HAL
open science

caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat

Yoann Brouard

To cite this version:

Yoann Brouard. caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat. Construction durable. école doctorale université de Tours, 2018. Français. NNT : . tel-01835828

HAL Id: tel-01835828

https://theses.hal.science/tel-01835828

Submitted on 11 Jul 2018

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

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

UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE EMSTU

Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé

THÈSE présentée par :

Yoann BROUARD

soutenue le : **14 mai 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Tours**

Discipline/ Spécialité : Génie mécanique et productique

CARACTERISATION ET OPTIMISATION D'UN COMPOSITE BIOSOURCE POUR L'HABITAT

JURY :

Zoubeir LAFHAJ	Professeur, Ecole Centrale Lille, **Rapporteur**
Saïd TAÏBI	Professeur, Université du Havre, **Rapporteur**
Camille MAGNIONT	Maitre de conférences, INSA Toulouse, **Examinateur**
Thibaut LECOMPTE	Maitre de conférences HDR, Université Bretagne Sud, **Examinateur**
Pierre OUAGNE	Professeur, ENIT Tarbes, **Examinateur**
Naima BELAYACHI	Maitre de conférences HDR, Université d'Orléans
Stéphane MEO	Professeur, Université de Tours
Narayanaswami RANGANATHAN	Professeur, Université de Tours
Julien BONSENS	Chargé de Mission Eco-construction Loches Développement
Eric JULIEN	Artisan, Membre invité

Remerciements

Cette thèse doctorale est une somme de contributions de différents acteurs qui m'ont permis de réaliser, un travail de recherche sur un sujet qui me passionne. Merci tout d'abords aux initiateurs du projet biocomp qui est le fruit d'une rencontre entre un directeur de laboratoire, le Pr. Ranganathan, un artisan, Éric Julien et le chargé de mission éco-construction du Pays Touraine Côté Sud, Julien Bonsens avec lequel j'ai toujours beaucoup de plaisir à échanger et qui m'a permis d'ancrer ces travaux dans une réalité de territoire. L'université d'Orléans via Pierre Ouagne a par la suite rejoint le projet en participant notamment à sa définition. Ayant ensuite endossé le costume du doctorant, j'ai pu bénéficier d'une ambiance conviviale au sein du CERMEL (Centre d'Etude et de Recherche sur les Matériaux Elastomère) et de l'appui et la bienveillance de chacun des cermelitos en particulier mes voisins d'open-space Mapie et Christophe qui ont su me brieffer et me prodiguer de précieux conseils tout au long de mes essais et de la rédaction de ce manuscrit.

De nombreuses personnes ont également contribué à la partie expérimentale tout d'abord pour définir le protocole expérimental in situ sur les chantiers encadré par Eric Julien, puis, le temps de disposer du matériel sur place, via une collaboration et des échanges très intéressants avec Hélène Lenormand de l'Uni La Salle à Rouen qui m'a également permis d'établir un contact avec Philippe Glé du CEREMA de Strasbourg qui m'a ouvert les portes de son laboratoire pour réaliser les essais acoustiques et ensuite m'apporter tout l'éclairage nécessaire pour l'exploitation et l'interprétation des données. J'ai pu bénéficier d'un appui des responsables du CERMEL et du LaMé pour acquérir le matériel nécessaire à la réalisation d'essais à Tours et de la disponibilité, l'expérience et l'inventivité et la bonne humeur sans faille de Mathieu Venin que je remercie particulièrement.

La plus forte contribution à la partie expérimentale de cette thèse est celle du département génie civil de Polytech Orléans qui a rejoint l'encadrement du projet lors de la deuxième année. Cela m'a permis de bénéficier du matériel présent sur place, de l'appui et de la bonne volonté des stagiaires de Master Wajih, Sami et Nourham qui ont permis de poursuivre certaines expérimentations lorsque ma présence en continue à Orléans n'était pas possible, je leur souhaite de bons débuts dans la vie professionnelle.

Tout au long de ces 3 ans et quelques mois, j'ai eu la chance de bénéficier de toute l'aide dont j'avais besoin administrativement pour traverser sereinement les aléas d'une thèse doctorale, je remercie en particulier Naïma et Anne et, bien sûr, le chef d'orchestre Stéphane Méo qui a su trouver avec une bienveillance sincère les solutions qui s'imposaient pour que mon travail puisse s'effectuer dans les meilleurs conditions et que cette thèse aille jusqu'à son terme malgré les défis à relever.

Ma plus grande reconnaissance enfin va vers Naima Belayachi pour son rôle fondamental à la réussite de cette thèse. Elle a su en effet, me donner l'encadrement technique toujours pertinent dont j'avais besoin, la facilitation

de mes essais, les précieux conseils et relectures lors de la rédaction, ce fut un véritable soulagement de pouvoir bénéficier de son professionnalisme et de sa dévotion, je lui souhaite de recueillir toute la reconnaissance professionnelle qu'elle mérite !

Enfin, si ces 3 ans se sont déroulés dans la sérénité, je le dois beaucoup à mes enfants Odon et Ninel et à mes parents que je sais être présents derrière moi pour m'empêcher de tomber.

Table des matières

Introduction **16**

CHAPITRE I : Contexte général et éléments de bibliographie sur l'emploi de matériaux biosourcés pour l'isolation des bâtiments **21**

1.1 Introduction 21

1.2 Problématiques générales 22

1.2.1 Enjeux environnementaux 22

1.2.2 Impact carbone des rénovations énergétiques 23

1.2.3 Economie circulaire 25

1.2.4 Ecologie industrielle appliquée au secteur du bâtiment 25

1.3 Matériaux de construction dans l'habitat 27

1.3.1 Matériaux et réduction des impacts environnementaux 27

1.3.2 Matériaux biosourcés 29

1.3.3 Matériaux biosourcés et qualité de l'air intérieur 34

1.3.4 Analyse de cycle de vie et impact environnemental 36

1.4 Le projet BIOCOMP 38

1.4.1 Enjeux et contexte 38

1.4.2 BIOCOMP : programme scientifique 45

1.5 Conclusion 46

CHAPITRE II : Caractérisation des matières premières et formulation des biocomposites . **47**

2.1 Introduction 47

2.2 Transformation des végétaux et séparation 48

2.3 Préparation au laboratoire 49

2.4 Terre crue 52

2.4.1 Bac de rétention d'argile 52

2.4.2 Carrière de La Rouchouze 54
2.5 Méthodes de caractérisation des matières premières 55
2.5.1 Caractérisation des granulats 55
2.5.2 Caractérisation de la terre-crue 58
2.6 Résultats et discussion 60
2.6.1 Caractérisation des granulats 60
2.6.2 Caractérisation de la terre-crue 68
2.7 Elaboration des biocomposites 71
2.7.1 Mise en œuvre artisanale 71
2.7.2 Saisonnalité, lutte contre les moisissures 72
2.7.3 Optimisation des proportions et masses volumiques au laboratoire 73
2.7.4 Protocole de fabrication des échantillons au laboratoire 74
2.8 Conclusion 77
CHAPITRE III : Caractérisation thermique, hydrique et mécanique des biocomposites 79
3.1 Introduction 79
3.2 Caractérisation thermique 81
3.2.1 Protocole de caractérisation thermique 81
3.2.2 Influence de la masse volumique. 82
3.2.3 Influence de la teneur en eau et de l'humidité relative 86
3.3 Caractérisation mécanique 87
3.3.1 Protocole de caractérisation mécanique 87
3.3.2 Module de Young et contrainte maximale de compression 87
3.3.3 Influence du sens de compactage sur les caractéristiques mécaniques des bio-composites : 91
3.4 Caractérisation hydrique : courbes de sorption/désorption 94
3.4.1 Courbes de sorption/désorption 94

3.4.2 Absorption capillaire 96

3.5 Influence du silicate d'éthyle et de la chaux sur les propriétés mécaniques des biocomposites 102

3.5.1 Stabilisation à la chaux 102

3.5.2 Stabilisation au silicate d'éthyle 102

3.5.3 Comportement des biocomposites stabilisés 103

3.5.4 La stabilisation de la terre-crue est-elle à rechercher ? 105

3.6 Conclusion 106

CHAPITRE IV : Impact de l'enduit de finition sur le comportement des biocomposites 108

4.1 Introduction 108

4.2 Caractérisation hydrique 109

4.2.1 Mesures de la capacité de tampon hydrique (Moisture Buffer Value - MBV) .. 109

4.2.2 Comparaison des capacités de tampon hydrique 112

4.3 Caractérisation acoustique 121

4.4 Evaluation expérimentale et numérique d'une paroi en tuffeau isolée en terre-colza 130

4.4.1 Caractérisation expérimentale de la résistance thermique de la paroi 130

4.4.1.2 Présentation du dispositif 133

4.4.2 Approche numérique du comportement hygrothermique de la paroi 135

4.4.3 Etude numérique de l'influence de l'enduit sur la durée de séchage de l'isolant biocomposite 140

4.5 Conclusion 144

Conclusion Générale et perspectives 147

Bibliographie 154

Résumé 167

Mots-clés: 169

Abstract 170

Keywords: 171

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Masse volumique des granulats végétaux utilisés (RS, SB, SP)..... 60
Tableau 2-2-2. Masse volumique en vrac et conductivité thermique des granulats végétaux 66
Tableau 2-3. Porosité totale des granulats végétaux 67
Tableau 2-4. Comparaison des proportions granulaires, limites de liquidité et valeurs au bleu de méthylène de terres-allégées avec différents granulats végétaux..... 70
Tableau 2-5. Nomenclature des masses volumiques des mortiers à l'état frais..... 75
Tableau 3-1 . Porosité totale des biocomposites 82
Tableau 3-2. Comparaison de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de différents bétons végétaux issus de la littérature..... 85
Tableau 3-3. Caractéristiques mécaniques des échantillons compactés verticalement et horizontalement..... 93
Tableau 3-4. Coefficient d'absorption capillaire des biocomposites avec et sans additifs... 102
Tableau 4-1. Capacités de tampons hydriques de différents biocomposites..... 114
Tableau 4-2. Porosité intergranulaire des biocomposites évaluée par méthode acoustique . 125
Tableau 4-3. Paramètres insérés dans la base de données de WUFI 138
Tableau 4-4. Durée de séchage de la couche d'isolant selon la composition de l'enduit de finition utilisé 143

Liste des figures

Figure 1-1. Ecologie industrielle appliquée au bâtiment 26
Figure 1-2. Approche intégrée et par implémentation du choix d'un enduit isolant (Corrado et al. 2016) 28
Figure 1-3. Microstructure du béton de chanvre et description des différents types de porosités (Delannoy 2017) 31
Figure 1-4. Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet 2004) 32
Figure 1-5. Andrea Klinge 2016 (Klinge, Roswag-Klinge, et al. 2016) Texture et adsorption de vapeur d'eau des enduits et revêtements composés de terre crue 33
Figure 1-6. Andrea Klinge 2016 (Klinge, Roswag-Klinge, et al. 2016) Texture et adsorption de vapeur d'eau des enduits et revêtements sans terre crue 33
Figure 1-7. Diagramme de Scofield Sterling 35
Figure 1-8. Emission de gaz à effets de serre évité pour un apport d'isolation supplémentaire de R=1,8 à un mur existant de résistance thermique R=2,7 pour une chauffage au gaz © 2015 Third Level Design 40
Figure 2-1. Distribution granulométrique des granulats de tournesol (Chabannes 2012) 50
Figure 2-2. A gauche : mélange moelle-écorce de tournesol grossièrement broyée après passage à l'unité de transformation du GDA Montrésor, au milieu écorce de tournesol après broyage au laboratoire à droite, moelle de tournesol après broyage au laboratoire 50
Figure 2-3. Granulats végétaux broyés : En haut à droite: SB, haut à gauche: SP, bas à droite: RS, bas à gauche: SBP 51
Figure 2-4. Carrière de sable Sograco Marcilly sur Vienne 53
Figure 2-5. Site d'extraction de terre-crue du site de La Rouchouze haut et atelier de broyage (bas gauche) et malaxage mise en forme (bas droite) 55
Figure 2-6. Porosimètre à air du CEREMA de Strasbourg 58
Figure 2-7. Ecorce de tournesol SB, sur la droite, cliché MEB section tangentielle 62
Figure 2-8. Moelle de tournesol SP, sur la droite, cliché MEB section radiale 62
Figure 2-9. Paille de colza RS, cliché MEB moelle (en bas à droite) et paille (haut à droite) 62
Figure 2-10. Evaluation de la taille des pores au MEB : RS section longitudinale (gauche) et SP section radiale (droite) 63

