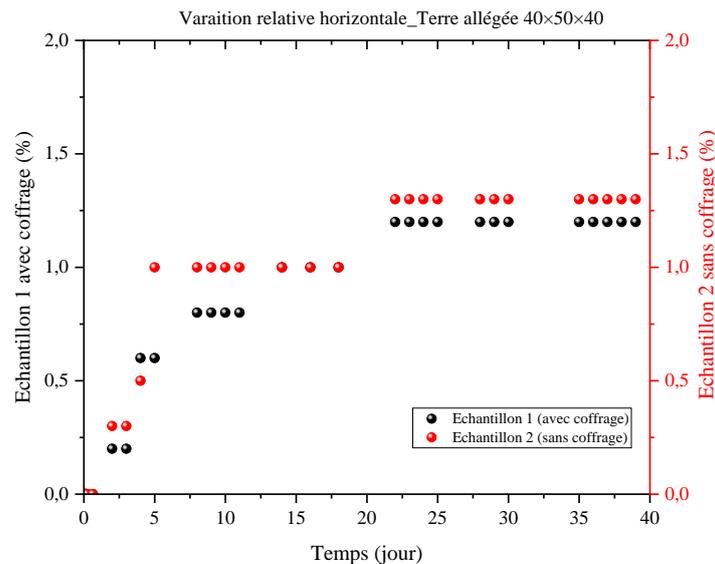


Figure 92 : Variation relative horizontale de retrait dans la terre allégée ($40 \times 50 \times 40$ cm)

2.1 Isotherme de sorption de l'humidité

Les isothermes de sorption de l'humidité montrent l'évolution de la teneur en humidité en fonction de l'humidité relative de l'air à une température constante de 23 °C selon la norme NF EN ISO 12571.

Selon la proposition de Brunauer (Brunauer *et al.*, 1938), les courbes de sorption correspondent au type III et présentent des boucles hystériques (**Figure 93**). Ce type de courbe est typique des matériaux poreux.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

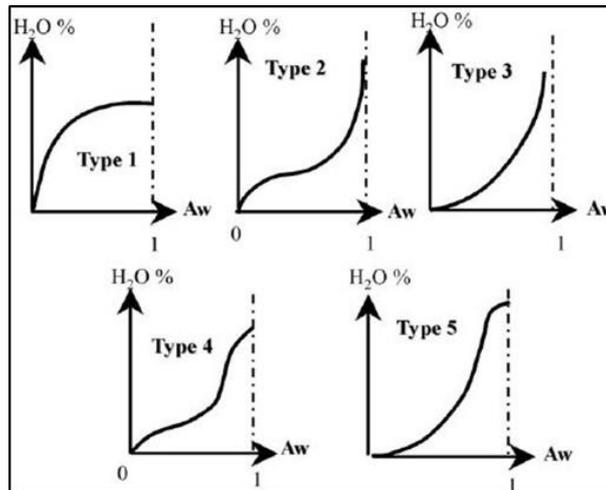


Figure 93 : Les cinq types d'isothermes (Brunauer *et al.*, 1938)

Dans une plage d'humidité relative de 10 à 30 %, la vapeur d'eau absorbée par la bauge ou la terre allégée est comprise entre 0 et 2 %. Cependant, dans une plage d'humidité relative de 40 à 90 %, le taux d'absorption de vapeur d'eau par la terre allégée évolue de 2 à 9 %, ce qui est bien supérieur à celui de la bauge qui varie entre 0,5 et 2 % (**Figure 94**).

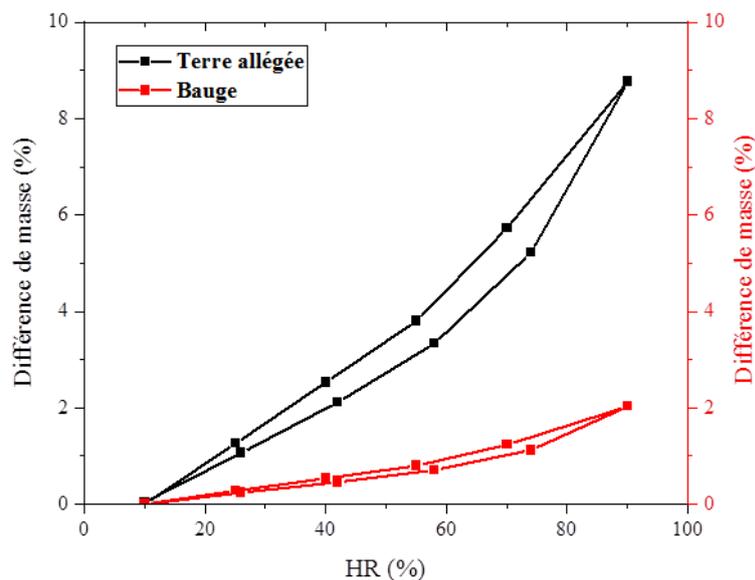


Figure 94 : Isothermes de sorption d'humidité de la bauge et de la terre allégée

Pour mieux analyser cette différence d'absorption de la vapeur d'eau entre les mélanges de bauge et de terre allégée, nous avons réalisé l'isotherme de sorption d'humidité des matières premières (sols, fibres de roseau et fibres de paille de lin) utilisées dans les deux mélanges (**Figure 95**).

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Les résultats indiquent que le comportement de sorption/désorption du mélange de bauge est largement régulé par les sols 1 et 2, même s'il contient de la fibre de paille de lin qui a un coefficient d'absorption de vapeur d'eau élevé. Pour le mélange de terre allégée, le comportement de sorption/désorption est largement régi par la présence de la fibre de roseau.

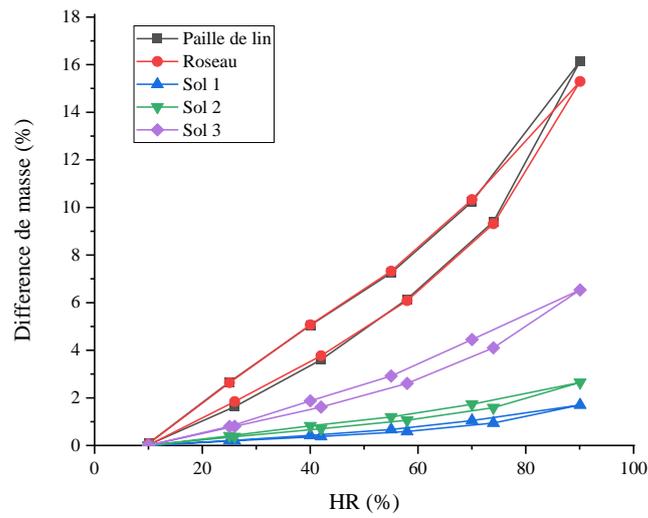


Figure 95 : Isothermes de sorption d'humidité des sols et des fibres

Selon la loi de mélange prenant en compte les constituants (Colinart *et al.*, 2020), les équations 22 et 23 sont utilisées pour calculer la variation de masse de la bauge et de la terre allégée en fonction du pourcentage de leurs composants, par rapport à la masse mesurée sur les échantillons de bauge et de terre allégée (**Figure 96**).

$$M_{bauge(lo\ de\ m\lange)} = 0,025M_{fibre\ de\ lin} + 0,325 M_{Sol\ 1} + 0,65 M_{Sol\ 2} \quad \text{Équation 22}$$

$$M_{terre\ all\g\ee(lo\ de\ m\lange)} = 0,35M_{roseau} + 0,65 M_{Sol3} \quad \text{Équation 23}$$

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

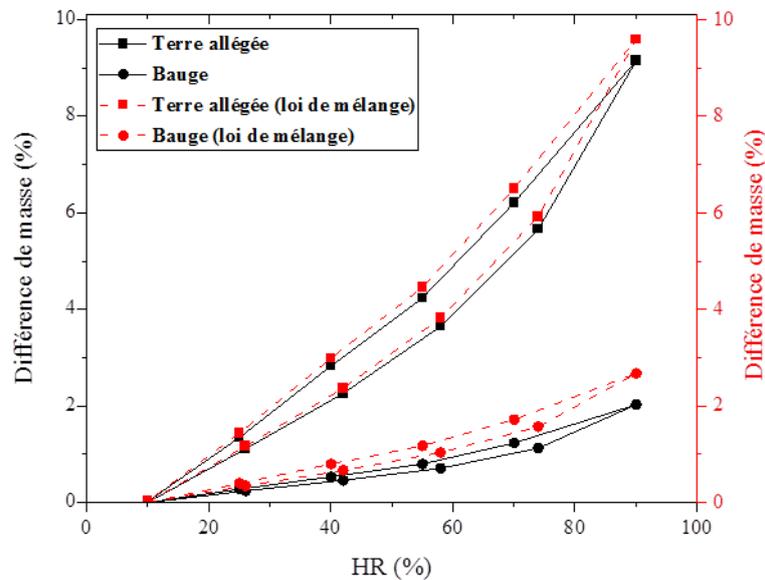


Figure 96 : Comparaison entre isothermes de sorption d'humidité selon la loi de mélange

Par comparaison, la masse calculée par la loi de mélange est supérieure de 0,2 % à la masse mesurée de la terre allégée (**Figure 96**). Ceci est dû d'une part à l'importance de l'absorption d'humidité par les fibres de roseau, et d'autre part, pour l'échantillon de terre allégée, à la porosité qui est liée à la compaction. La différence de masse entre l'échantillon de bauge et la loi de mélange est de 0,5 %. Elle est due à une absorption plus importante par la paille de lin.

2.2 Porosité accessible à l'eau

Les résultats de mesures de la porosité accessible à l'eau sont présentés dans le **Tableau 33**. Ils sont corrélés avec les résultats des courbes de sorption/désorption de la bauge et de la terre allégée. En effet, la plus faible porosité de la bauge réduit l'aire d'hystérésis et entraîne donc une réduction de l'absorption hygroscopique de l'humidité par la bauge. Cependant, une porosité plus importante de la terre allégée permet une meilleure absorption de l'humidité (**Figure 94**).

Tableau 33 : Mesures de porosité accessible à l'eau

| Matériau | Bauge | | | Terre allégée | | |
|--------------------------|---------------|----|----|---------------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Numéro d'échantillon | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Porosité "Φ" [%] | 30 | 28 | 31 | 53 | 55 | 55 |
| Porosité moyenne "Φ" [%] | 30 ± 1 | | | 54 ± 1 | | |

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

L'absorption d'eau par la terre et les fibres a un effet important sur leur adhésion à la matrice. Après le séchage, le volume des particules diminue en créant des vides autour d'elles. Cela est dû au gonflement de la terre et des fibres, causé par l'absorption de l'eau pendant les 24 premières heures, et la pression interstitielle de l'eau existant dans le sol (Segetin *et al.*, 2007b).

La capacité de sorption de la terre allégée est plus élevée que celle de la bauge (**Figure 94**). Cela signifie que le phénomène de condensation de l'humidité est ralenti et que la surface est adéquate pour évaluer le flux de chaleur. La propriété hygroscopique est bien observable dans la terre allégée, moins dans la bauge.

Ce caractère hygroscopique peut influencer la durabilité, la résistance et les propriétés d'isolation thermique des matériaux. Il est donc important d'étudier la perméabilité à la vapeur d'eau de la bauge et de la terre allégée.

2.3 Perméabilité à la vapeur

Les résultats de perméabilité à la vapeur d'eau de la bauge et la terre allégée sont reportés dans le **Tableau 34**. Le facteur de perméabilité à la vapeur d'eau est de 12,9 pour la bauge et de 8,2 pour la terre allégée, en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature (cf. **Tableau 8**). Celui de la bauge est supérieur de 57 % à celui de la terre allégée, sachant que cette dernière offre de meilleures performances hygroscopiques que la bauge.

Tableau 34 : Facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) de la bauge et de la terre allégée

| Matériau | Bauge | | | Terre allégée | | |
|--|----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Numéro d'échantillon | | | | | | |
| δ : Perméabilité à la vapeur $\times 10^{-12}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹] | 16.2 | 15.7 | 14.6 | 25.5 | 25.4 | 22.3 |
| δ moyenne $\times 10^{-12}$ [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹] | 15.5 \pm 0.8 | | | 24.4 \pm 1.9 | | |
| Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ [-] | 12.35 | 12.72 | 13.75 | 7.8 | 7.9 | 9.0 |
| μ moyen [-] | 12.9 \pm 0.7 | | | 8.2 \pm 0.7 | | |

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

Comme pour le test de sorption/désorption, la plus faible perméabilité à la vapeur d'eau de la bauge est probablement due à sa moindre porosité, de l'ordre de 30 % (**Tableau 33**) et à l'interaction entre les sols et la paille de lin qui n'a pas créé assez de vide pour le stockage de la vapeur d'eau (**Figure 97**). À l'opposé, la terre allégée a une perméabilité à la vapeur d'eau plus élevée due à sa grande porosité (54%) (**Tableau 33**) et à la nature du roseau qui donne un caractère plus hygroscopique à la terre allégée (**Figure 97**).



Figure 97 : Section d'un échantillon de bauge (*à gauche*) et de terre allégée (*à droite*)

2.4 Suivi de la conductivité thermique en chambre climatique

Un suivi de la conductivité thermique en chambre climatique dans des conditions hivernales (T: 5 °C et HR : 80 %) et estivales (T : 20 °C et HR : 80 %) a été réalisé sur la bauge et sur la terre allégée, en prenant en compte les paramètres de température, d'humidité relative et de vitesse du vent.

La projection de ces résultats nous a permis de définir la cinétique de séchage et la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique, qui dépendent fortement de la teneur en eau et de la porosité accessible à l'eau.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

2.4.1 Bauge

Comme présenté dans la **Figure 98**, la cinétique de séchage de la bauge est presque la même dans les conditions estivales et hivernales : la masse volumique se situe entre 1950 kg/m³ et 1650 kg/m³.

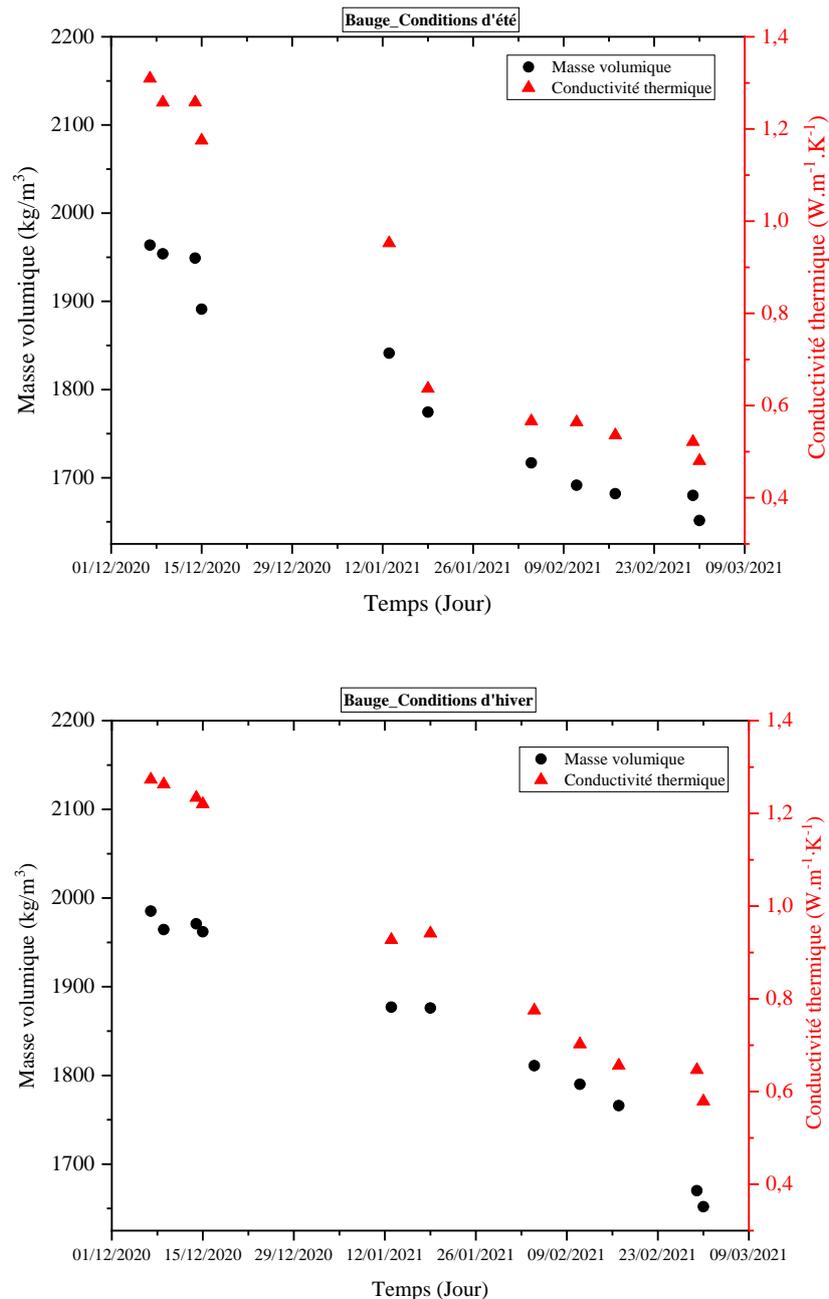


Figure 98 : Conductivité thermique et masse volumique de la bauge en laboratoire

La teneur en eau varie alors de 21,4 % à 2 % en hiver et de 21,2 % à 0,8 % en été (**Figure 99**). Nous en déduisons que la perte de masse des échantillons de bauge n'est pas homogène.

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

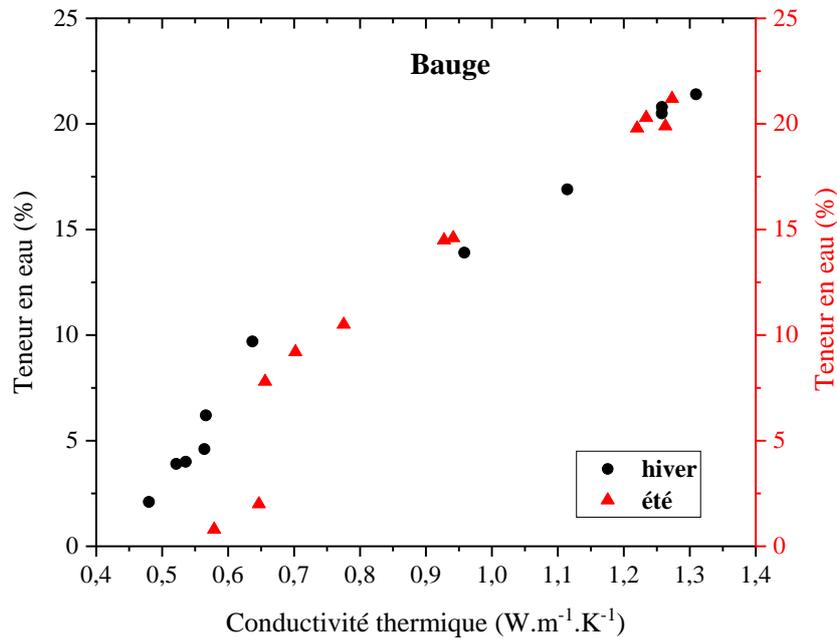


Figure 99 : Relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau de la bauge en laboratoire

Comme l'indique la **Figure 100**, la conductivité thermique diminue en fonction de la masse volumique, passant de 1,31 à 0,48 W.m⁻¹.K⁻¹ en été, et de 1,27 à 0,58 W.m⁻¹.K⁻¹ en hiver.

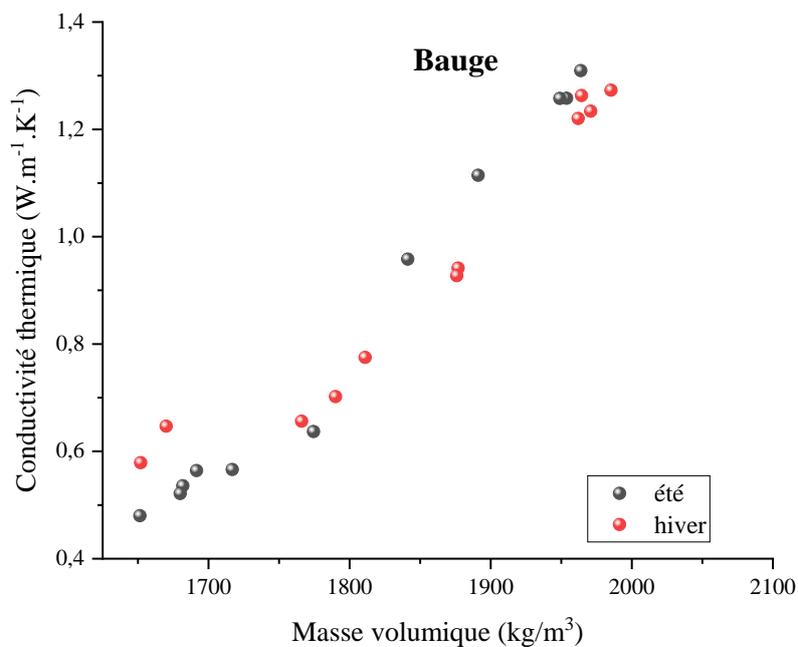


Figure 100 : Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique de la bauge

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

2.4.2 Terre allégée

Comme présenté dans la **Figure 101**, la cinétique de séchage de la terre allégée est presque la même dans les conditions estivales ou hivernales, avec une diminution de la masse volumique de 1100 kg/m^3 à 620 kg/m^3 .