Figure 2-11. Taux d'absorption des granulats végétaux à 10°C (en haut à gauche), 20°C (en haut à droite) et 40°C (en bas) 64
Figure 2-12. Quantité d'eau absorbée par les granulats végétaux à 20°C en fonction du volume de granulats 65
Figure 2-13. Conductivité thermique et masse volumique des granulats 66
Figure 2-14. Relation entre la porosité et la masse volumique des granulats 67
Figure 2-15. Courbe d'analyse granulométrique de la terre-crue de La Rouchouze 68
Figure 2-16. Diffractogramme de rayons X de la terre crue de La Rouchouze 69
Figure 2-17. Mélange terre-colza banché, presbytère de Chédigny (37) 72
Figure 2-18. Préparation des échantillons avec la presse Zwick/Roell Z010 press. A gauche: cylindrique, droite : paralllélépipédique (mesures thermiques) 76
Figure 2-19. A gauche, compactage des échantillons cylindriques, à droite: de gauche à droite échantillons SBD8 et RSD5 76
Figure 3-1. Critères d'étude des matériaux d'isolation biosourcés (Liu et al. 2017) 80
Figure 3-2. A gauche, conductimètre NEOTIM FP2C, à droite, sonde fil chaud placée entre deux échantillons de RSD5 82
Figure 3-3. Conductivité thermique des biocomposites en fonction de leur masse volumique 83
Figure 3-4. Conductivité thermique en fonction de la masse volumique de mélanges terre-végétaux et autres bétons végétaux 86
Figure 3-5. Influence de l'humidité relative (à gauche) et de la quantité d'eau (à droite) présentes dans les échantillons sur leur conductivité thermique 87
Figure 3-6. Module d'élasticité et contrainte maximale de compression en fonction de la masse volumique des mélanges terre-végétaux respectivement à gauche et à droite 88
Figure 3-7. Courbes contraintes/déformations des biocomposites SPD2, RSD5, SBPD5 et SBD8 90
Figure 3-8. Echantillon SBPD5 après rupture (à gauche) et RSD5 sans rupture mais à forte déformation (à droite) 91
Figure 3-9. Moule pour compactage horizontal (RSD5-H) à gauche et vertical (RSD5-V) à droite 92
Figure 3-10. Courbe de la contrainte en fonction de la déformation pour les deux sens de compactage : verticale et horizontal 92

Figure 3-11. Essai de compression sur échantillon RSD5-H à gauche et RSD5-V à droite ... 94
Figure 3-12. Isotherme de sorption/désorption des biocomposites SPD5, RSD5, SBPD5 et SBD8 ... 96
Figure 3-13. Dispositif de l'essai de remontées capillaires ... 98
Figure 3-14. Courbes d'absorption d'eau par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps pour les différents biocomposites (témoins, avec chaux (-L) et silicate d'éthyle (-SE)) ... 99
Figure 3-15. Hauteur atteintes en fin d'essai par les remontés capillaires des biocomposites avec sans additifs ... 100
Figure 3-16. Coefficients d'absorption des différents composites avec et sans additifs ... 101
Figure 3-17. Contrainte maximale des biocomposites avec et sans additifs ... 104
Figure 3-18. Module de Young des biocomposites avec sans additifs ... 105
Figure 4-1. Echantillons de biocomposite avec enduit de finition pour essai MBV avec une face exposée ... 110
Figure 4-2. Echantillons SPD2, SBPD5, RSD5 et SBD8 dans l'enceinte climatique ... 111
Figure 4-3. De gauche à droite: RSD5, SBD8 et SPD2, avec enduit de finition (bas) et sans enduits de finition (haut) ... 111
Figure 4-4. Classement qualitatif des valeurs des capacités de tampon hydrique proposé par Rode et al. (Rode et al. 2007) ... 115
Figure 4-5. Capacités de tampon hydrique (MBV) de différents biocomposites ... 116
Figure 4-6. Capacité de tampon hydrique de différents bétons à base de granulats végétaux en fonction de leur masse volumique ... 117
Figure 4-7. Capacité de tampon hydrique des biocomposites avec et sans enduits de finition ... 119
Figure 4-8. Masse d'eau absorbée et désorbée pour les échantillons RSD5 avec enduit (en haut) et sans enduit (en bas) lors des cycles à 75%HR et 33%HR à 23°C ... 120
Figure 4-9. Présentation d'un tube à impédance (en bas) et de son installation verticale au CEREMA de Strasbourg (en haut) ... 122
Figure 4-10. Coefficients d'absorption α Sabine des composites RSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) selon les faces inférieures (A) ou supérieures (B) ... 126

Figure 4-11. Affaiblissement acoustique TL des composites RSD5 (haut à gauche, SBD8 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) selon les faces inférieures (A) ou supérieures (B) 127
Figure 4-12. Coefficients d'absorption α Sabine des composites avec enduits de finition RSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) 129
Figure 4-13. Affaiblissement acoustique TL des composites avec enduitsRSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) 130
Figure 4-14. Paroi de pierres de tuffeau maçonnées à la chaux 132
Figure 4-15. Enduit isolant de composition RSD5 appliqué sur la paroi en tuffeau avant colmatage des fissures à l'aide de laine bois à gauches et après à droite 133
Figure 4-16. Chambre climatique thermo3 134
Figure 4-17. Paroi disposée dans la chambre climatique 134
Figure 4-18. Paroi multicouche modélisée et conditions aux limites 137
Figure 4-19. Sonde de mesure de température et humidité relative interne à l'isolant RSD5 139
Figure 4-20. Essai avec ΔT=25°C--HR=66% 139
Figure 4-21. Essai avec ΔT=25°C-HR=68% 140
Figure 4-22. Variation de la température et l'humidité relative du climat extérieur en fonction du temps 141
Figure 4-23. Evolution de l'humidité relative au milieu de l'isolant argile+ colza en fonction du temps 142
Figure 4-24. Courbe de sorption de l'isolant RSD5 142
Figure 4-25. Variation de la teneur en eau à l'intérieur de l'isolant biocomposite en fonction du temps 143
Figure 4-26. Facteur de résistance à la diffusion et durée de séchage de différents enduits de finition 144

Introduction

Malgré une industrialisation massive des modes constructifs avec des matériaux de plus en plus performants et l'utilisation des nouvelles technologies dans le domaine de bâtiments, nous assistons ces dernières années au développement d'une nouvelle génération de matériaux à base de ressources végétales renouvelables pour faire face aux problèmes environnementaux. Cette volonté a fortement poussé les ingénieurs, les chercheurs et les pouvoirs publics à organiser une réflexion sur le développement de ces matériaux et plus particulièrement dans le domaine de l'isolation afin de diminuer la consommation énergétique des bâtiments en utilisant des matériaux avec un potentiel isolant très important et un coût économique et environnemental faible.

Ces matériaux sont largement étudiés et même utilisés dans certains cas comme le béton chanvre pour lequel des filières de commercialisation et certification de systèmes constructifs existent. Toutefois, plusieurs questions restent soulevées autour de ces matériaux et suscitent l'intérêt des chercheurs tels que les mécanismes complexes gouvernant leur comportement selon leur mise en place et procédés de fabrication, les conditions d'utilisation des végétaux sans transformation ou encore la durabilité de leur performance face aux conditions d'usage ou sinistres. A cet effet, plusieurs études ont été réalisées, impliquant des dynamiques internationales, nationales ou encore régionales pour financer des programmes de recherches regroupant chercheurs de laboratoires universitaires, des professionnels du bâtiment et des associations militant pour l'utilisation des matériaux locaux pour diminuer l'impact environnemental.

Le projet BIOCOMP (projet financé par la région Centre-Val de Loire) dont cette thèse est issue a pour originalité d'être porté d'une part par les universités de Tours et Orléans et d'autre part par une collectivité du sud de l'Indre et Loire elle-même en contact avec un Groupe de Développement Agricole (GDA) ainsi que par un artisan spécialiste de la mise en œuvre de bétons végétaux. La région Centre-Val de Loire appuie cette initiative dont l'objectif est de faciliter l'émergence d'une filière locale de production d'agromatériaux pour l'isolation des bâtiments dans le soucis de combiner une démarche de réduction de l'empreinte énergétique d'un territoire tout en luttant contre la précarité énergétique et en initiant une activité économique porteuse non délocalisable. Travaillant auparavant en tant que chargé de mission

en éco-construction et éco-matériaux, sur le territoire concerné, j'ai entrepris ce travail de recherche doctorale à l'aube de mes quarante ans convaincu par l'approche proposée dans le montage de ce projet ainsi que par les résultats des travaux réalisés antérieurement sur les bétons végétaux à base de granulats de tournesol (Magniont et al. 2012), (Nozahic & Amziane 2012), (Chabannes et al. 2014). L'objectif de mes travaux de thèse qui s'inscrivent dans le cadre du projet BIOCOMP est l'optimisation de la formulation des matériaux terre crue-végétaux et la rédaction d'un cahier des charges pour la transformation des végétaux locaux ainsi que des règles de mise en œuvre *in situ* pour répondre aux besoins des artisans travaillant sur la rénovation du bâti ancien en sud Touraine. Pour cela, une approche expérimentale basée sur différentes caractérisations au laboratoire à l'échelle de l'échantillon et de la paroi.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons souhaité mettre en avant le caractère original et novateur de ce type de partenariat de recherche en soulignant la pertinence de mettre en place des expérimentations appuyées par un volet de recherches scientifiques à cette échelle de territoire en vue de répondre aux défis de la transition énergétique et écologique appelée par le gouvernement français pour répondre aux enjeux environnementaux globaux. L'impact environnemental justifiant l'emploi d'éco-matériaux locaux dans une démarche de transition écologique est traité dans cette partie en rappelant les nombreux travaux issus de la littérature. La moindre empreinte carbone de ces matériaux n'étant pas un critère suffisant pour justifier leur emploi dans le cadre de rénovations énergétiques de logements, une approche reliant la porosité des bétons végétaux à leurs performances thermiques, hydriques et acoustiques est présentée ici. Les performances de différents biocomposites seront détaillées dans les chapitres suivants, les valeurs de la porosité de ces biocomposites obtenues par porosimétrie à air nous aideront à interpréter les résultats obtenus.