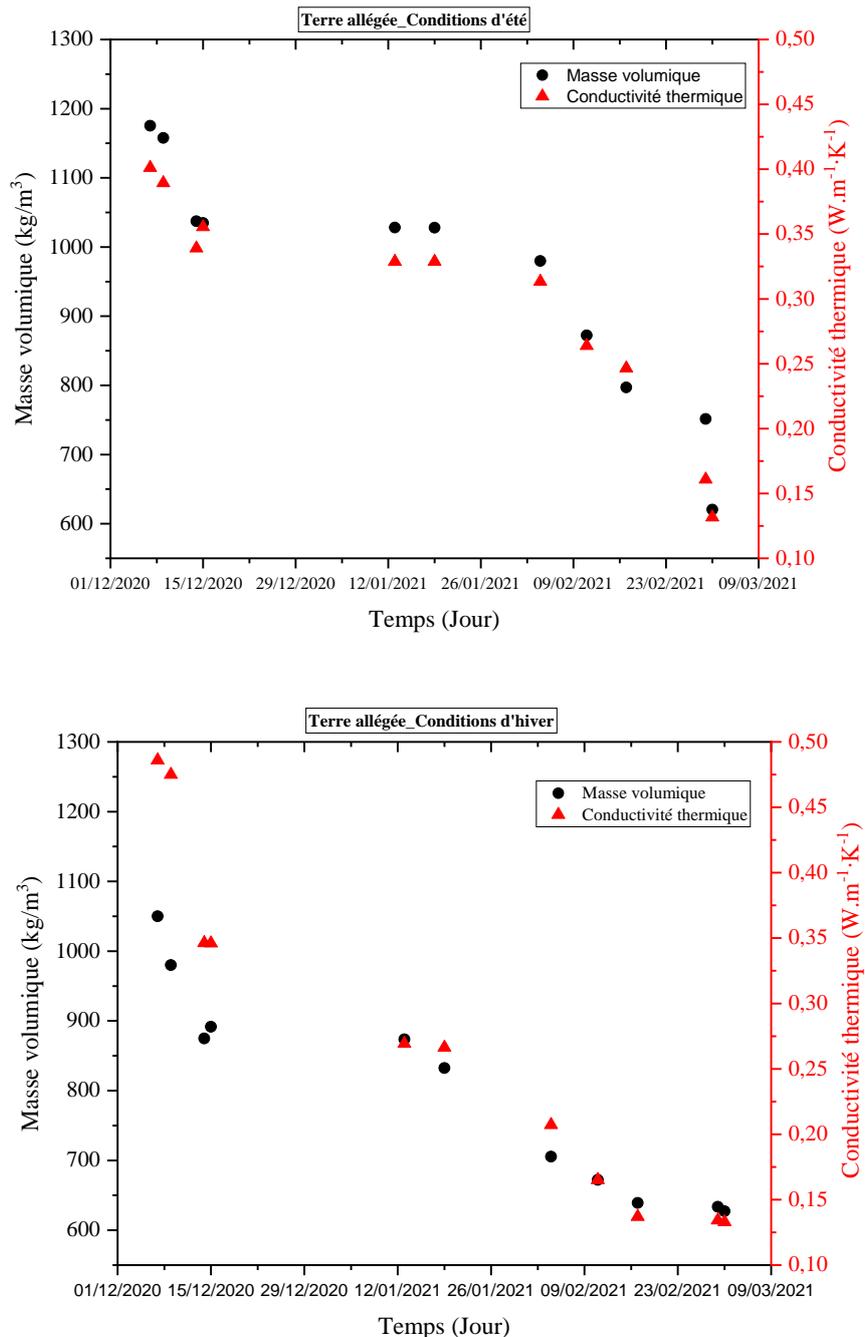


Figure 101 : Conductivité thermique et masse volumique de la terre allégée en laboratoire

La conductivité thermique diminue en fonction de la masse volumique est de $0,50$ à $0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ en hiver et de $0,40$ à $0,13 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ en été (**Figure 102**).

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

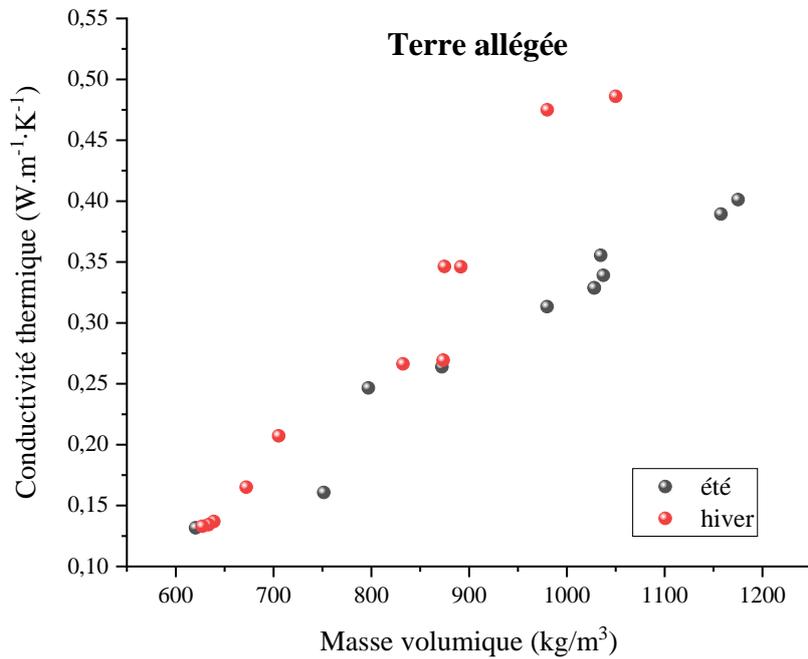


Figure 102 : Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique de la terre allégée

La teneur en eau finale est de 4 % (**Figure 103**).

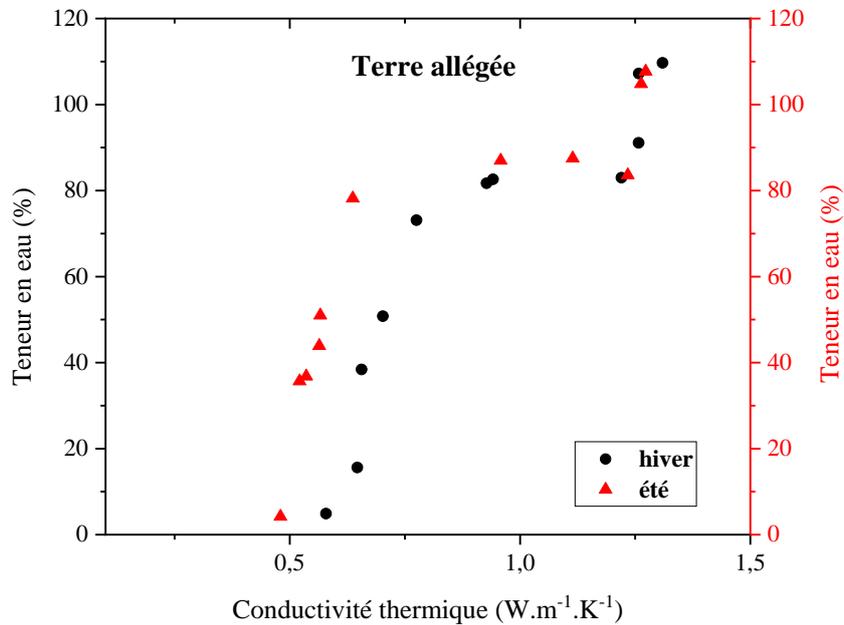


Figure 103 : Relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau de la terre allégée en laboratoire

CHAPITRE V : CINÉTIQUE DE SÉCHAGE, RETRAIT ET COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE EN LABORATOIRE

3. Conclusion

Dans ce cinquième chapitre, nous avons cherché à comprendre et à quantifier l'évolution de la cinétique de séchage, ainsi que les propriétés hygrothermiques de la bauge et de la terre allégée constituant les murs du bâtiment pilote à double paroi. Nous avons constaté que le séchage suivait une fonction décroissante exponentielle en fonction du temps pour les deux matériaux.

Une exception a été observée pour la terre allégée pendant la première semaine après la construction. En effet, la teneur en eau volumétrique est restée approximativement constante ($0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Ceci est probablement dû à l'absorption de l'eau par les fibres de roseau.

Une variation du taux de séchage entre la partie supérieure et inférieure de la même levée a été observée, en particulier dans la bauge. Sur le chantier, nous avons constaté que la teneur en eau volumétrique initiale était plus homogène dans la bauge que dans la terre allégée.

Les études au laboratoire montrent que la cinétique de séchage en chambre climatique simulée est similaire à celle sur chantier. La masse volumique et la conductivité thermique ont été mesurées sur les échantillons de bauge et de terre allégée dans des conditions hivernales et estivales en utilisant la chambre climatique. D'autres mesures expérimentales des propriétés hygrothermiques basées sur l'isotherme de sorption de l'humidité, la porosité accessible et la perméabilité à la vapeur d'eau ont été effectuées en laboratoire.

Les résultats ont révélé que la masse volumique de la bauge se situait entre $1950 \text{ kg}/\text{m}^3$ et $1650 \text{ kg}/\text{m}^3$, avec une conductivité thermique de $1,31$ à $0,48 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en été, et de $1,27$ à $0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en hiver. La masse volumique de la terre allégée diminue de $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$ à $620 \text{ kg}/\text{m}^3$, avec une conductivité thermique de $0,50$ à $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en été, et de $0,40$ à $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ en hiver.

Les résultats hygrothermiques ont mis en évidence une relation entre la conductivité thermique de la bauge ou de la terre allégée, leur densité et leur teneur en eau dans des conditions estivales et hivernales. De même, la porosité accessible à l'eau affecte la perméabilité à la vapeur d'eau et la sorption-désorption des matériaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE
PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont été réalisés dans le cadre du projet CobBauge au sein du laboratoire de recherche de l'ESITC Caen et sur le chantier de construction du bâtiment pilote à Saint-André-de-Bohon, près de Carentan dans la Manche.

L'objectif de ce travail de thèse consistait à étudier les performances mécaniques et hygrothermique de la bauge et de la terre allégée, et le comportement de ces matériaux à l'échelle réelle au cours de leur mise en œuvre et dans différentes conditions météorologiques au laboratoire et sur chantier.

Les travaux existants sur les différents matériaux à base de terre sont principalement axés sur les propriétés mécaniques (Bui *et al.*, 2020; Miccoli *et al.*, 2014; Tripura and Singh, 2018) et la durabilité (Indian Standard.IS 13827, 1993; Standards New Zealand:NZS 4298, 1998; Tang *et al.*, 2011). Cependant, les matériaux en bauge et en terre allégée qui offrent des avantages certains ont été peu étudiés. Il est donc important d'étudier leurs performances, notamment celles liées aux propriétés mécaniques et hygrothermiques.