Une des contraintes du projet BIOCOMP est d'utiliser dans la mesure du possible des ressources présentes sur une aire géographique déterminée par le Pays Touraine Côté Sud. Cette contrainte permet d'envisager l'emploi de matières premières innovantes pour l'élaboration d'un matériau biocomposite local. Suivant ce cahier des charges, une gamme de granulats et de liants originaux ont été considérés puis caractérisés, c'est l'objet du deuxième chapitre. Ainsi, les aspects liés à la transformation des coproduits de culture de colza et tournesol retenues sont décrits de même que leur microstructure, porosité, conductivité thermique et leur capacité

d'absorption capillaire afin d'appréhender leur comportement une fois mélangés au liant pour la préparation des biocomposites. Les résultats de la minéralogie et de la granulométrie du liant à base de terre-crue retenu sont également présentés dans cette partie, la connaissance de ces paramètres permettra d'interpréter les performances des mélanges terre-crue:végétaux. Ce chapitre est également l'occasion de s'inspirer des savoir-faire existants sur le territoire pour l'élaboration d'un protocole de mise en œuvre de ces bétons végétaux aboutissant selon les formulations et les granulats utilisés à une gamme de biocomposites de différentes masses volumiques.

En vue de pouvoir comparer ces matériaux aux autres bétons végétaux présentés dans la littérature scientifique et d'évaluer leur positionnement dans le contexte de la réglementation thermique actuelle, les caractéristiques thermiques et leurs dépendances aux variations du taux d'humidité et de la masse volumique des biocomposites ont été étudiées dans le 3ème chapitre. Ce chapitre présente de plus, les caractéristiques-mécaniques en compression ainsi que l'influence de l'ajout d'additifs (chaux et silicate d'éthyle) censés améliorer ces propriétés. (Brahim Mazhoud et al. 2017), (Tiennot et al. 2014). Dans ce chapitre, les capacités de sorption-désorption de différents biocomposites sont par la suite présentées après avoir été déterminées par la méthode gravimétrique des solutions salines. Enfin, la sensibilité des biocomposites aux remontées capillaires revêtant un caractère critique concernant l'utilisation des matériaux à base de terre-crue, celles-ci ont été mesurées et, afin de proposer des solutions pour réduire cette sensibilité, l'influence des additifs sus-cités sur cette capillarité a été testée.

Le 4ème chapitre enfin, traite dans un premier temps de l'influence de l'application d'un enduit de finition en terre-sable – qui est généralement réalisée en pratique – sur les propriétés de régulation hydrique dynamique du biocomposite via la mesure de la capacité de tampon hydrique des matériaux avec et sans enduits de finition. Ce protocole, de plus en plus répandu pour la caractérisation des bétons végétaux, permet de positionner les matériaux réalisés dans cette étude vis-à-vis d'autres biocomposites à base de liant ou granulats identiques. Une seconde partie de ce chapitre est dédiée à l'étude des valeurs d'affaiblissement et d'absorption acoustique et l'influence de l'ajout de la couche de finition sur ces valeurs. Enfin, ce chapitre est l'occasion de comparer les valeurs de résistance thermique relevées sur une paroi expérimentale en pierre de tuffeau représentant le type d'habitat vernaculaire rencontré en

Touraine isolée avec un enduit terre-colza avec les valeurs relevées par simulation numérique avec le logiciel WUFI 2D. Pour terminer ce chapitre, une simulation à l'aide de ce logiciel a pour objet de déterminer l'influence de l'application de différents types d'enduits de finition sur la durée de séchage du composite isolant. L'objectif étant de déterminer l'impact du type d'enduit appliqué sur la durée de séchage du biocomposite ainsi que l'impact de l'application d'une couche de finition sur le biocomposite encore à l'état frais sur son séchage total.

1 Contexte général et éléments de bibliographie sur l'emploi de matériaux biosourcés pour l'isolation des bâtiments

1.1 Introduction

Face à la raréfaction des ressources naturelles (Meadows 1972), au réchauffement climatique et l'augmentation de la consommation d'énergie et de la pollution liée au développement industriel, les enjeux environnementaux deviennent une préoccupation majeure au même titre que les enjeux économiques et sociétaux des activités humaines. Les différents secteurs industriels sont fortement incités à la fois à réduire leur demande en matière première tout en mettant en place des technologies et matériaux permettant de réduire globalement les dépenses énergétiques et les émissions de dioxyde de carbone. Le secteur de la construction est concerné au premier plan par ces préoccupations en étant un très grand consommateur d'une part de matières premières et d'énergie pour la production de matériaux et d'autre part en influant selon les performances énergétique des bâtiments, sur les consommations nécessaires pour les besoins de chauffage et climatisation. Toutefois, le choix des technologies et matériaux permettant d'aboutir à des bâtiments économes en énergie impacte le bilan environnemental des bâtiments isolés et équipés, leur choix doit par conséquent s'effectuer de façon éclairée. En effet, les matériaux utilisés dans le bâtiment se doivent d'être de moins en moins consommateurs de ressources fossiles, également moins énergivores dans leur production tout en assurant des performances techniques permettant de répondre aux prérequis des réglementations thermiques et environnementales de plus en plus exigeantes. Les critères du confort intérieur tant d'un point de vue acoustique que thermo-hygrique sont également de plus en plus exigés par les habitants et concepteurs augmentant ainsi la diversification et la hauteur de performances demandées vis-à-vis des matériaux isolants. Les matériaux issus du recyclage ou de coproduits sont les meilleurs exemples garantissant l'utilisation de ressources renouvelables peu gourmandes en énergie lorsque ces matériaux sont peu transformés. Ces ressources en matière première pour l'élaboration de matériaux isolants étant liées au tissu agro-industriel présent sur chaque territoire, ils entrent dans des démarches d'économie circulaires

spécifiques à chaque bassin d'activité. En suivant ce processus, il apparait pertinent qu'une collectivité locale, ici le Pays Touraine Côté Sud s'associe au secteur de la recherche universitaire en région Centre-Val de Loire pour mettre en place une filière locale de production de matériaux d'isolation à base de résidus agricoles permettant de répondre aux besoins spécifiques de rénovation du type de bâti présent dans son secteur géographique. Ce Chapitre est consacré à la présentation du contexte général et régional du projet dans lequel s'inscrit le travail de la thèse. Une revue de la littérature sur le comportement des matériaux biosourcés y est présentée afin de décrire le lien entre le matériau, ses propriétés et ses performances.

1.2 Problématiques générales

1.2.1 Enjeux environnementaux

Suite à une prise de conscience générale accrue vis-à-vis des défis environnementaux auxquels est confrontée la planète, différents acteurs – économistes, scientifiques, ingénieurs et politiciens – de nombreux pays sont à la recherche de solutions pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. L'engagement a ainsi été pris par 174 pays en 2015 à Paris lors de la vingt et unième session de la Conférence des Parties de réduire drastiquement de façon urgente les émissions de gaz à effet de serre afin de ne pas dépasser les 2°C de réchauffement climatique. Ceci se traduit par un ensemble de mesures et d'actions bien identifiées selon les secteurs d'activités et les zones géographiques concernées. Le secteur du bâtiment, que ce soit pour les phases de construction ou opérationnelles est un secteur connu comme étant responsable d'une des principales sources d'émission de CO_2 de par le monde aussi bien par la production de matériaux de construction que les consommations énergétiques des bâtiments en phase d'exploitation (chauffage, ventilation et climatisation) (United Nations Environment Programme 2009). Afin d'étudier l'impact environnemental d'une construction, les critères de consommations énergétiques ne sont plus les seuls qui prévalent, dorénavant l'énergie grise des bâtiments tout au long de leur cycle de vie est de plus en plus prise en compte. [Un bâtiment est considéré comme absolument durable lorsque son empreinte environnementale annuelle est moindre que sa charge pour la planète (Nykjær et al. 2017)]. L'impact des matériaux de construction devient alors prépondérant de même que le choix de rénover des habitations afin d'en allonger leur durée de vie.

Concernant la France, la priorité a été donnée à la rénovation des bâtiments existants lors du plan stratégique de transition énergétique afin d'alléger les consommations en énergie du

secteur tout en dynamisant l'activité économique (Plan Bâtiment Durable 2015). L'objectif affiché de ce plan est de réduire de 50% les émissions de gaz à effet de serre du secteur de la construction d'ici 2030 et de 87% d'ici 2050. Ceci, entre autres, en effectuant la promotion de bâtiments « bas carbone » tels qu'envisagés par le label $E^{+}C^{-}$ (Ministère et al. 2016). La mise en place de ce label qui préfigure la future réglementation environnementale intégrera la notion de frugalité (bâtiment low-tech) non seulement par rapport aux énergies consommées pendant la durée de vie du bâtiment mais également par rapport à la fabrication et au type dPe matériaux employés. Un label « bâtiment bas carbone Rénovation » a été mis en place à compter du premier semestre 2018, celui-ci vise au minimum une division par 2 des émissions de CO_2 par rapport au bâtiment initial. La démarche initiée par L'association pour le développement du Bâtiment Bas Carbone (BBCA), s'appuie sur la méthode déjà définie pour le bâtiment neuf et reprend ses 4 indicateurs : construction raisonnée ; exploitation maîtrisée ; stockage carbone ; économie circulaire. Elle combine l'amélioration du bâti et l'optimisation de la performance énergétique et valorise la conservation de l'existant, l'amortissement des matériaux, le réemploi et le recours aux matériaux biosourcés stockeurs de carbone.

Une autre problématique, la raréfaction des ressources naturelles risque de devenir critique, le secteur de la construction utilisateur de matières tel que le sable, les granulats et des matériaux issus du pétrole, étant concerné au premier plan. L'utilisation de matériaux issus de ressources agricoles renouvelables, peu transformées, recyclables et disponibles localement pourra apporter une réponse pertinente aux défis en cours et à venir.

1.2.2 Impact carbone des rénovations énergétiques

La mise en place d'actions ambitieuses de lutte contre le changement climatique affecte le secteur de la construction et de l'habitat, ce secteur étant responsable d'1/3 des émissions totales de gaz à effets de serre selon l'Agence Internationale de l'Energie (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2013). En France, les actions en faveur de la rénovation énergétique des bâtiments ont été identifiées comme ayant le plus fort impact en termes de limitation de gaz à effets de serre. En ce sens, la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable pour 2015-2020 a engendré un plan de rénovation énergétique de l'habitat prévoyant la rénovation énergétique de 500 000 logements par an afin de contribuer à réduire de 38 % la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment à l'horizon 2020 (MEDDE 2014). Dans

ce cadre, a été lancé, entre autres, le plan de rénovation énergétique de l'habitat, dont le dispositif « J'éco-rénove, j'économise » est opérationnel depuis septembre 2013.

A titre d'exemple, afin de disposer d'un ensemble de données concernant les différents impacts environnementaux des projets de rénovation énergétique, la région Alsace a mené une étude d'impact sur 500 projets de rénovations énergétiques performantes, le programme « je rénove BBC (JRBBC) » en partenariat avec EDF et le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) (Transition & Solidaire 2017). Le label bâtiment bas carbone (BBC) correspondant aux prérequis de performance énergétique imposés aux constructions neuves par la réglementation thermique 2012. Dans le programme JRBBC, une empreinte totale de 951 tonnes équivalent CO_2, soit 8,6t par chantier de rénovation en moyenne a été relevée. Rapporté à la surface habitable moyenne des maisons étudiées (145 m²), le taux d'émission des travaux de rénovation énergétique est d'environ 60 kg eqCO_2/m².
En décomposant cette empreinte, il apparaît que la plus grande part des émissions de gaz à effet de serre est liée aux matériaux et produits de construction qui représentent les deux tiers des émissions totales de dioxyde de carbone. En décomposant à nouveau la part des matériaux, il apparaît que les lots les plus émissifs sont ceux des travaux de l'enveloppe (murs, combles, planchers) avec près de 75 % de l'empreinte carbone des matériaux. Un classement qui est expliqué en grande partie par la quantité de matériaux isolants utilisée et par l'importance des surfaces d'enveloppe à traiter, pour ce qui constituait par ailleurs la priorité du programme JRBBC. Enfin, concernant les matériaux d'isolation, l'impact carbone varie selon les matériaux choisis. Ouate de cellulose, laine de verre ou complexe ouate-fibre de bois présentent les taux d'émission de CO_2 les plus faibles (Transition & Solidaire 2017). Afin de pondérer l'empreinte environnementale générée lors des travaux, le CEREMA a estimé la durée au bout de laquelle cette empreinte sera effacée par les gains annuels de gaz à effets de serres évités. Une opération de rénovation énergétique générant en moyenne 8,6 tonnes de CO_2 et le gain étant de 10 tonnes de CO_2 épargnés par an, la compensation de l'impact environnemental des travaux de rénovation intervient après 10 mois d'exploitation des habitations. Les auteurs de l'étude concluent ainsi que: "*La démarche de rénovation énergétique apparaît donc très pertinente du point de vue du bilan carbone global. Malgré une phase de chantier émettrice de gaz à effet de serre, la réduction des consommations énergétiques dues à la rénovation compense très rapidement les émissions occasionnées*".