Les recherches précédentes sur les matériaux de bauge et terre allégée ont été prometteuses et ont montré la possibilité de leur utilisation dans la construction, ainsi que leur valorisation par la suite (Akinkurolere *et al.*, 2006; Evans *et al.*, 2002; Vincelas *et al.*, 2019). Cependant, les connaissances concernant la résistance mécanique et le retrait de ce type de matériaux nécessitent d'être approfondies pour permettre leur utilisation structurelle (murs porteurs par exemple). En outre, le comportement de ces murs sur le long terme, la bonne isolation thermique et le comportement hygrothermique sont des aspects essentiels pour le développement des matériaux de construction innovants en bauge et terre allégée. Pour ces raisons, plusieurs travaux expérimentaux ont été menés dans le cadre de cette thèse :

- ❖ Étude et caractérisation de la bauge et de la terre allégée mises en œuvre sur chantier ou au laboratoire, avec une analyse et corrélation, en se basant sur plusieurs paramètres, notamment la teneur en eau, la densité, la porosité, la résistance mécanique et la conductivité thermique.
- ❖ Utilisation de différents capteurs pour le suivi de la cinétique de séchage et le retrait des murs du bâtiment pilote sur chantier.
- ❖ Contrôle de la cinétique de séchage de la bauge et de la terre allégée dans une chambre climatique en se basant sur la perte de masse, la densité et la conductivité thermique.
- ❖ Étude des propriétés hygrothermiques de la bauge et de la terre allégée en laboratoire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans un premier temps, l'étude bibliographique a mis en évidence différents travaux et formulations types de la bauge constituée essentiellement de limon, sable et fibres végétales. En matière de propriétés mécaniques, la résistance à la compression varie de 0,6 à 1,65 MPa. Ce comportement est influencé par la teneur en eau et par les paramètres physiques de la fibre et de la terre.

La conductivité thermique varie en fonction de la teneur en fibres, de la densité et de la teneur en eau du mélange. Elle présente des valeurs comprises entre 0,45 et 0,93 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour la bauge, et entre 0,06 et 0,12 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour la terre allégée.

Les mélanges de terre et fibres végétales sont caractérisés par un comportement hygroscopique spécifique. Ce sont des matériaux micro et macroporeux dont le facteur de résistance à la vapeur d'eau (μ) moyen à 23 °C est compris entre 7 et 9 pour la bauge et entre 2 et 4,8 pour la terre allégée.

Les sols utilisés dans ces recherches proviennent de la carrière de Lieusaint en Normandie. Ces sols ont été caractérisés d'un point de vue géotechnique et minéralogique.

- Le sol 1 est un sable limoneux fin avec 20 % de particules $< 80 \mu\text{m}$, une masse volumique spécifique de 2603 kg/m^3 et un indice de plasticité (I_p) de 2,3 % ;
- Le sol 2 est un limon peu plastique avec 90 % de particules $< 80 \mu\text{m}$, une masse volumique spécifique de 2617 kg/m^3 et un indice de plasticité (I_p) de 4,2 % ;
- Le sol 3 est une argile très plastique avec 80 % de particules $< 80 \mu\text{m}$, une masse volumique spécifique de 2567 kg/m^3 et un indice de plasticité (I_p) de 4,2 %.

Les fibres végétales utilisées sont de la paille de lin pour le mélange de bauge et du roseau pour le mélange de terre allégée.

- La paille de lin a été cultivée autour de Caen, produite dans la commune Marchésieux.
- Le roseau jauni utilisé dans nos mélanges provient de Seine-Maritime, et a été récolté au pied du pont de Normandie

Après la détermination des propriétés physiques, mécaniques et thermiques de la bauge et de la terre légère sur chantier et en laboratoire, les mélanges sur chantier ont été analysés pour évaluer la variabilité des propriétés entre quatre levées du bâtiment prototype.

La teneur en eau de la bauge était de 18 % à 21 %. Les valeurs de masse volumique étaient comprises entre 1691 et 1789 kg/m^3 . La résistance à la compression à 2 % de déformation variait entre 0,96 et 1,45 MPa. Cela représente une variation de 34 % de la résistance à la

CONCLUSION GÉNÉRALE

compression de la bauge pendant la construction du prototype. À l'exception de la levée 4, la conductivité thermique était de 0,610 à 0,650 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La teneur en eau de la terre allégée variait de 79 % à 83 %, et les valeurs de masse volumique étaient comprises entre 420 et 565 kg/m^3 . La conductivité thermique était comprise entre 0,132 et 0,146 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ce qui représente une variation de 5 % pendant la construction du prototype.

Les formulations des mélanges en laboratoire étaient basées sur les pourcentages moyens des matériaux utilisés dans les mélanges sur chantier. Une machine automatique Proctor de compactage à différentes énergies a été utilisée pour préparer les échantillons. Une énergie de compactage de 0,6 MJ/m^3 s'est avérée appropriée pour la bauge et de 0,2 MJ/m^3 pour la terre allégée.

En effet, la résistance à la compression et la conductivité thermique au laboratoire étaient plus élevées que celles mesurées sur chantier. Nous avons supposé que cela était dû au fait que le compactage Proctor rendait le matériau plus homogène. Par conséquent, des facteurs de correction ont été appliqués aux valeurs mesurées en laboratoire pour prédire les valeurs sur chantier. Nous avons quantifié les processus de retrait et de séchage dans les couches de bauge et de terre allégée dans le but de mieux comprendre ces deux processus essentiels aux constructions en terre.

Pour la bauge comme pour la terre allégée, le séchage et le retrait peuvent être décrits par une loi de décroissance exponentielle. Une exception a été observée pour la terre allégée pendant la première semaine après la construction, avec une teneur en eau volumétrique (VWC) qui est restée stable. Ces comportements ont été imputés aux processus d'échange d'eau entre l'argile et les fibres de roseau dans le mélange. Il a également été observé que la VWC initiale était plus homogène dans la bauge que dans la terre allégée. Les variations sont probablement dues à plusieurs facteurs : la méthode de préparation du matériau, l'évaporation et l'ajout d'eau par les artisans pendant la construction.

D'autre part, un taux de séchage différentiel entre la partie supérieure (50 cm) et la partie inférieure (25 cm) d'une même levée a été observé, en particulier dans la bauge. En ce qui concerne l'effet de l'épaisseur, il a été constaté que les murs épais séchaient plus lentement que les murs minces.

L'étude du séchage au laboratoire a porté sur la compréhension et la quantification de l'évolution de la cinétique de séchage, ainsi que sur les propriétés hygrothermiques de la

CONCLUSION GÉNÉRALE

bauge et de la terre allégée utilisées pour les murs du bâtiment pilote. L'évolution du séchage de la bauge et de la terre allégée a été décrite par une loi de décroissance exponentielle en fonction du temps. Les études en chambre climatique au laboratoire montrent que la cinétique de séchage est la même que celle sur chantier.

La masse volumique et la conductivité thermique ont été mesurées sur les échantillons de bauge et de terre allégée dans des conditions hivernales et estivales en utilisant la chambre climatique et les mesures expérimentales des propriétés hygrothermiques basées sur l'isotherme de sorption de l'humidité, la porosité accessible et la perméabilité à la vapeur d'eau.

Les résultats hygrothermiques ont révélé que la conductivité thermique de la bauge et de la terre allégée diminuait en fonction de la masse volumique. De même, l'impact de la porosité accessible à l'eau affecte la perméabilité à la vapeur d'eau et la sorption-désorption.

Sur chantier, pendant les trois premières semaines, nous avons identifié un retrait avec un tassement plus important dans la couche de bauge. Cela est probablement dû à l'effet de la densité qui est plus sensible dans la bauge que dans la terre allégée. Quelques semaines plus tard, le retrait est quasiment le même dans les deux couches, et tend vers une valeur palier de 3 à 4 %.

Au laboratoire, les retraits respectifs des deux échantillons de dimensions $25 \times 50 \times 40$ cm de bauge et de terre allégée avec coffrage sont de 1,75 % et 1 %. Pour les deux autres échantillons de dimensions $40 \times 50 \times 40$ cm de bauge et de terre allégée avec coffrage, les retraits respectifs sont de 3,75 % et 1,8 %.

CONCLUSION GÉNÉRALE

PERSPECTIVES

Les points présentés ci-après constituent une série de propositions pour des futures recherches en complément des études reportées dans ce mémoire :

- Il est important de développer sur chantier une méthode de mise en œuvre des mélanges de bauge et de terre allégée afin d'obtenir des mélanges plus homogènes pour chaque levée, notamment en matière de résistance mécanique et de conductivité thermique.
- Une étude par imagerie du retrait et du tassement de la bauge et de la terre allégée devra être menée afin d'établir des données plus précises.
- Pour connaître l'effet de chaque levée sur le tassement et la résistance mécanique d'un mur complet en double couche bauge-terre allégée, une étude dédiée est nécessaire.
- Une caractérisation précise de la fissuration dans la bauge serait nécessaire pour la compréhension de ce matériau. Une corrélation d'images numériques couplée avec des essais spécifiques permettrait d'observer et de quantifier l'apport mécanique des fibres de lin dans la bauge.
- Nous avons constaté sur chantier que la durée de séchage d'une levée était d'environ quinze jours, ce qui contraint les délais de réalisation. Connaître la résistance mécanique de la levée initiale par rapport à la densité de la levée supérieure permettrait de réduire les délais de mise en œuvre.
- En complément de cette étude du comportement hygrothermique à l'échelle des matériaux de laboratoire, une étude à l'échelle d'un mur ou du bâtiment en cours d'utilisation est nécessaire pour la compréhension du comportement de ces matériaux dans des conditions réelles.
- La durabilité étant une caractéristique essentielle de la bauge et de la terre allégée, il semble nécessaire d'approfondir les recherches sur les problèmes liés à la sénilité à l'eau et à la moisissure, notamment pour la terre allégée.