1.2.3 Economie circulaire

Depuis une dizaine d'années, le concept d'économie circulaire se diffuse de plus en plus tant au niveau des différents secteurs industriels qu'institutionnel, l'Union Européenne ayant mis en place une initiative dédiée : le « European Union Action Plan for the Circular Economy ». Cette démarche promeut une approche de l'économie circulaire prenant en compte le cycle de vie de l'intégralité d'un produit. Ce modèle alternatif favorise la réutilisation, la réparation, la rénovation, le recyclage, la récupération des matériaux brut ainsi que la valorisation des déchets et co-produits (EUROPEAN COMMISSION 2015). L'économie circulaire privilégie autant que possible l'utilisation de matériaux renouvelables (Ghisellini et al. 2016) ainsi, l'emploi de matière première à base de co-produits de végétaux à croissance annuelle participe à la mise en place d'un système d'économie circulaire sur un territoire.

L'économie circulaire peut-être déclinée en 7 approches :

1. L'écoconception
2. L'écologie industrielle
3. L'économie de fonctionnalité
4. Le réemploi
5. La réparation
6. La réutilisation
7. Le recyclage

1.2.4 Ecologie industrielle appliquée au secteur du bâtiment

L'écologie industrielle implique l'inclusion des activités humaines dans une approche systémique liée à un territoire. Mettre en place un écosystème industriel à l'échelle d'un territoire implique la durabilité et la résilience d'un mode de fonctionnement, notamment, l'absence de génération de déchets. Ceci est possible lorsque les acteurs industriels travaillent en synergie, les déchets d'une activité devenant les matières premières de la suivante (Figure 1-1).

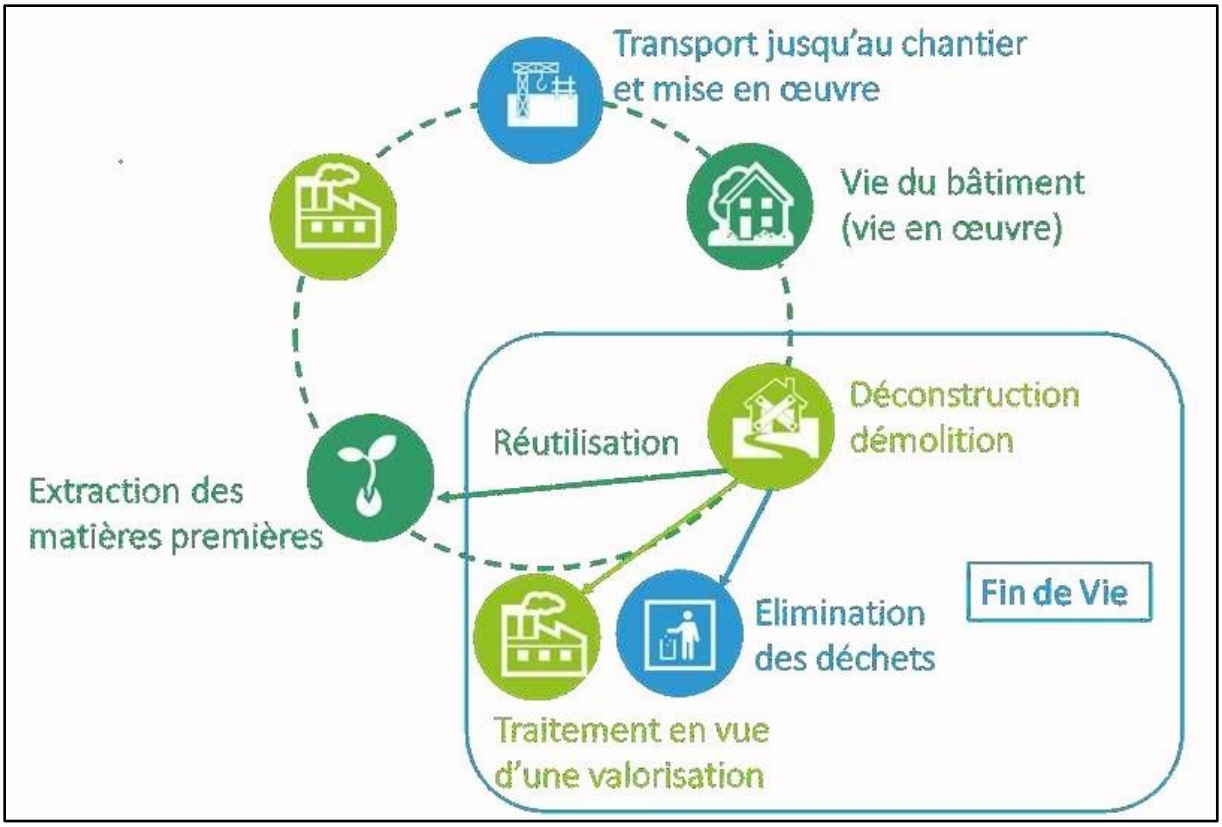


Figure 1-1. Ecologie industrielle appliquée au bâtiment

Pour ce faire, l'écologie industrielle se base sur quatre principes directeurs :

- Boucler : rendre les flux de matière, eau et énergie quasi cycliques
- Etanchéifier : minimiser les pertes par dissipation
- Intensifier : dématérialiser l'économie
- Alléger : décarboner, dé-azoter, …

Afin d'appliquer les principes de l'écologie industrielle au bâti, il convient d'appréhender le bâtiment comme un écosystème. Par le choix et la mise en œuvre du procédé constructif, la construction ou rénovation d'un bâtiment doit viser :

- Une utilisation rationnelle des ressources et matériaux.
- La prévention de déchets
- Une flexibilité poussée, anticipant les transformations ultérieures du bâtiment
- Le démontage et le recyclage/réemploi d'éléments et matériaux de construction en fin de vie : Concevoir pour déconstruire et non pour démolir.
- Un choix écologique des matériaux de construction

- Limiter la production de polluants, nocifs pour l'environnement, et réduire la consommation d'énergie lors de la production des matériaux, de leur transport et de leur mise en oeuvre

La mise en place d'une filière locale de matériaux ayant un impact environnemental positif (puits de carbone) et facilement recyclables voire réutilisables s'intègre parfaitement dans la mise en place de ces objectifs.

1.3 Matériaux de construction dans l'habitat

L'homme passe une partie de plus en plus importante de son temps à l'intérieur de bâtiments que cela soit son lieu de travail ou son logement. La notion de confort, notamment thermique devient donc prépondérante par rapport à celle de simple protection face aux intempéries. Cette fonction de confort thermique passe par le maintien d'une température stable selon les saisons et différente selon les pièces du logement. Ceci passe par une isolation performante des lieux de vie. De nos jours, suite à la considération du coût environnemental et économique des différents modes de chauffage, on observe une demande en matériaux d'isolation en constante augmentation poussée par les réglementations thermiques successives.
En France, les matériaux d'isolation actuels utilisés en construction neuve et rénovation sont principalement d'origine minérale (laine de verre et de roche) et pétrochimique (polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane,…). Toutefois, la part des isolants d'origine naturelle augmente d'année en année et s'insère totalement dans les logiques d'habitat vernaculaire. Le marché des isolants biosourcés représente 8% du marché total de l'isolation selon l'Association Syndicale des Industriels de l'Isolation Végétale (ASIV) avec une croissance de 40% entre 2012 et 2016. La définition du terme biosourcé sur laquelle se base aujourd'hui les travaux pilotés par le ministère de la transition écologique et solidaire est la suivante: «matériaux et produits dont une partie des matières premières sont issues du monde du vivant (biomasse végétale et animale incluant les matières recyclées) ».

1.3.1 Matériaux et réduction des impacts environnementaux

La consommation d'énergie d'un bâtiment dépend fortement des caractéristiques de son enveloppe. Une isolation thermique optimale des murs extérieurs avec le matériau adéquat, la bonne épaisseur et sa mise en place correcte permet de diminuer la consommation d'énergie pour le chauffage et le rafraichissement du bâtiment. Parmi les autres critères à prendre en

compte pour le choix du matériau d'isolation selon Schiavoni (Schiavoni et al. 2016), l'isolation acoustique, la résistance au feu, la perméabilité à la vapeur d'eau ainsi que son impact sur l'environnement et la santé humaine.

Plus spécifiquement, Carbonaro et al (Corrado et al. 2016) ont effectué une analyse multicritères comparative d'un projet de rénovation de bâtiment avec des enduits à base de végétaux. Selon les auteurs, la prise en compte des aspects environnementaux lors d'une comparaison entre différents matériaux d'isolation permet de rendre plus compétitifs les matériaux d'origine biosourcée qui auraient autrement été disqualifiés au regard de leurs performances thermiques moindre que d'autres produits d'origines minérale ou pétrochimique (Figure 1-2). La différence se comblant lorsque l'on considère l'énergie grise d'un kg de matériau lors de son analyse de cycle de vie globale.

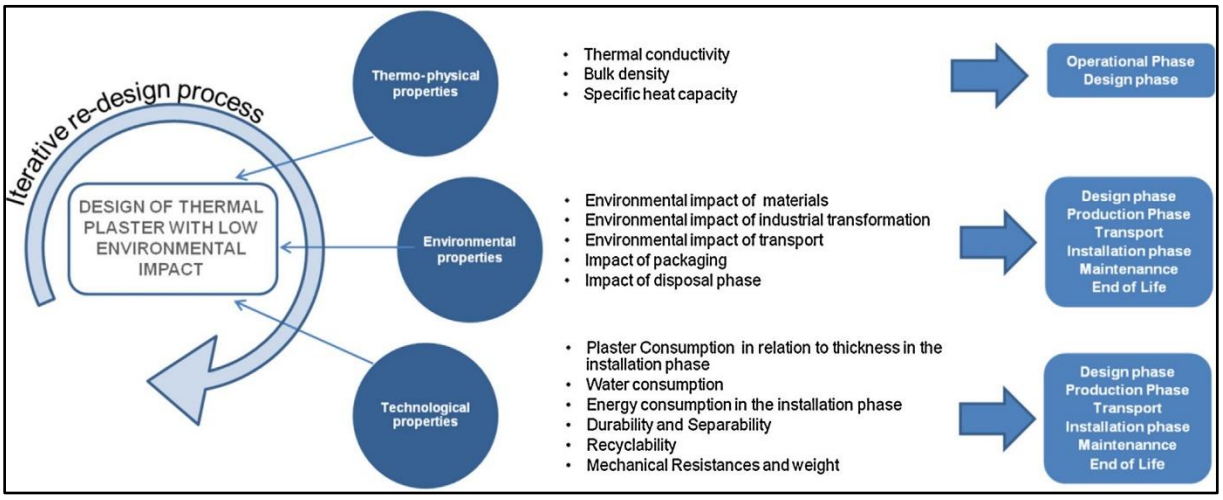


Figure 1-2. Approche intégrée et par implémentation du choix d'un enduit isolant (Corrado et al. 2016)

Dans le cas de l'utilisation de terre crue ou de pierres dans la construction d'habitats, Morel et al (Morel et al. 2001) ont pu établir que la mise en œuvre de ces matériaux à vocation structurelle lorsqu'ils sont issus de filières locales, permet de réduire drastiquement l'impact environnemental des constructions en comparaison avec des constructions utilisant des matériaux à base de ciment ou de terre cuite. Leur étude menée dans le sud de la France permet d'aboutir, en considérant le cas de figure concerné, que l'énergie utilisée pour la construction du bâtiment a été réduite de 215% avec en particulier une réduction liée à l'impact du transport de 453% (Morel et al. 2001). Les auteurs pointent également la nécessité pour un projet voulant suivre cette voie de commencer par une analyse approfondie des matériaux disponibles sur le

territoire ainsi que la nécessaire sensibilisation et formation des professionnels du secteur de la construction (architectes, ingénieurs et artisans).