ANNEXES

ANNEXE

ANNEXE 1

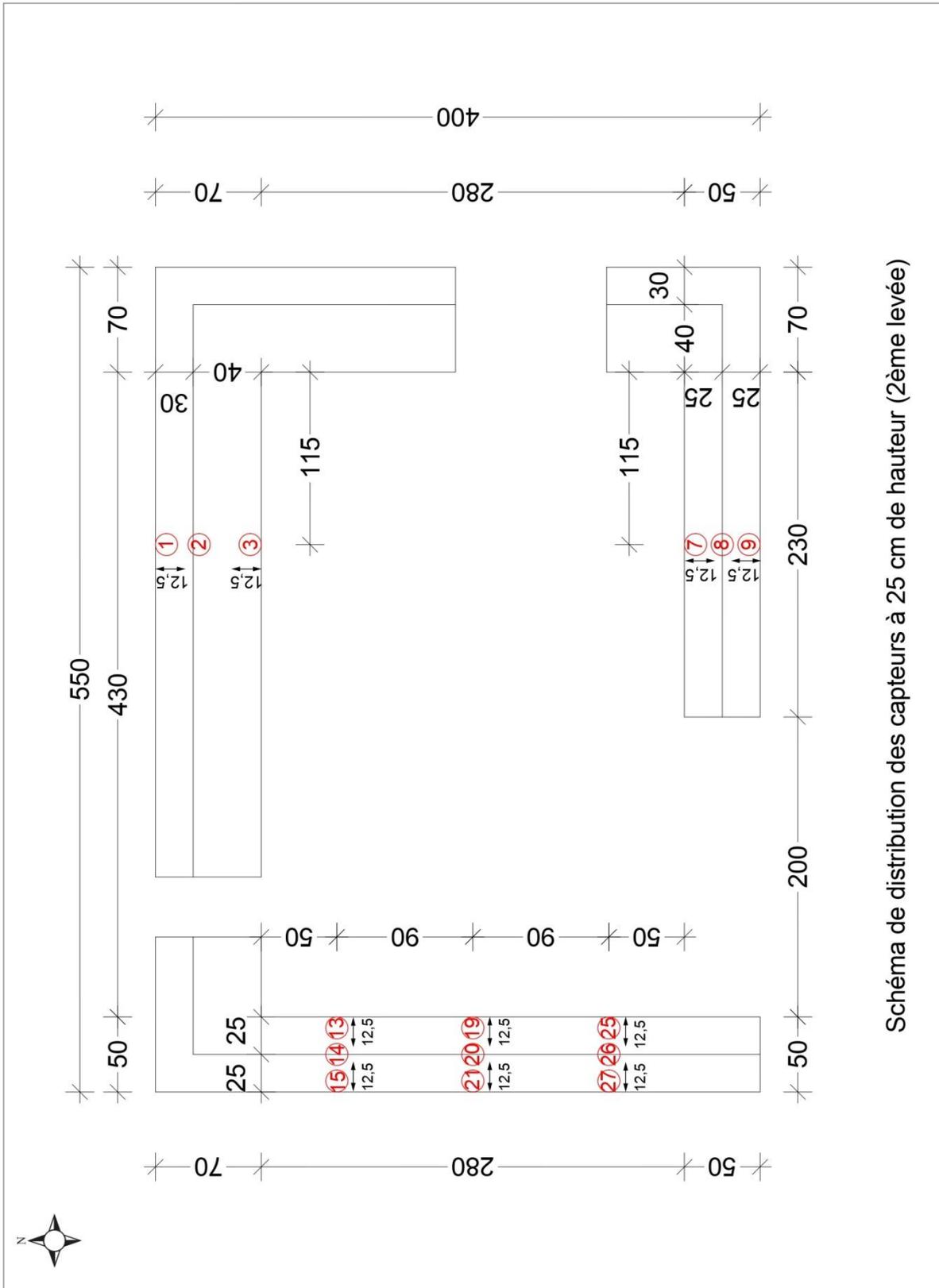


Schéma de distribution des capteurs à 25 cm de hauteur (2ème levée)

ANNEXE

ANNEXE 2

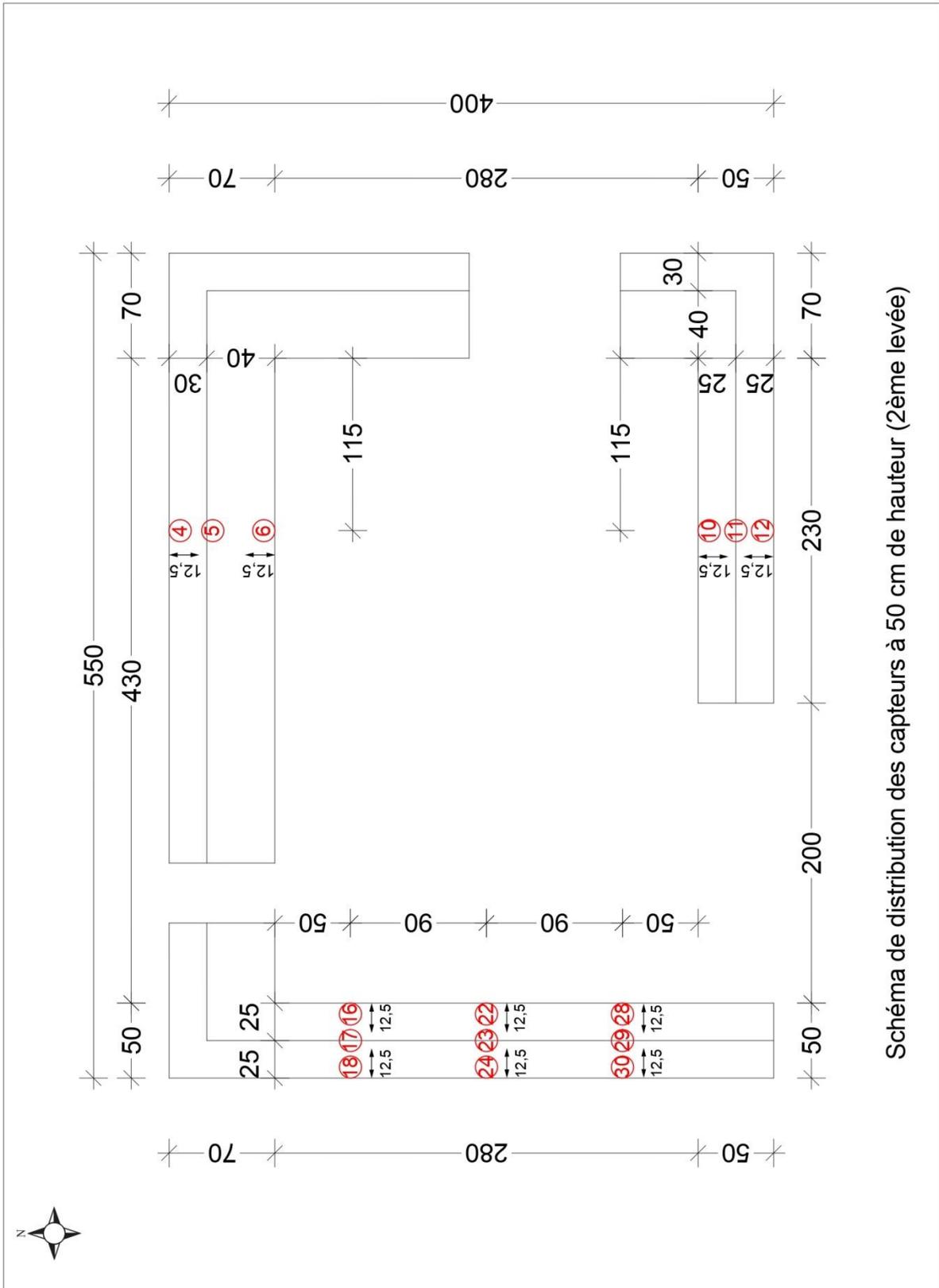


Schéma de distribution des capteurs à 50 cm de hauteur (2ème levée)

ANNEXE

ANNEXE 3

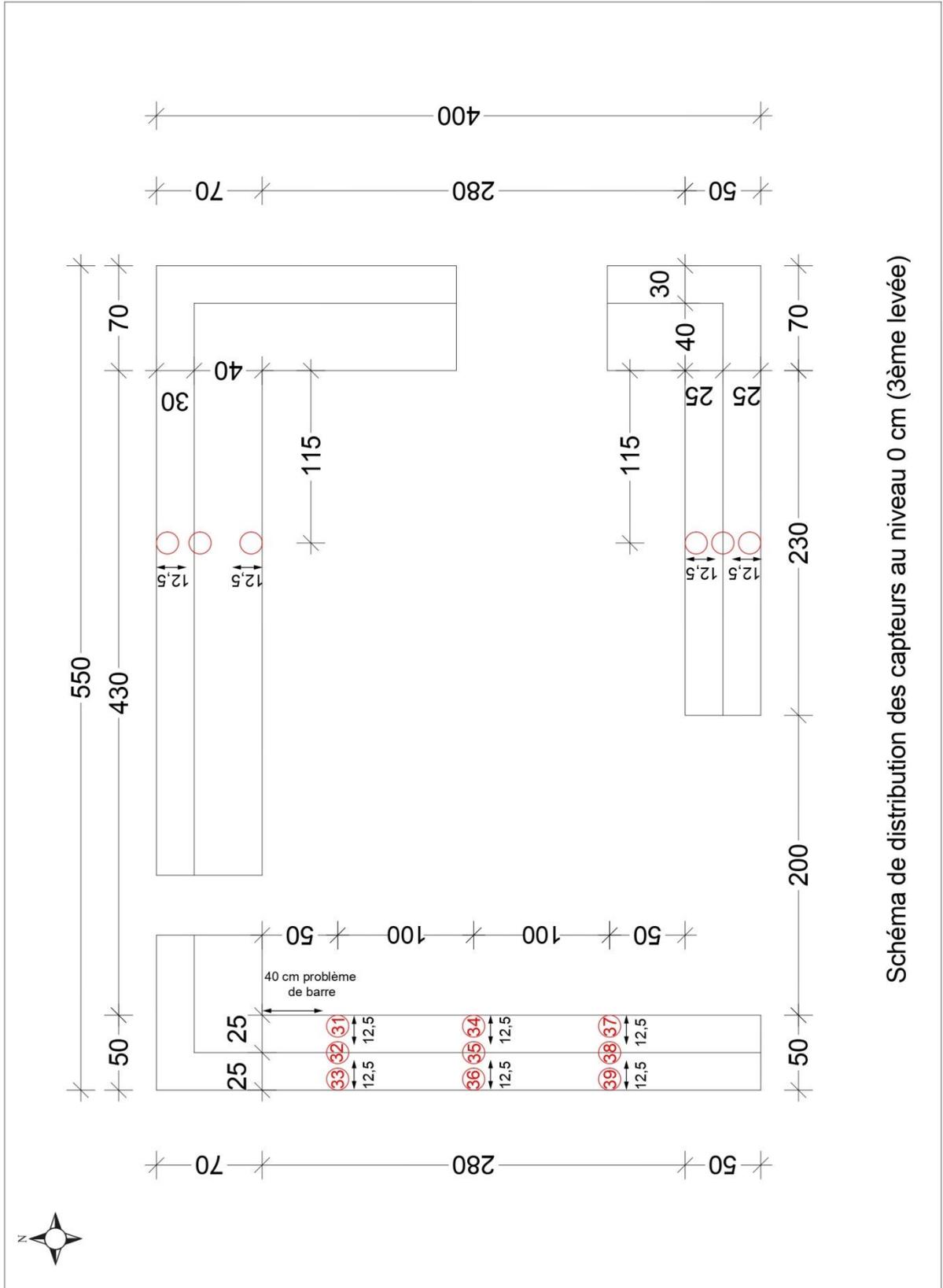
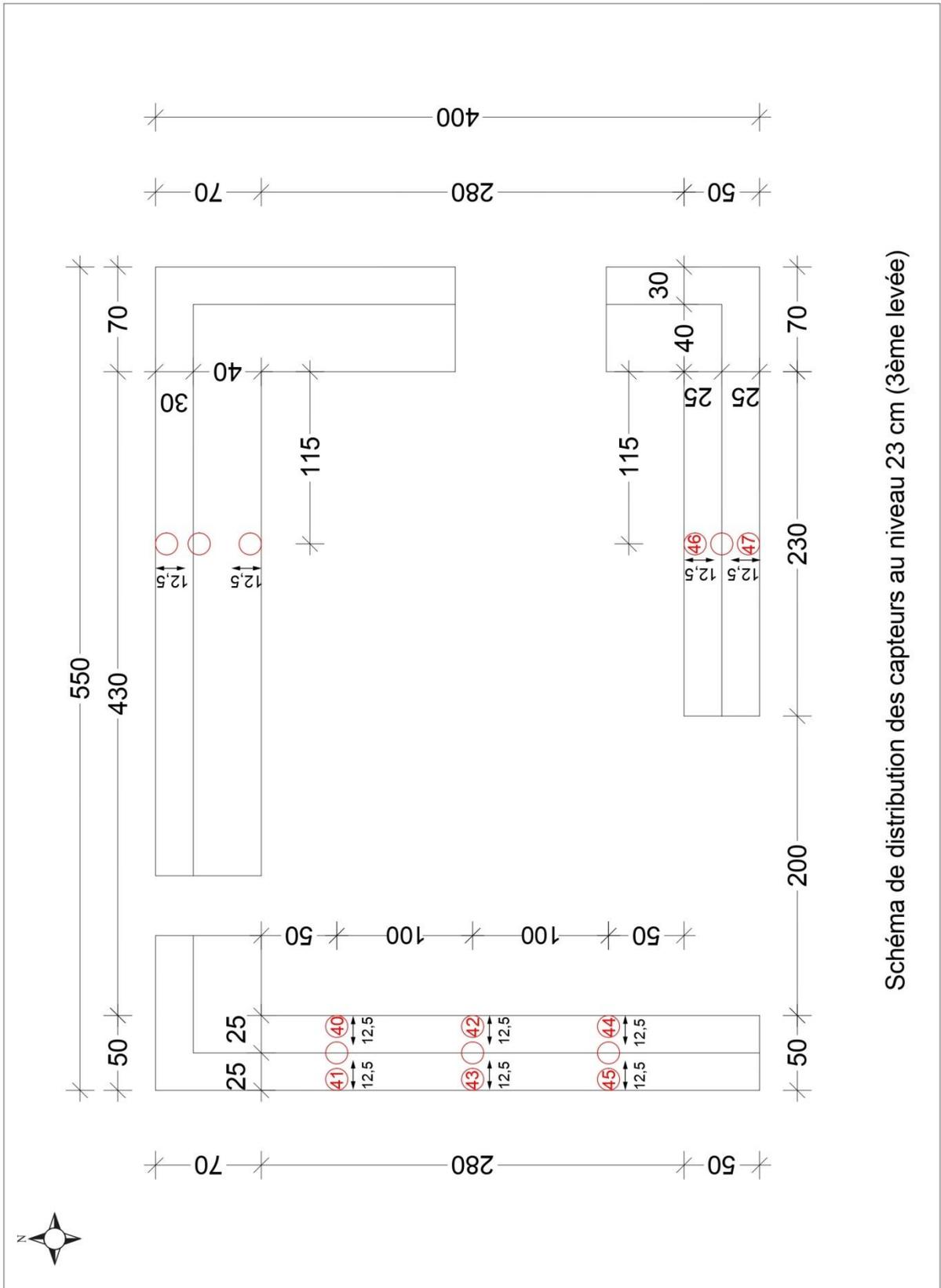