1.3.2 Matériaux biosourcés

Les matériaux d'isolation biosourcés permettent d'assurer des bénéfices à la fois environnementaux et économiques lorsque les épaisseurs sont optimisées tel que cela a pu être montré par Sagbansua et Adamczyk en Turquie et en Pologne (Sagbansua & Balo 2017), (Adamczyk & Dylewski 2017).

L'impact environnemental positif de ces matériaux concernant le critère de lutte contre le réchauffement climatique est dû à la prise en compte du carbone biogénique stocké par les végétaux (Sierra-Pérez et al. 2015). Ce carbone biogénique correspond au CO_2 atmosphérique absorbé durant la photosynthèse des matériaux issus de végétaux. Ce CO_2 est considéré comme étant « séquestré » à l'intérieur du matériau durant la totalité de sa durée de vie ce qui autorise à le déduire de son empreinte carbone. Selon les végétaux utilisés, le CO_2 a été soustrait de l'atmosphère dans les 12 mois (selon l'année de récolte) pour les cultures annuelles (paille, chanvre, tournesol, colza,…) ou bien dans les 5 à 50 ans pour le bois utilisé dans les ossatures ou fibres isolantes.

Les matériaux comme le charbon ou le calcaire ont également « séquestré » du CO_2 mais à des périodes (plus de 200 millions d'années) ne concernant pas la crise environnementale actuelle comme le mentionne Lawrence (Lawrence 2015). Cette notion se révèle importante lorsque les matériaux issus de végétaux remplacent d'autres matériaux générateurs de gaz à effets de serre. Dans cet ordre d'idées, une étude concernant une construction à base de chaux-chanvre (Lawrence 2015) a permis de calculer qu'une ossature bois avec remplissage chaux-chanvre génère une empreinte carbone de -35,5 kg de CO_2 équivalent c'est-à-dire que le CO_2 équivalent « séquestré » par $1m^2$ de mur est de 35,5 kg plus important que l'énergie grise de la construction (matériaux, transport, énergie,…). Comparativement, un mur en brique au Royaume-Unis génère +110kg CO_2 équivalent.

Il convient de prendre en compte outre les aspects liés au transport, l'impact environnemental lié à la transformation de certains matériaux biosourcés, celui-ci pouvant ternir le bilan environnemental d'un matériau d'isolation et le rendre négatif comme cela peut être le cas pour des panneaux de liège expansé issus d'un processus de transformation énergivore (Schiavoni et al. 2016).

Si la forte porosité de ces matériaux permet d'obtenir des propriétés thermo-hygroscopiques intéressantes, il en va différemment des propriétés mécaniques en compression, avec une faible masse volumique engendrée par les granulats végétaux (de l'ordre de 400kg/m^3 pour un béton de chaux-chanvre de formulation « mur ») devient un handicap. Lorsqu'on compare cette masse volumique avec celle d'un béton à base de ciment classique dit de Portland comprise entre 2000 et 2600 kg/m^3, on en déduit que les applications structurelles ne sont donc pas envisageables à l'heure actuelle avec ce genre de matériaux.

1.3.2.1 Porosité et conductivité thermique

Toutes les matières dites solides sont poreuses, leur porosité allant de moins de 10% pour les métaux à plus de 99% pour des mousses ou des matériaux fibreux. On distingue cependant différentes catégories de porosités au sein d'un même matériau (Glé 2014) :

- la porosité "occluse" caractérise le volume des pores du matériau ne communiquant pas avec l'extérieur,
- la porosité dite "ouverte" ou "connectée" caractérise le volume des pores qui sont ouverts sur l'extérieur,
- la porosité "totale" est la somme des deux porosités précédentes.

Les pores rencontrés dans les matériaux d'origine végétale sont en général ouverts, surtout pour ce qui concerne les tissus organiques de faible densité situés à l'intérieur des tiges. Cette composante du végétal a pour fonction d'alimenter en nutriments les différentes parties de la plante, la sève doit donc pouvoir remplir les cavités creuses et circuler entre celles-ci.

La présence de porosités dans un matériau impacte fortement sa conductivité thermique. Tout d'abord, les pores réduisent la surface de section à travers laquelle la chaleur peut être transportée par les phonons. La diminution de la conductivité thermique dépend donc non seulement de la fraction volumique des pores p mais aussi de leurs dimensions et de leur distribution spatiale. Lorsque les pores sont suffisamment volumineux et interconnectés, les phénomènes de convection deviennent significatifs tels que décrits par Cérézo (Cerezo 2005). La plus forte diminution de la conductivité thermique intervient lorsque les pores occlus ont la

forme de galettes aplaties dans le sens perpendiculaire au gradient de température (Clarke 2003).

Les différents types de porosités décrits par Etienne Gourlay (Gourlay 2013) et Figure 1-3 sont rencontrés dans les bétons végétaux que ce soit pour les matériaux dont le liant est à base de terre crue ou à base de chaux dans les bétons de chaux-chanvre. On distingue tout d'abord les réseaux de porosités ouvertes qui participent aux phénomènes d'absorption hydrique et acoustique et la porosité fermée agissant sur la conductivité thermique des matériaux isolants.

La définition des pores pour ce type de matériau, en prenant pour exemple les bétons de chanvre est différente de celle de l'IUPAC et décrit:

- des macropores (plusieurs mm de diamètre) dus à l'agencement imparfait des granulats végétaux dans le mélange ;
- des mésopores (de 0,1 mm à 1 mm) au sein des particules et du liant ;
- des micropores inter-granulats (inférieurs à 0,01 µm) dans la matrice du liant ;

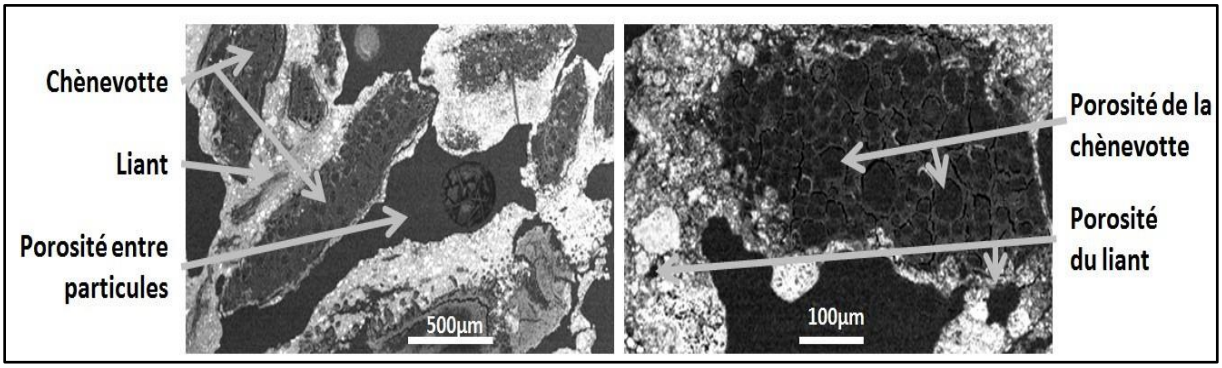


Figure 1-3. Microstructure du béton de chanvre et description des différents types de porosités (Delannoy 2017)

La porosité totale des bétons de chanvre pour une formulation de type mur se situe entre 70 et 80% (Glé 2014). L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique apportée par la forte porosité des bétons végétaux a pour revers de la médaille de diminuer leurs performances mécaniques, ces dernières ne doivent toutefois pas chuter en deçà de certaines valeurs compromettant la tenue des isolants sous leur propre poids.

Les enduits terre-végétaux échangent de fortes quantités d'humidité avec l'air ambiant, les phénomènes d'adsorption physique qui se produisent au sein de ces matériaux peuvent ainsi modifier sensiblement leurs conductivités thermiques puisque l'air contenu dans ses pores, qui a une conductivité thermique extrêmement faible (λ_{air} = 0,026 W/m^{-1}.K^{-1}), est

partiellement remplacé par de l'eau dont la conductivité thermique (λ_{eau} = 0,600 W/m^{-1}.K^{-1}) va augmenter celle du composite en proportion.

1.3.2.2 Porosité et transferts hydriques

Les pores des matériaux issus du parenchyme des tiges des végétaux sont interconnectés. Cette porosité ouverte, une fois le végétal réduit sous forme de granulat, favorise les échanges de vapeur d'eau avec l'air ambiant par adsorption physique ou désorption selon que l'humidité de l'air environnant augmente ou diminue (Collet 2004).

L'adsorption physique peut être décomposée en trois phases distinctes traduisant le comportement du matériau à l'échelle microscopique. Ces trois étapes sont schématisées sur la Figure 1-4.

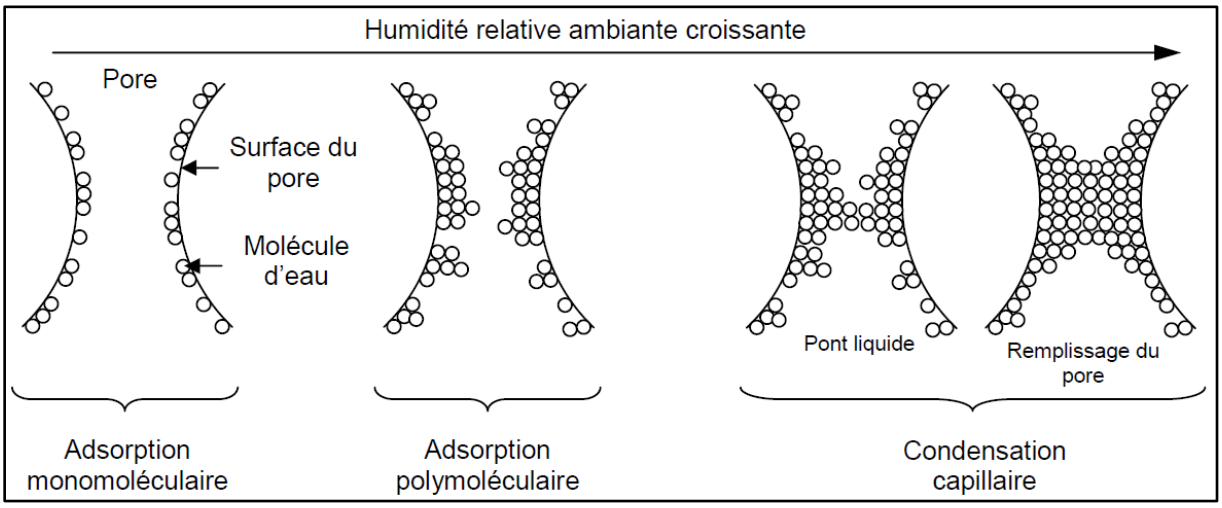


Figure 1-4. Représentation schématique des phénomènes d'adsorption physique dans un pore (Collet 2004)

Tout d'abord, lors de l'adsorption monomoléculaire, les molécules d'eau sous forme liquide recouvrent en une couche de l'épaisseur d'une molécule la surface des pores où elles sont retenues sous l'effet des forces de Van der Waals. Ensuite, lorsque l'humidité relative de l'air environnant augmente, d'autres couches de molécules d'eau viennent se fixer à la première engendrant le passage d'une adsorption monomoléculaire à une adsorption poly-moléculaire.