Schéma de distribution des capteurs au niveau 0 cm (3ème levée)

ANNEXE

ANNEXE 4



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abreu e lima, P., Marques, J., Pimenta Do Vale, C., 2016. Rammed Earth Construction Nowadays - Comparing Methodologies and Design Between Portugal and USA. Presented at the Terra Lyon 2016, p. 6.

Achenza, M., Fenu, L., 2006. On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction. *Mater Struct* 39, 21–27. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9000-0>

Akinkurolere, O.O., Jiang, C., Oyediran, A.T., Dele-Salawu, O.I., Elensinnla, A.K., 2006. Engineering Properties of Cob as a Building Material. *Journal of Applied Sciences* 6, 1882–1885. <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1882.1885>

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

Al Rim, K., Ledhem, A., Douzane, O., Dheilily, R.M., Queneudec, M., 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. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00008-6)

Algin, H.M., Turgut, P., 2008. Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Construction and Building Materials* 22, 1074–1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.006>

Allinson, D., Hall, M., 2010. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings* 42, 845–852. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.005>

Álvarez-Vigil, A.E., González-Nicieza, C., López Gayarre, F., Álvarez-Fernández, M.I., 2010. Forensic analysis of the evolution of damages to buildings constructed in a mining area (Part II). *Engineering Failure Analysis, Papers presented at the 26th meeting of the Spanish Fracture Group (Santander, Spain, March 2009)* 17, 938–960. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.11.005>

Amziane, S., Collet, F., Lawrence, M., Magniont, C., Picandet, V., Sonebi, M., 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. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1029-3>

Antilla, L., 2005. Climate of scepticism: US newspaper coverage of the science of climate change. *Global Environmental Change* 15, 338–352. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.08.003>

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S., 2015. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies* 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>

Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W., 2015. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings* 104, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>

AsTerre, 2018. La terre, un matériau de construction - AsTerre [WWW Document]. URL <https://www.asterre.org/>

Atelier ALP, 2018. ARCHITECTE SPECIALISTE BÂTI ANCIEN, SPÉCIALISATION TERRE CRUE [WWW Document]. URL <https://www.atelier-alp.bzh/>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Au-milieu-de-nulle-part, 2019. Au Milieu de Nulle Part (cabane dans les arbres lac du der gite location de vacances) Outines - Lac du Der - Marne - Champagne - Grand Est [WWW Document]. URL <https://www.au-milieu-de-nulle-part.com/fr>
- Azhary, K.E., Raefat, S., Laaroussi, N., Garoum, M., 2018. Energy performance and thermal proprieties of three types of unfired clay bricks. *Energy Procedia, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies”, CONECT 2018*, 16-18 May 2018, Riga, Latvia 147, 495–502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.059>
- Azwa, Z.N., Yousif, B.F., Manalo, A.C., Karunasena, W., 2013. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design* 47, 424–442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>
- Bal, H., Jannot, Y., Gaye, S., Demeurie, F., 2013. Measurement and modelisation of the thermal conductivity of a wet composite porous medium: Laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials* 41, 586–593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.032>
- Bal, H., Jannot, Y., Quenette, N., Chenu, A., Gaye, S., 2012. Water content dependence of the porosity, density and thermal capacity of laterite based bricks with millet waste additive. *Construction and Building Materials* 31, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.063>
- Balesdent, J., Dambrine, E., Fardeau, J.-C., 2015. *Les sols ont-ils de la mémoire ? - 80 clés pour comprendre les sols*, Éditions Quae. ed.
- Baley, C., 2005. *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*.
- Baley, C., 2002. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33, 939–948. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00040-4)
- Batra, S.K., 1998. Other long vegetable fibers. In *Handbook of Fiber Science and Technology*; Lewi, N.M., Pearce, E.M. Eds.; Marcel Dekker Fiber Chemistry: New York, NY, USA. 4, 727. <https://doi.org/10.1002/actp.1987.010380818>
- Binici, H., Aksogan, O., Shah, T., 2005. Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials* 19, 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.013>
- Bognon, S., Cormier, L., 2018. *Agriculture urbaine et urbanisme : la terre et le faire, ce que cultiver la ville produit dans les espaces urbains*. revue Urbanités.
- Bossuyt, V., 1941. *Etude la structure et des propriétés mécaniques de la fibre de lin*. Lille.
- Bouchet, J., Siberchicot, B., Jollet, F., Pasturel, A., 2000. Equilibrium properties of delta-Pu: LDA calculations (LDAequiv local density approximation). *J. Phys.: Condens. Matter* 12, 1723–1733. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/12/8/315>
- Bouguerra, A., Ledhem, A., de Barquin, F., Dheilly, R.M., Quéneudec, M., 1998. Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research* 28, 1179–1190. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00075-1)
- Bouhicha, M., Aouissi, F., Kenai, S., 2005. Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites, Natural fibre reinforced cement composites* 27, 617–621. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Briaud, J.-L., 2013. *Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils*. Jossey-Bass.
- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E., 1938. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J. Am. Chem. Soc.* <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Levacher, D., 2020. Determination and Review of Physical and Mechanical Properties of Raw and Treated Coconut Fibers for Their Recycling in Construction Materials. *Fibers* 8, 37. <https://doi.org/10.3390/fib8060037>
- Cagnon, H., Aubert, J.E., Coutand, M., Magniont, C., 2014. Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings* 80, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- Caldwell, T.G., Bongiovanni, T., Cosh, M.H., Halley, C., Young, M.H., 2018. Field and Laboratory Evaluation of the CS655 Soil Water Content Sensor. *Vadose Zone Journal* 17, 170214. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.12.0214>
- Camões, A., Eires, R., Jalali, S., 2012. Old materials and techniques to improve the durability of earth buildings. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). International Committee on Vernacular Architecture (CIAV).
- Campbell Scientific, 2020. INSTRUCTION MANUAL, CS650 and CS655 Water Content Reectometers, Revision: 07/2021, Campbell Scienti_c Ltd.
- Cao, X., Dai, X., Liu, J., 2016. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings* 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>
- CARMA, 2006. Centre d’animation régional en matériaux avancés (CARMA), « Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d’origine renouvelable ».
- Centre of Lightweight structures, T.-T., 2005. Natural fibre composites from upholstery to structural components.
- Chabriac, P.-A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Laurent, J.-P., Blanc-Gonnet, J., 2014. A Procedure to Measure the in-Situ Hygrothermal Behavior of Earth Walls. *Materials (Basel)* 7, 3002–3020. <https://doi.org/10.3390/ma7043002>
- Chafei, S., 2014. Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d’un composite cimentaire mortier-fibres de lin (These de doctorat). Caen.
- Charlet, K., 2008. Contribution à l’étude de composites unidirectionnels renforcés par des fibres de lin : relation entre la microstructure de la fibre et ses propriétés mécaniques. Université basse-Normandie.
- Chee-Ming, C., 2011. Effect of Natural Fibres Inclusion in Clay Bricks: Physico-Mechanical Properties.
- Ciancio, D., Jaquin, P., Walker, P., 2013. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. *Construction and Building Materials* 42, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049>
- Clevering, O.A., Lissner, J., 1999. Taxonomy, chromosome numbers, clonal diversity and population dynamics of *Phragmites australis*. *Aquatic Botany* 64, 185–208. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00059-5)
- Colinart, T., Vincelas, T., Lenormand, H., Menibus, A.H.D., Hamard, E., Lecompte, T., 2020. Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering* 29, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101134>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Costi de Castrillo, M., Philokyrou, M., Ioannou, I., 2017. Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports* 12, 437–448. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.02.009>
- Cousins, W.J., 1976. Elastic modulus of lignin as related to moisture content. *Wood Sci.Technol.* 10, 9–17. <https://doi.org/10.1007/BF00376380>
- CRATERre, 2017. Maniatidis [WWW Document]. URL <http://craterre.org/>
- Danso, H., 2014. Poor Workmanship and Lack of Plant/Equipment Problems in the Construction Industry in Kumasi, Ghana. *International Journal of Management Research* 2321-1709) 2, 60–70.
- Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J.-E., Gomina, M., 2018. Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials* 158, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001>
- Davies, G.C., Bruce, D.M., 1998. Effect of Environmental Relative Humidity and Damage on the Tensile Properties of Flax and Nettle Fibers. *Textile Research Journal* 68, 623–629. <https://doi.org/10.1177/004051759806800901>
- Delahousse, S., 2011. L'ARCHITECTURE DE TERRE CRUE EN MOUVEMENT EN FRANCE ET AU MALI Regards croisés - Sécheresse info. Université de Nantes.
- Demir, I., 2008. Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management* 28, 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.019>
- Demir, I., 2006. An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and Environment* 41, 1274–1278. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.004>
- Détrie, A., 2007. Besoins et consommations d'énergie dans les bâtiments Synthèse bibliographique.
- Dewulf, M., 2015. *Le torchis, mode d'emploi*, Eyrolles. ed.
- DIN 18945, 2013. DIN 18945 - 2013-08 - Beuth.de [WWW Document]. URL <https://www.beuth.de/de/norm/din-18945/188144488>
- Dittenber, D.B., GangaRao, H.V.S., 2012. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43, 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- Dureix, A., 2010. *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*, Armand-Librairie Eyrolles. ed.
- école d'Avignon, 2009. *Ecole d'Avignon, centre de formation à la réhabilitation du patrimoine architectural* [WWW Document]. URL <http://www.ecole-avignon.com/store/Livres/3241-TERRA-INCOGNITA>
- Ecopôle, 2010. *BTC_ CCA agglomération*. Ecopôle.
- EcoTerra, 2019. *EcoTerra: Un projet de recherche sur les performances des bétons terre-chanvre* [WWW Document]. Cerema. URL <http://www.cerema.fr/fr/actualites/ecoterra-projet-recherche-performances-betons-terre-chanvre>
- Ehlen, J., 2005. Above the weathering front: contrasting approaches to the study and classification of weathered mantle. *Geomorphology, Weathering and landscape evolution* 67, 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.026>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eid, J., 2012. Elaboration d'un eco-geo-matériau de construction à base de terre crue (These en préparation). Normandie.
- Eid, J., Taibi, S., Fleureau, J.M., Hattab, M., 2015. Drying, cracks and shrinkage evolution of a natural silt intended for a new earth building material. Impact of reinforcement. *Construction and Building Materials* 86, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.115>
- Eller, H., Denoth, A., 1996. A capacitive soil moisture sensor. *Journal of Hydrology* 185, 137–146. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03003-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03003-4)
- Evans, I., Smiley, L., Smith, M.G., 2002. *The Hand-sculpted House: A Philosophical and Practical Guide to Building a Cob Cottage*. Chelsea Green Publishing.
- Fabbri, A., 2006. Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel (phdthesis). Université de Marne la Vallée.
- Faria, P., Santos, T., Aubert, J.-E., 2016. Experimental Characterization of an Earth Eco-Efficient Plastering Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28, 04015085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001363)
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.-P., Sain, M., 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science, Topical Issue on Polymeric Biomaterials* 37, 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Fen-Chong, T., Fabbri, A., Guilbaud, J.-P., Coussy, O., 2004. Determination of liquid water content and dielectric constant in porous media by the capacitive method. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIB, Mécanique* 332, 639. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2004.02.028>
- Flament, C., 2013. Valorisation des fines de lavage de granulats : application à la construction en terre crue (These de doctorat). Artois.
- Formation Bâtiment Durable, 2016. *Formation Bâtiment Durable : Rénovation à haute performance énergétique Détails techniques [WWW Document]*. URL <https://docplayer.fr/73847369-Formation-batiment-durable-renovation-a-haute-performance-energetique-details-techniques.html>
- François, B., Palazon, L., Gerard, P., 2017. Structural behaviour of unstabilized rammed earth constructions submitted to hygroscopic conditions. *Construction and Building Materials* 155, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.012>
- Futura, 2018. Définition | Énergie grise - Analyse des Cycles de Vie - ACV | Futura Maison [WWW Document]. Futura. URL <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-energie-grise-5782/>
- Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., Petric, J., 2010. Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials* 24, 1462–1468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008>
- Gallo, E., 2006. Modernité technique et valeur d'usage : le chauffage des bâtiments d'habitation en France.
- Gaudu, J., Mathieu, J., Fumanal, J., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P., Guennelon, R., 1993. Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie* 13, 57–73.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gendelis, S., Jakovičs, A., Engelhardt, M., 2019. Thermal and moisture adsorption/desorption properties for a selection of vegetal insulation materials. MATEC Web Conf. 282, 02062. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202062>
- Ghavami, K., Toledo Filho, R.D., Barbosa, N.P., 1999. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites* 21, 39–48. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X)
- Global Status Report, 2018. Global Status Report 2018 - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector [WWW Document]. World Green Building Council. URL <https://www.worldgbc.org/news-media/2018-global-status-report-towards-zero-emission-efficient-and-resilient-buildings-and> (accessed 5.19.22).
- Goodhew, S., Boutouil, M., Streiff, F., Le Guern, M., Carfrae, J., Fox, M., 2021. Improving the thermal performance of earthen walls to satisfy current building regulations. *Energy and Buildings* 240, 110873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110873>
- Goodhew, S., Griffiths, R., 2005. Sustainable earth walls to meet the building regulations. *Energy and Buildings* 37, 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.005>
- Guides de Bonnes Pratiques de la Construction en Terre Crue, 2018.
- Guillaud, H., 2002. Architecture de terre: L'héritage en «re-création» durable. La Découverte.
- Hache, E., Leboulenger, D., Mignon, V., 2017. Beyond average energy consumption in the French residential housing market: A household classification approach. *Energy Policy* 107, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.038>
- Hall, M., Allinson, D., 2009. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. *Building and Environment* 44, 1935–1942. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.007>
- Hamard, E., Cazacliu, B., Razakamanantsoa, A., Morel, J.-C., 2016. Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. *Building and Environment* 106, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- Hamard, E., Morel, J.-C., Salgado, F., Marcom, A., Meunier, N., 2013. A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage* 14, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005>
- Harris, M., 1954. Handbook of Textile Fibers, Harris Research Laboratories. ed. Washington D.C., USA.
- Heath, A., Walker, P., Fourie, C., Lawrence, M., 2009. Compressive strength of extruded unfired clay masonry units. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 162, 105–112. <https://doi.org/10.1680/coma.2009.162.3.105>
- Honoré, M., 2020. Mise au point de nouveaux bio-composites verts innovants à base de roseau commun *Phragmites australis* : applications en plasturgie et en éco-construction pour le bâtiment (phdthesis). Université de Bretagne Sud.
- Horst, S., 2018. The New DIN Standards in Earth Building—The Current Situation in Germany, *J. Civ. Eng. Archit.* 12.
- Houben, H., Guillaud, H., 2006. Earth Construction —A Comprehensive Guide. Intermediate Technology Publications: London. PRACTICAL ACTION PUBLISHING. <https://doi.org/10.3362/9781780444826>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Houben, H., Guillaud, H., 1984. Earth Construction Primer, Project Document of AGDC/UNCHS/PCCHS-KUL/CRA-UCL/CRATerre. Bruxelles.
- Hulst, Hendrik Christoffel, Hulst, H. C. van de, 1981. Light Scattering by Small Particles. Courier Corporation.
- Huret, J., 2019. Quel avenir pour les constructions en terre crue dans les campagnes d'aujourd'hui: Le cas de la Communauté d'Agglomération du Mont Saint-Michel Normandie. Université Caen Normandie.
- Indian Standard.IS 13827, 1993. Indian Standard. IS 13827.
- Infociments, 2020. Fabrication du ciment et empreinte CO2 [WWW Document]. URL <https://www.infociments.fr/enjeux-societe/la-fabrication-du-ciment-source-maitrisee-de-co2>
- Jackson, M.L., Hseung, Y., Corey, R.B., Evans, E.J., Heuvel, R.C.V., 1952. Weathering Sequence of Clay-size Minerals in Soils and Sediments. Soil Science Society of America Journal 16, 3–6. <https://doi.org/10.2136/sssaj1952.03615995001600010002x>
- Jaquin, P., Augarde, C., 2012. Earth building. History, Science and Conservation, IHS BRE Pr, Watford (UK) 740.
- Jayasinghe, C., Kamaladasa, N., 2007. Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls. Construction and Building Materials 21, 1971–1976. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.049>
- Jean-Claude Daniel, D., Daviller, M., Cadot, G., Lenain, B., Savourat, N., Fichaux, H., Pottier, M., Belhoul, C., 2019. Construire en chanvre.
- Jiménez Delgado, M.C., Guerrero, I.C., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials 21, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- Jiménez Rios, A., O'Dwyer, D., 2020. Experimental validation for the application of the flat jack test in cob walls. Construction and Building Materials 254, 119148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119148>