Aux taux d'humidité relative les plus élevés, les couches polymoléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. L'eau est maintenue à la surface des pores par les forces capillaires, ce qui entraîne le remplissage des pores les plus fins puis des pores plus gros entrainant un phénomène de condensation capillaire.

Les enduits en terre crue sont connus pour développer une forte capacité à réguler l'humidité ambiante comparés aux enduits conventionnels. Cette capacité s'explique par l'hydrophilie des plaquettes d'argile qui adsorbent à leur tour les molécules d'eau présentes dans les pores entrainant un assèchement des pores permettant de retarder leur saturation capillaire (Figures 1-5 et 1-6).

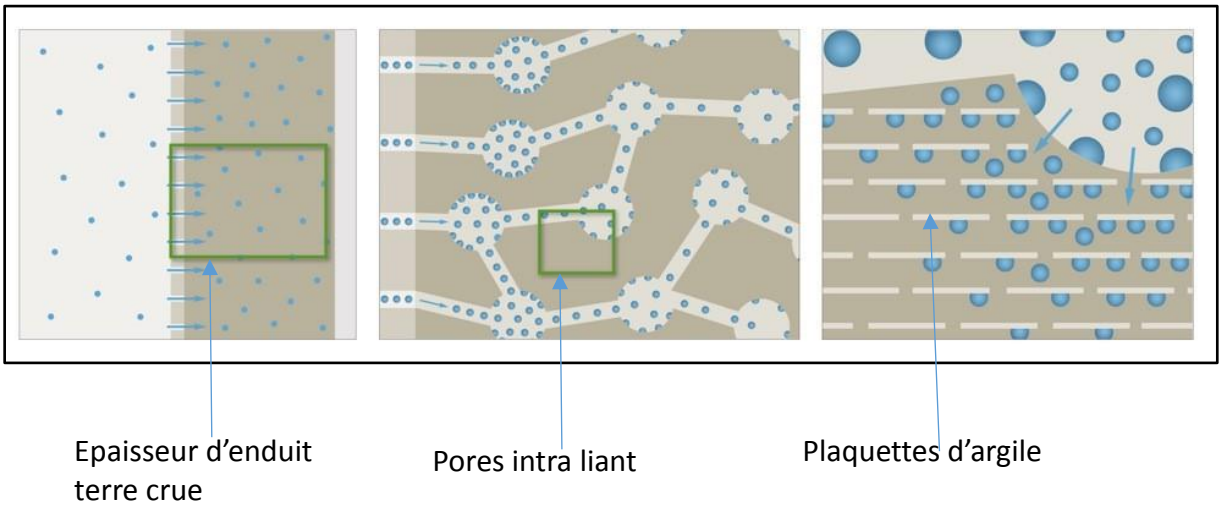


Figure 1-5. Andrea Klinge 2016 (Klinge, Roswag-Klinge, et al. 2016) Texture et adsorption de vapeur d'eau des enduits et revêtements composés de terre crue

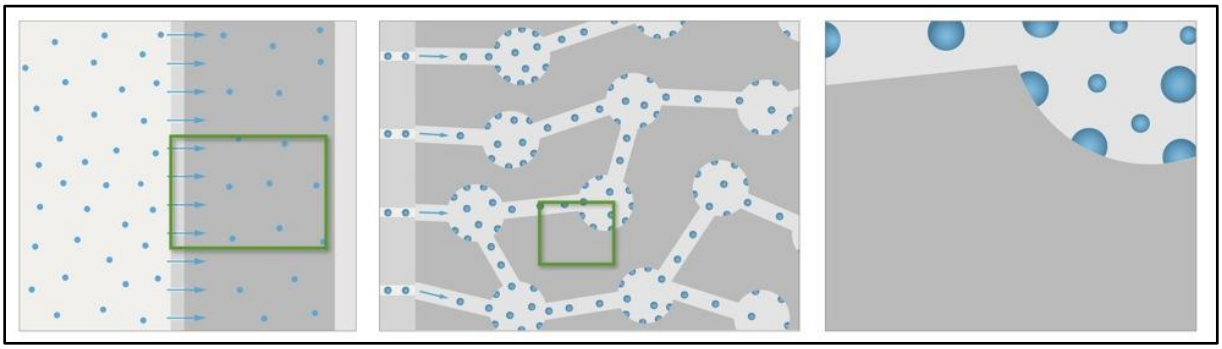


Figure 1-6. Andrea Klinge 2016 (Klinge, Roswag-Klinge, et al. 2016) Texture et adsorption de vapeur d'eau des enduits et revêtements sans terre crue

1.3.2.3 Porosité et absorption acoustique

Les matériaux absorbants acoustiques poreux développent également des propriétés d'isolation thermique mais l'inverse n'est pas forcément vrai car pour qu'un matériau poreux développe des propriétés d'absorption acoustique, les cellules de celui-ci doivent communiquer entre-elles. En effet, lorsque l'onde sonore pénètre à l'intérieur du matériau, elle y engendre des

frottements, des déplacements de fibres légères et parois souples, entrainant une transformation d'énergie et un amortissement de l'onde acoustique. La porosité doit donc être de type ouverte. Un critère additionnel permettant d'engendrer une isolation acoustique étant que les connexions entre les pores doivent être suffisamment larges. Les principales porosités agissant sur les propriétés acoustiques sont les porosités inter-granulaire, les connexions entre les cellules végétales de l'ordre de quelques micromètres se révèlent trop étroites pour dissiper et amortir les ondes sonores comme cela a pu être observé sur les granulats de chanvre (Glé et al. 2012), (Degrave-lemeurs et al. 2018). La forte perméabilité engendrée par la présence d'un réseau poreux de grande dimension et interconnecté va ainsi engendrer une limitation de la réflexion des ondes incidentes, à plus forte raison si leur état de surface est non homogène. Toutefois, ce type de matériau ne va pas permettre d'amortir efficacement les ondes acoustiques qui traverseront les parois.

Les capacités d'absorption acoustique des matériaux poreux dépendent également des gammes de fréquences émises. En effet, le coefficient d'absorption augmente avec la fréquence, il est faible aux basses fréquences, et fort aux fréquences élevées. De même, l'absorption aux fréquences basses est d'autant plus importante que l'épaisseur du matériau est importante et que ses pores ou cavités sont grandes (Glé 2014).

1.3.3 Matériaux biosourcés et qualité de l'air intérieur

1.3.3.1 Problématique liée aux bâtiments

La qualité de l'air intérieur est un critère souvent pris en compte dans la conception et l'évaluation des bâtiments, notamment pour ceux destinés au secteur de la petite enfance. Ceci parait pertinent lorsque l'on considère que l'air intérieur est de 2 à 5 fois plus pollué que l'air extérieur. L'air intérieur est celui que l'on respire dans l'environnement intérieur non industriel (habitat, écoles, lieux publics, bureaux et moyens de transports). Ces environnements dans lesquels nous passons 80 % de notre temps, se retrouvent pollués par des polluants extérieurs, ou « *de proximité* » (émanations de la rue, du sous-sol), des polluants provenant du bâtiment lui-même (ameublement, matériaux de construction, de décoration…), et nos propres activités (produits d'entretien, encens, tabagisme…). En France, la Commission d'Orientation du Plan National Santé Environnement 2004 (PNSE) a reconnu la qualité de l'air intérieur comme l'une des priorités nationales. Elle recommande de « prévenir les risques liés aux expositions dans

l'habitat et les autres bâtiments recevant du public". En 2009 le Grenelle de l'environnement s'était engagé sur deux points cruciaux pour améliorer la qualité de l'air intérieur : l'étiquetage des matériaux de construction et de décoration (rendu obligatoire en septembre 2013), et la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les Etablissements Recevant du Public (ERP). Depuis 2013, la qualité de l'air intérieur fait désormais partie des priorités de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

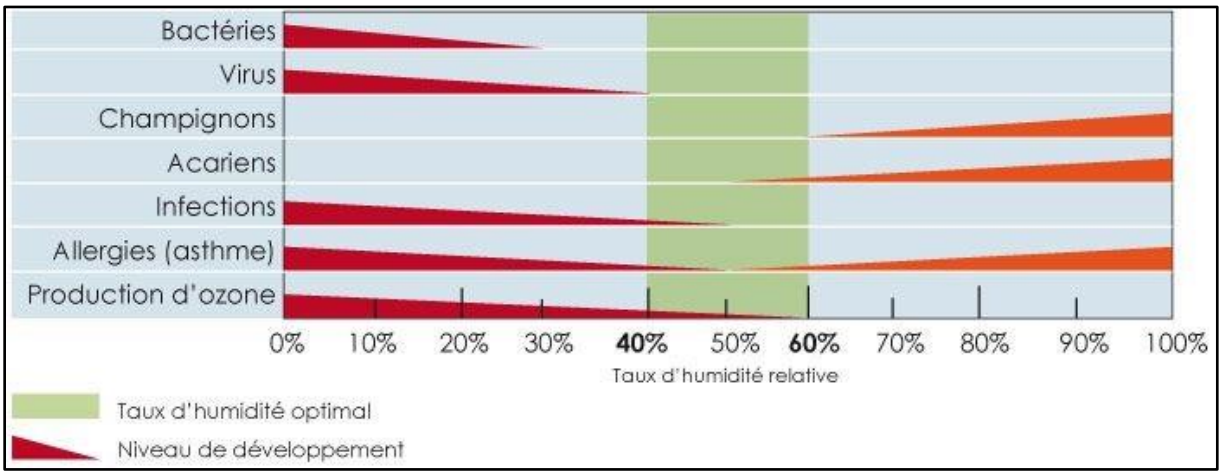


Figure 1-7. Diagramme de Scofield Sterling

Ces aspects se révèlent d'autant plus critiques lorsque l'on considère que l'étanchéité à l'air est mise en avant tant dans les projets de constructions à basse énergie que les rénovations énergétiques du bâti. Un air intérieur confiné va avoir tendance à fortement augmenter les effets négatifs sur la santé humaine par une pollution intérieure excessive liée à des niveaux élevés de composés organo-volatils (COV) et d'humidités relatives favorisant la prolifération d'éléments pathogènes (Figure 1-7). De même, malgré le déploiement de systèmes de ventilation mécanique contrôlée, la tendance de diminuer le taux de renouvellement de l'air intérieur pour minimiser les déperditions thermiques engendre des problèmes de condensations et de moisissures. Les systèmes de VMC ayant pour objet de remplir les objectifs suivants :

- Réduction de l'humidité intérieure en hiver afin de limiter la formation de condensation et de moisissures.
- Réduction des polluants atmosphériques intérieurs
- Réduction des niveaux de CO_2 à l'intérieur des pièces.

De plus, un entretien irrégulier des systèmes de VMC au niveau des gaines ajoute un risque de développement d'éléments pathogènes à l'intérieur de la maison. Les systèmes perfectionnés de VMC double-flux apportent un surcoût écologique et économique non négligeable et les

bénéfices tant environnementaux qu'économiques de ce type de systèmes perfectionnés ne sont pas assurés. L'idée de mettre en place en complément de la ventilation un système passif d'amélioration de la qualité de l'air intérieur lié aux matériaux d'isolation et de parement mis en œuvre parait donc pertinente.