- Keefe, L., 2012. Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation. Routledge.
- Kelleners, T.J., Paige, G.B., Gray, S.T., 2009. Measurement of the Dielectric Properties of Wyoming Soils Using Electromagnetic Sensors. Soil Science Society of America Journal 73, 1626–1637. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0361>
- Khedari, J., Watsanasathaporn, P., Hirunlabh, J., 2005. Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. Cement and Concrete Composites 27, 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.042>
- Kurta, V., 2015. Le monde des anciens Celtes.
- Kymäläinen, H.-R., Sjöberg, A.-M., 2008. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and Environment 43, 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N., Aubert, J.-E., 2016. From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. Building and Environment 97, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>
- Laboratoire Archéorient, 2017. Laboratoire Archéorient [WWW Document]. Laboratoire Archéorient. URL <https://www.archeorient.mom.fr/>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., MAGNIONT, C., Tribout, C., Bertron, A., 2016. Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials* 111, 719–734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
- Lahure, F., 1985. *Architecture en Terre de Haute Normandie*, TPFE. UPA Rouen.
- Lanas, J., Alvarez-Galindo, J.I., 2003. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research* 33, 1867–1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- Laribi, S., Audiguier, M., Cojean, R., 2008. Assessing shrink/swell properties of two argillaceous soils from the Paris Basin: a comparison of cation exchange determination methods. *Bull Eng Geol Environ* 67, 415–424. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0149-y>
- Lasledj, A., 2009. *Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques (These de doctorat)*. Orléans.
- Laurent, J.-P., 1987. *Propriétés thermiques du matériau terre, études et recherches*.
- Le Guern, M., Sebaibi, N., Boutouil, M., 2018. Technical report Cobbauge project. ESITC Caen.
- Le Hoang, T., 2013. *Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin (These de doctorat)*. Caen.
- Ledhem, A., Dheilily, R.M., Benmalek, M.L., Quéneudec, M., 2000. Properties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste. *Construction and Building Materials* 14, 341–350. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00037-4)
- Lima, J., Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibers, in: Fangueiro, R., Rana, S. (Eds.), *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 315–327. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_24
- Liu, L., Li, H., Lazzaretto, A., Manente, G., Tong, C., Liu, Q., Li, N., 2017. The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69, 912–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140>
- Liuzzi, S., Hall, M.R., Stefanizzi, P., Casey, S.P., 2013. Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. *Building and Environment* 61, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.006>
- Maddison, M., Mairing, T., Kirsimäe, K., Mander, Ü., 2009. The humidity buffer capacity of clay–sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands. *Building and Environment* 44, 1864–1868. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.008>
- Magniont, C., 2010. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources (PhD Thesis)*. Toulouse 3.
- Maheu-Giroux, M., De Blois, S., 2007. Landscape ecology of *Phragmites australis* invasion in networks of linear wetlands. *Landscape Ecol* 22, 285–301. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-9024-z>
- Maillard, P., Aubert, J.E., 2014. Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials* 63, 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>
- Maniatidis, V., Walker, P., 2003. *A Review of Rammed Earth Construction: DTI Project Report*.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Marcom, A., 2011. Construire en terre-paille, Conseils d'expert. ed.
- Martins, T.A. de L., Faraut, S., Adolphe, L., 2019. Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. *Energy and Buildings* 190, 262–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.019>
- McCann, J., 2008. *Clay and Cob Buildings*, 2nd edition. ed. Shire, Princes Risborough.
- Mellon, R.M., Sharma, H.S.S., 2002. Thermogravimetric analysis of perennial ryegrass: relationship between dry matter digestibility and thermal profiles. *Thermochimica Acta* 383, 161–168. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(01\)00681-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(01)00681-5)
- Mesbah, A., Morel, J.C., Olivier, M., 1999. Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents. *Mat. Struct.* 32, 687. <https://doi.org/10.1007/BF02481707>
- Meukam, P., Noumowé, A., Jannot, Y., Duval, R., 2003. Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment. <https://doi.org/10.1007/BF02481525>
- Meyer, L., Brinkman, S., van Kesteren, L., Leprince-Ringuet, N., van Boxmeer, F., 2014. Technical Support Unit for the Synthesis Report 169.
- Miccoli, L., Müller, U., Fontana, P., 2014. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials* 61, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- Miccoli, L., Silva, R.A.M., Garofano, A., Oliveira, D.V., 2017. In-plane behaviour of earthen materials: A numerical comparison between adobe masonry, rammed earth and COB. National Technical University of Athens. <https://doi.org/10.7712/120117.5583.17606>
- Michaud, F., 2003. Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique. Laval.
- Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., Ghavami, K., 2014. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials* 52, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Ministère de la transition écologique, 2021. Exigences réglementaires pour la construction des bâtiments (RT 2012) [WWW Document]. Ministère de la Transition écologique. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments-rt-2012>
- Minke, G., 2013. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Building with Earth. Birkhäuser. <https://doi.org/10.1515/9783034612623>
- Minke, G., 2012. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Walter de Gruyter.
- Minke, G., 2000. *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*.
- Morel, J.C., Charef, R., 2019. What are the barriers affecting the use of earth as a modern construction material in the context of circular economy? *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 225, 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012053>
- Nabouch, R., Bui, Q.B., Plé, O., Perrotin, P., Poinard, C., Goldin, T., Plassiard, J.P., 2016. Seismic Assessment of Rammed Earth Walls Using Pushover Tests. *Procedia Engineering, ICSDCE 2016 – Integrating Data Science, Construction and Sustainability* 145, 1185–1192. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.153>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- NF EN 13286-41, 2003. Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41 : test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures.
- NF EN ISO 12571: Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, 2021.
- Niang, I., Maalouf, C., Moussa, T., Bliard, C., Samin, E., Thomachot-Schneider, C., Lachi, M., Pron, H., Mai, T.H., Gaye, S., 2018. Hygrothermal performance of various Typha–clay composite. *Journal of Building Physics* 42, 316–335. <https://doi.org/10.1177/1744259118759677>
- Standards New Zealand:NZS 4298, 1998. Standards New Zealand.
- Oksman, K., 2001. High Quality Flax Fibre Composites Manufactured by the Resin Transfer Moulding Process. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 20, 621–627. <https://doi.org/10.1177/073168401772678634>
- Oudhof, N., Labat, M., Magniont, C., Nicot, P., 2015. Measurement of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures. *Academic Journal of Civil Engineering* 33, 474–479. <https://doi.org/10.26168/icbbm2015.74>
- Page, J., 2017. Formulation et caractérisation d'un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée (phdthesis). Normandie Université.
- Petitjean, M., 2003. Cosntructions en terre en ile-et-vilaine. Apogée.
- Phung, T.A., 2018. Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge. Université de Caen Normandie.
- Piattoni, Q., Quagliarini, E., Lenci, S., 2011. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials* 25, 2067–2075. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>
- Planetoscope-Statistiques, 2007. Production mondiale de béton [WWW Document]. URL <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-.html>
- Quagliarini, E., Lenci, S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.012>
- Quagliarini, E., Maracchini, G., 2018. Experimental and FEM Investigation of Cob Walls under Compression. *Advances in Civil Engineering* 2018, e7027432. <https://doi.org/10.1155/2018/7027432>
- Raj S., S., Sharma, A.K., Anand, K.B., 2018. Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth. *Journal of Building Engineering* 18, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.001>
- Ramakrishna, G., Sundararajan, T., 2005. Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement and Concrete Composites, Natural fibre reinforced cement composites* 27, 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>
- Rigal, M., 2015. Fractionnement de fibres de biomasses herbacées endémiques ou cultivées dans une zone d'estuaire : Eco-conception de matériaux pour la construction (phd).
- Röhlen, U., Ziegert, C., Mochel, A., 2013. Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions, Le Moniteur. [WWW Document]. URL <https://boutique.lemoniteur.fr/construire-en-terre-crue.html>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rosa, N., Soares, N., Costa, J.J., Santos, P., Gervásio, H., 2020. Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 38, 100649. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100649>
- Rowell, R., Han, J.S., Rowell, J.S., 2000. Characterization and Factors Effecting Fiber Properties.
- Sangma, S., Tripura, D.D., 2020. Experimental study on shrinkage behaviour of earth walling materials with fibers and stabilizer for cob building. *Construction and Building Materials* 256, 119449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119449>
- Saxton, R.H., 1995. The performance of cob as a building material', *The Structural Engineer*. [WWW Document].
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., Chotard, T., 2007. Interaction fibre de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite. *Mater. Tech.* 95, 133–142. <https://doi.org/10.1051/mattech:2007038>
- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X., 2007a. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: Manufacturability and properties. *Building and Environment* 42, 3066–3079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.033>
- Segetin, M., Jayaraman, K., Xu, X., 2007b. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: Manufacturability and properties. *Building and Environment* 8, 3066–3079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.033>
- Simons, A., Laborel-Préneron, A., Bertron, A., Aubert, J.E., Magniont, C., Roux, C., Roques, C., 2015. Development of bio-based earth products for healthy and sustainable buildings: characterization of microbiological, mechanical and hygrothermal properties. *Matériaux & Techniques* 103, 206. <https://doi.org/10.1051/mattech/2015011>
- Singh, J., 2019. Quantifying and correcting for clay content effects on soil water measurement by reflectometers. *Agricultural Water Management* 10.
- Sinha, M.K., 1974. Rope-making with Banana-plant Fibre. *The Journal of The Textile Institute* 65, 612–615. <https://doi.org/10.1080/00405007408630158>
- S'Lehmbau Atelier, 2017. Chantier de remplissage en briques de terre allégée. s'Lehmbau Atelier. URL <https://slehmbauatelier.wordpress.com/2017/10/23/chantier-de-remplissage-en-briques-de-terre-allegee/>
- Sridhar, S.K., Basavarajappa, G., Kasturi, S.G., Balasubramanian, N., 1982. Evaluation of jute as reinforcement in composites, *In.Text.Res.*
- Suresh, A., Anand, K.B., 2017. Strength and Durability of Rammed Earth for Walling. *Journal of Architectural Engineering* 23, 06017004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000281](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000281)
- Swearingen, J., Saltonstall, K., 2012. Phragmites field guide: distinguishing native and exotic forms of common reed in the united states,” in USDA - Natural Ressources Conservation Service, no. 56, 2012, p. 23. (TECHNICAL NOTE).
- Taallah, B., Guettala, A., Guettala, S., Kriker, A., 2014. Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials* 59, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Tang, C.-S., Shi, B., Liu, C., Suo, W.-B., Gao, L., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science* 52, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.032>
- Thuault, A., 2011. Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin Multiscale approach of the structure and the mechanical behaviour of the flax fibre. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1492.8085>
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16, 574–582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Touré, P., Sambou, V., Mactar, F., Ababacar, T., Mamadou, A., Dorothé, A., 2017. Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB) - *ScienceDirect Vomule* 13, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.08.012>
- Touret, O., Pons, C.H., Tessier, D., Tardy, Y., 1990. Etude de la repartition de l'eau dans des argiles saturees Mg²⁺ aux fortes teneurs en eau. *Clay Minerals* 25, 217–233. <https://doi.org/10.1180/claymin.1990.025.2.07>
- Tripura, D.D., Singh, K.D., 2018. Mechanical behaviour of rammed earth column: A comparison between unreinforced, steel and bamboo reinforced columns. *materconstrucc* 68, e174–e174. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.11517>
- Van de Velde, K., Kiekens, P., 2001. Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites. *Composite Structures, Third International Conference on Composite Science and Technology* 54, 355–360. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00110-6)
- Van den Oever, M.J.A., Bos, H.L., van Kemenade, M.J.J.M., 2000. Influence of the Physical Structure of Flax Fibres on the Mechanical Properties of Flax Fibre Reinforced Polypropylene Composites. *Applied Composite Materials* 7, 387–402. <https://doi.org/10.1023/A:1026594324947>
- Velde, B., 1992. *Introduction to Clay Minerals*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2368-6>
- Viel, M., Collet, F., Lanos, C., 2018. Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material. *Industrial Crops and Products* 120, 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>
- Villamizar, M.C.N., Araque, V.S., Reyes, C.A.R., Silva, R.S., 2012. Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials* 36, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056>
- Vinceslas, T., Colinart, T., Hamard, E., de Ménibus, A.H., Lecompte, T., Lenormand, H., 2019. Light Earth erformances for thermal insulation: Application to Earth–Hemp, in: Reddy, B.V.V., Mani, M., Walker, P. (Eds.), *Earthen Dwellings and Structures: Current Status in Their Adoption*, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. Springer, Singapore, pp. 357–367. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5883-8_31
- Volhard, F., 2016. *Light Earth Building, A Handbook for Building with Wood and Earth*; Birkhauser: Basel, Switzerland.
- Watson, L., McCabe, K., 2011. The cob building technique. Past, present and future. *Informes de la Construcción* 63, 59–70. <https://doi.org/10.3989/ic.10.018>
- Watts, J., 2019. Concrete: the most destructive material on Earth. *The Guardian*.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Weismann, A., Bryce, K., 2010. Construire en terre facilement ; la technique du cob - Weismann/Bryce - La Plage - Grand format - Le Hall du Livre NANCY.
- Yalley, P.P., Kwan, A.S.K., 2013. Use of waste and low energy material in building block construction. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)* 2, 01–05.
- Yao, J., Chang, C., Salmi, M.L., Hung, Y.S., Loraine, A., Roux, S.J., 2008. Genome-scale cluster analysis of replicated microarrays using shrinkage correlation coefficient. *BMC Bioinformatics* 9, 288. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-288>
- Zakri, T., Laurent, J.-P., Vauclin, M., 1998. Theoretical evidence for 'Lichtenecker's mixture formulae' based on the effective medium theory. *Journal of Physics D: Applied Physics* 31, 1589–1594. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013>
- Zhang, L., Yang, L., Jelle, B.P., Wang, Y., Gustavsen, A., 2018. Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Construction and Building Materials* 162, 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163>
- Ziegert, C., 2006. Historical cob buildings in Germany-construction, damage and repairs. *L'architecture En* 607, 233–246.