1.3.3.2 Rôle des matériaux dans l'amélioration de la qualité de l'air intérieur

Les matériaux à l'intérieur des habitations contribuent à la mauvaise qualité de l'air mais peuvent *a contrario* agir comme des puits pour capter les polluants aériens et l'excès d'humidité via leur capacité d'absorption. Certains matériaux tels que des panneaux de fibres ont été spécifiquement étudiés dans cette optique (Silva et al. 2017). Les matériaux naturels utilisés dans la construction tels que le bois, les fibres végétales et la terre ont en la capacité d'absorber et de réémettre l'humidité et les polluants intérieurs permettant de réguler les pics de pollution et d'humidité. D'autres matériaux tels que les mortiers de chaux ou la laine de mouton développent cet effet de puits en possédant la capacité d'absorber les formaldéhydes et les COVs sans les réémettre. Ils permettent ainsi d'obtenir une amélioration passive de la qualité de l'air intérieur (Florbela & Silva 2016). Ces mêmes propriétés ont été étudiées pour des enduits à base de terre crue dont les propriétés hygroscopiques ont été améliorées par l'ajout de fibres végétales ou d'aérogels (Klinge, Architekten, et al. 2016). Les auteurs proposant même la possibilité d'utiliser ces matériaux couplés à une ventilation naturelle comme alternative aux ventilations mécaniques contrôlées (VMC), Andrea Klinge et al. (Klinge, Fontana, et al. 2016) considèrent ainsi qu'il est possible de concevoir des intérieurs confortables avec une bonne qualité sanitaire d'air intérieur et un niveau d'humidité relative stable moyennant l'utilisation de matériaux naturels peu émissifs, une enveloppe du bâtiment perméable à la vapeur d'eau et un nombre adéquat d'ouvertures. L'emploi de ce type de matériau va donc au-devant de préoccupations grandissantes pour la conception et la construction des bâtiments.

1.3.4 Analyse de cycle de vie et impact environnemental

1.3.4.1 Analyse de cycle de vie des agro-matériaux

L'estimation de l'impact des bâtiments sur le climat en utilisant l'approche par analyse de cycle de vie (ACV), conduit à constater que ceux qui contiennent de grandes quantités de matériaux biosourcés génèrent moins d'impact (Peñaloza et al. 2016). Les résultats de cette étude apportent un argumentaire en faveur de ces matériaux et de leur développement en général.

Toutefois, la séquestration biogénique du CO_2 et l'impact sur le milieu naturel diffèrent selon le type de matériau végétal employé. En effet, en détaillant les scénarios d'analyse de cycle de vie, l'utilisation du bois en construction a un impact positif minoré par rapport à des végétaux à cycle court. Ceci est dû au temps de régénération du bois en forêt qui est similaire voire supérieur à la durée de vie des bâtiments (Peñaloza et al. 2016). A contrario, les plantes à cycle annuel comme le colza, le tournesol, le chanvre ou la paille mobilisent les surfaces agricoles sur une durée nettement plus faible que pour les productions forestières, ainsi, en prenant une durée égale d'une cinquantaine d'année sur une surface égale, la séquestration de carbone et la quantité de matériau utilisable sera bien supérieure pour ces cultures que pour les arbres d'une forêt (Peñaloza et al. 2016). De plus ne s'agissant pas de cultures dédiées, mais de coproduits végétaux, leur utilisation dans la construction est encore plus vertueuse d'un point de vue environnemental tout en permettant d'apporter une plus-value économique à l'agriculteur sur une production à vocation alimentaire.

1.3.4.2 Analyse de cycle de vie des enduits

Les méthodologies d'analyse de cycle de vie ont été utilisées par Melià et al (Melià et al. 2014) lors d'une comparaison des impacts environnementaux entre des enduits en terre crue et des enduits à base de ciment et d'argile. Etant donné que l'impact environnemental le plus important des enduits est dû à la consommation d'énergie nécessaire à leur production, la terre crue non transformée surpasse les enduits conventionnels nécessitant une cuisson à haute température sur les différents indicateurs médians (demande d'énergie cumulée, protocole de gaz à effets de serre, empreinte écologique) et ultimes (selon la méthode ReCiPe). En effet, lorsque cette énergie nécessaire est issue de sources fossiles, elle impacte négativement de 63 à 85% le bilan environnemental (Melià et al. 2014). L'impact négatif le plus important provenant des émissions de CO_2 dues au processus de calcination lors de la fabrication du ciment. Concernant la terre crue, l'impact le plus élevé est lié à son transport d'où l'intérêt de disposer de sources locales d'approvisionnement. Dans cet ordre d'idée, il est à noter que l'emploi de pigments colorés utilisés pour le rendu esthétique des enduits de finition peut annuler le bénéfice environnemental de l'emploi de la terre crue lorsque ces pigments proviennent de carrières éloignées du chantier (Melià et al. 2014).

L'utilisation de fibres végétales pour des productions autres qu'alimentaires impacte de façon négative l'indice de bilan environnemental lié à l'occupation de terres agricoles. Cependant, s'agissant de coproduits végétaux et non de cultures dédiées à la production de matériaux, ces

impacts deviennent négligeables en termes de conséquences sur l'environnement et la santé humaine. Il convient également de constater que les coproduits végétaux ont généralement pour vocation de servir d'amendement sur les parcelles de culture permettant un apport en azote, phosphore, potassium et en matière organique. Cette vocation est moins prégnante pour le tournesol dont la moelle présente peu d'intérêts en terme d'amendement en revanche, concernant le colza, le taux de prélèvement de la paille permettant de ne pas diminuer significativement la fertilité des sols est de 1 pour 6 (Théophile & Sacher 2017). Le choix des matériaux est par conséquent fortement dépendant du territoire sur lequel une filière de construction durable se mettra en place.

1.4 Le projet BIOCOMP

1.4.1 Enjeux et contexte

1.4.1.1 Résilience des territoires

La déclinaison au niveau local des enjeux environnementaux concernant les différents secteurs d'activités (bâtiment, transports,…) induit une nouvelle économie décrite par Jean Ollivro (Ollivro 2012), plaidant pour une nouvelle approche du développement économique et social des territoires qui se construit avec l'équation: « globale + locale = glocal », ce terme dérivant de l'aphorisme « penser global, agir local ». Attribuée au biologiste et écologue français René Dubos, cette formule citée dès 1972 forme les bases de la notion de développement durable.

Cette nouvelle stratégie de développement des territoires entraine une relocalisation de l'économie fondée entre autres sur la valorisation des ressources présentes, dans une optique d'optimisation des échanges locaux. Ce mode de fonctionnement axé sur l'échelle d'un territoire limité a également été mis en pratique par les multiples initiatives de transition. Lorsque l'on évoque les territoires en transition, il s'agit à la base d'un passage entre une société fortement dépendante du pétrole vers un mode de fonctionnement adapté à une échelle réduite de territoire permettant de supporter les chocs liés à la raréfaction des ressources en matières premières, énergétiques et économiques. Brian Walker (Walker et al. 2006) attaché de recherche à la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization apporte la définition suivante : « La résilience d'un territoire est sa capacité à absorber des perturbations et à se réorganiser, de manière à ce qu'il puisse conserver les mêmes fonctions, la même

structure, la même identité et les mêmes capacités de réaction ». Un territoire en transition est un territoire émettant également drastiquement moins de gaz à effets de serre et donc à même de répondre aux enjeux environnementaux de ce siècle. L'initiative d'un bassin d'activité situé en Sud Touraine de mettre en place une filière de rénovation des bâtiments passant par la production locale de matériaux d'isolation entre entièrement dans cette dynamique. Les acteurs de ce territoire sont partis de la nécessité pour les habitants d'améliorer les performances de leur habitat. La mise en place d'un programme de rénovation énergétique aura un impact économique, social et environnemental dans le Pays Touraine Côté Sud. Lorsque la réflexion sur la mise en place d'une filière intègre l'ensemble des acteurs depuis les potentiels producteurs de matériaux (les agriculteurs) à ceux qui vont les proposer et mettre en œuvre (maîtres d'œuvres, artisans) en passant par les incitations et la commande publique locale, les différents ingrédients d'une démarche participant à la résilience du territoire sont réunies.

Lorsqu'ils sont peu transformés et dépourvus d'additif à forte énergie grise, ces matériaux biosourcés sont considérés comme « low-tech ». Cette opposition entre deux approches se décline au niveau des outils et moyens mis en œuvre pour réduire la consommation énergétique des bâtiments. L'efficacité énergétique d'un bâtiment semble plus facilement atteignable par la mise en place des matériaux d'isolation les plus performants comme le polyuréthane et plus encore, les isolants sous vide ou les aérogels de silice qui permettent d'atteindre des niveaux de conductivité thermique inatteignables par les isolants biosourcés. La course vers la performance énergétique des bâtiments implique un surcoût environnemental, en termes d'émissions de gaz à effets de serre lié aux matériaux et équipements. Sur la durée d'exploitation d'un bâtiment, ces impacts deviennent conséquents par rapport aux consommations énergétiques économisées pour le chauffage ou le refroidissement des espaces. En prenant en considération cet aspect, l'utilisation d'un matériau peu transformé issu de la biomasse (Figure 1-8) même moins performant en termes de résistance thermique devient pertinente.

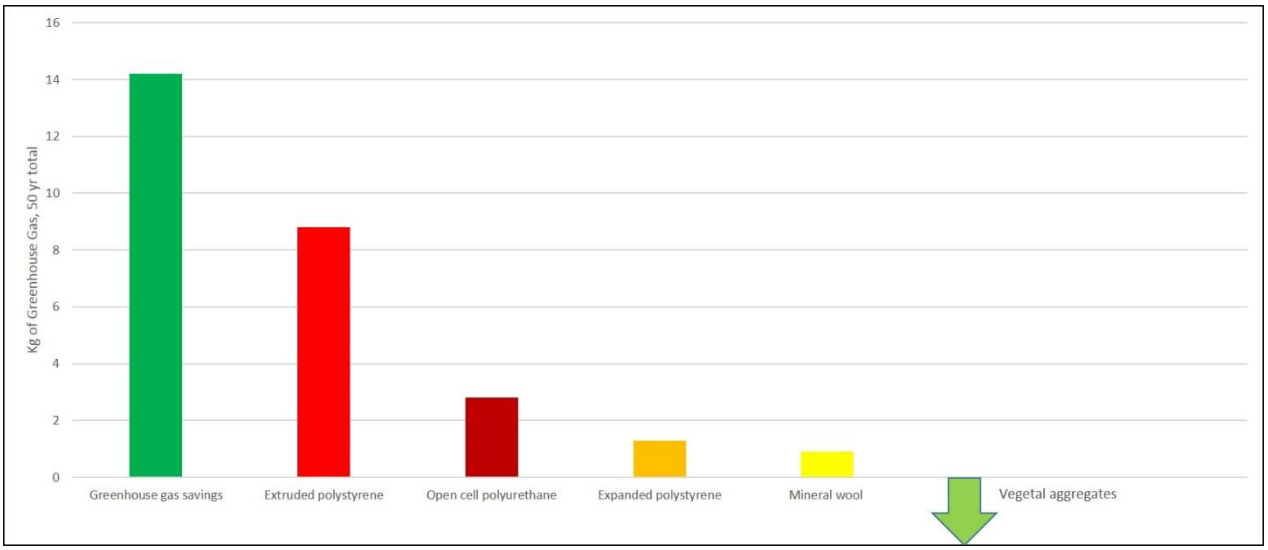


Figure 1-8. Emission de gaz à effets de serre évité pour un apport d'isolation supplémentaire de R=1,8 à un mur existant de résistance thermique R=2,7 pour une chauffage au gaz © 2015 Third Level Design

Les matériaux biosourcés permettent de diminuer les conséquences sanitaires liées aux émissions de composé organo-volatiles et permettent le réemploi, recyclage ou compostage. Concernant cette dernière problématique, en 2020, au moins 70% des déchets de (dé)construction devront être recyclés pour se conformer aux exigences européennes, il s'agit là d'une étape nécessaire pour se diriger vers une économie circulaire.

1.4.1.2 Freins à l'utilisation des éco-matériaux

Une des plus grandes difficultés rencontrées pour l'utilisation des mélanges terre-végétaux identifiée par les artisans est liée à leur longue durée de séchage et aux conséquences que cela engendre : les délais de finalisation des chantiers (réoccupation des espaces et application de l'enduit de finition) ainsi que le risque élevé d'apparition de moisissures. A l'heure actuelle, la technique de banchage ne peut être appliquée que pour des chantiers en période chaude permettant une excellente ventilation. Le projet régional BIOCOMP impliquant des chercheurs avec une démarche scientifiques, des artisans et des agriculteurs locaux avec un retour d'expérience, a été mis en place pour comprendre le comportement des matériaux, et proposer des solutions de mise en œuvre sur les chantiers de rénovation en sud Touraine.

D'un point de vue général, si les incitations à l'utilisation de matériaux biosourcés dans les bâtiments sont de plus en plus nombreuses et que, de même couverture médiatique et le nombre d'études dédiées à ces sujets croit sans cesse, en pratique la part de marché des matériaux biosourcés reste très minoritaire par comparaison avec les matériaux conventionnels à cause des exigences normatives et de certification. Il apparait difficile d'imaginer aujourd'hui que l'utilisation de ces matériaux apportera un impact important pour la lutte contre les GES ou que les filières locales d'agromatériaux puissent se généraliser et se développer sereinement sans aide. L'application de matériaux d'origine biosourcée pour des projets de rénovation se heurte effectivement à de nombreux écueils comme a pu le souligner Sophie Claude dans le cadre d'un projet de rénovation urbaine (Claude et al. 2017).

Il en est de même pour les filières terre-crue pour lesquelles de nombreuses difficultés freinant leur développement ont été identifiées lors de l'étude de Leylavergne (Leylavergne 2010).

Plusieurs études menées au Royaume-Unis ont eu pour objet d'identifier les freins à l'utilisation de matériaux durables « alternatifs », Giesekam et al ont répertorié ces données auprès de professionnels de la construction et de dirigeants d'entreprises au Royaume-Unis afin d'aboutir à des recommandations à considérer par les différents maillons de la chaîne de décision afin d'aboutir à une augmentation de leur utilisation (Giesekam et al. 2016).

1.4.1.3 Difficultés rencontrées face à l'application de la réglementation thermique des bâtiments existants

Les chantiers de rénovation sont soumis également à des contraintes liées à la réglementation thermique. Les règles applicables concernant les exigences de performances thermiques sont stipulées dans le document RT existant « élément par élément : Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants » dont l'article 3 précise que l'association paroi existante / isolant doit présenter une résistance thermique minimale pour les murs extérieurs de R = 2,3 m²K/W pour la zone H2 dans laquelle se situe l'Indre et Loire. Il est également stipulé dans l'article 5 que les travaux ne doivent pas dégrader la qualité de l'air à l'intérieur de l'habitat.

Suite au travail de réflexion et de mise en relation des différents partenaires présents sur le département de l'Indre et Loire et en Région Centre-Val de Loire travaillant sur la mise en place de filières locales de matériaux biosourcés pour le bâtiment, est apparue l'opportunité d'intégrer un volet recherche impliquant les universités de Tours (Laboratoire de Mécanique et de

Rhéologie) et d'Orléans (Laboratoire PRISME) en lien avec des partenaires du Pays Touraine Côté Sud : un artisan spécialiste des matériaux biosourcés et la collectivité qui elle-même est en lien avec un groupement d'agriculteurs. Cette collaboration a donné lieu à la mise en place d'une thèse doctorale ayant pour objet la caractérisation d'enduits terre-crue/végétaux pour l'isolation des bâtiments et l'amélioration des formulations existantes dans le cadre du projet BIOCOMP.

1.4.1.4 Rénovation du patrimoine bâti en Sud Touraine : notion d'habitat vernaculaire

La notion d'architecture vernaculaire fait référence, depuis les années 1980, à une architecture conçue en harmonie avec son environnement, en rapport avec l'aire géographique qui lui est propre, son terroir et ses habitants. En effet**,** De par le monde, le patrimoine bâti a été élaboré jusque récemment en utilisant les ressources disponibles dans un rayon proche, de l'ordre de quelques kilomètres ainsi que par les contraintes climatiques inhérentes aux espaces géographiques concernés.

Parce qu'elle s'inscrit dans des démarches d'urbanisme durable et de valorisation du patrimoine local et qu'elle présente de nombreux avantages à la fois environnementaux, sociaux et économiques, l'architecture vernaculaire fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt de la part de nombreux acteurs (collectivités, institutions publiques, entreprises, etc.). Cette inscription territoriale engendre une implication renforcée des acteurs locaux (démarches de concertation, renforcement d'un lien identitaire entre les habitants et leur territoire, etc.). Elle permet de réinscrire des circuits courts, d'offrir de nouveaux débouchés aux secteurs agricole et industriel locaux via la valorisation de coproduits ou leur recyclage tout en apportant du travail aux artisans locaux, en France comme dans d'autres pays.

La pierre de tuffeau sous forme de pierre de taille ou de moellon constitue la base de l'habitat de Touraine, cette pierre calcaire très poreuse a la faculté d'absorber l'eau rapidement et en grande quantité (Stephan 2014). La DREAL (Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement) des pays de la Loire préconise ainsi de privilégier la continuité capillaire pour isoler ce type de paroi à l'aide d'enduit perspirant type chaux-chanvre.

En effet, l'isolation ou la mise en place de parements sur des parois en tuffeau avec des matériaux peu perspirants utilisés communément tels que le ciment ou le polystyrène expansé

tendent à faire stagner l'humidité dans la paroi et fragiliser la structure de la pierre et son jointoiement lorsque celui-ci a été réalisé à la terre.

Prenant en compte cette contrainte ainsi que l'absence de filière chanvre locale et de production de chaux sur le territoire, la décision a été prise d'utiliser les cultures agricoles existantes comme source d'approvisionnement en granulats végétaux et d'investiguer les ressources disponibles en termes d'approvisionnement en terre crue sur le territoire dans le cadre du projet BIOCOMP.

1.4.1.5 Mise en place d'une filière d'éco-construction dans le Pays Touraine Côté Sud

Suite à la mise en place d'un agenda 21 élaboré en juillet 2012, les élus du Pays Touraine Côté Sud ont eu la volonté de créer une filière d'éco-construction capable d'offrir des solutions depuis la production de matériaux jusqu'à la mise en œuvre de constructions neuves (paille) ou de répondre aux problématiques de rénovation énergétiques spécifiques liées à l'habitat local. Le développement de cette filière d'éco-construction a pour vocation de travailler sur trois axes :

1. La fabrication d'agro-matériaux locaux
2. L'accompagnement des entreprises du bâtiment
3. L'amélioration des bâtis du territoire, publics et privés, en neuf et en rénovation.

Ainsi, le besoin d'impliquer une démarche scientifique pour développer cette filière tout en faisant face aux défis rencontrés s'est rapidement fait sentir dans le but de la mise en place du projet BIOCOMP.

1.4.1.6 Production agricole

Le Pays Touraine Côté Sud se situe dans le sud de la région Centre Val de Loire, le climat de cette zone permettant une diversité de culture. En 2015, en Indre et Loire, 37600 ha de colza et 20900 ha de tournesol ont été cultivés. Dans le but de développer une filière de production d'agro-matériaux, il est apparu pertinent aux élus, chargés de missions et chambres consulaires du territoire de se baser sur ces cultures existantes plutôt que d'envisager la création d'une filière plus spécifiquement dédiée à l'éco-construction comme le chanvre. Effectivement, la production et transformation du chanvre en fibre et chènevotte en vue de sa valorisation par voie sèche sous forme de laine de chanvre ou par voie humide via les bétons de chaux-chanvres existe à différentes échelles sur différents territoires français mais nécessite pour les agriculteurs

de se former à cette culture quasiment disparue du territoire. De même, les frais nécessaires pour la mise en place d'une unité de défibrage semi-industrielle se révèlent prohibitifs. Parallèlement, les premières études sur la valorisation de ces végétaux en granulats pour la construction commençaient à être publiées d'abord sur le tournesol en 2010 (Magniont 2010) et 2012 (Vandenbossche et al. 2012), (Nozahic 2012) puis sur le colza en 2014 (Lenormand et al. 2014) et 2016 (Chabriac et al. 2016). Les agriculteurs du groupement de développement agricole (GDA) de Montrésor − territoire à L'Est de Loches − partenaires de la collectivité possèdent une expérience de ces deux cultures ainsi que des capacités de broyage et tri des granulats. La surface de tournesol produite par les agriculteurs membres du projet est de 60ha en 2016. Ils se sont constitués en association pour pouvoir fournir 2 types de granulats issus de colza et de tournesol broyés en axant leurs travaux sur les problématiques de la récolte et de la transformation (broyage, séparation, dépoussiérage). Avec ce débouché supplémentaire les membres de l'association espèrent valoriser davantage leurs productions notamment de tournesol.

D'autres végétaux présents sur le territoire pourraient également être valorisés sous forme de granulats tels le miscanthus, le roseau, le maïs et le lin oléagineux. L'intérêt de diversifier les espèces végétales serait de permettre à une unité de transformation des granulats de fonctionner tout au long de l'année en étant moins dépendant d'aléas sur une culture particulière, les récoltes s'effectuant à différentes périodes selon les cultures (colza : printemps-été, tournesol : automne, miscanthus-roseau : hiver).

1.4.1.7 Choix des granulats végétaux

Les deux cultures choisies pour être valorisées dans la filière d'agro-matériaux du PTCS sont le tournesol et le colza. Ces deux végétaux sont des oléagineux dont les graines sont récoltées puis pressées pour obtenir de l'huile végétale. La récolte de la paille de colza ne pose pas de problèmes particulier tant par rapport aux dates de récoltes (juin-juillet) a une période où l'accessibilité aux parcelles est aisée que pour sa manutention, les pailles pouvant être conditionnées en bottes rondes ou carrés. La récolte du tournesol s'effectue quant à elle en octobre-novembre. Après un premier passage pour récolter la graine, les tiges (cannes) de tournesol sont laissées sur pied une dizaine de jour pour évacuer l'eau contenue dans la tige avant d'être récoltée et stockées pour qu'elles finissent de sécher. Lors de cette période, l'accessibilité aux champs est régulièrement compromise du fait des précipitations pouvant aller

jusqu'à l'impossibilité de récolter. Il s'agit également d'une période de semis pour d'autres cultures les agriculteurs sont par conséquent peu enclin à mobiliser les parcelles pour permettre aux cannes de sécher. Pour ces raisons, baser la filière du PTCS uniquement sur les granulats de tournesol parait hasardeux.

Si la paille de colza une fois récoltée et stockée ne nécessite qu'un simple broyage et calibrage pour obtenir des granulats conformes au label construire en chanvre, le processus de transformation de la canne de tournesol est plus complexe. La partie externe boisée de la canne de tournesol : l'écorce possède une masse volumique 8 fois supérieure à celle de la partie interne : la moelle. Les caractéristiques de ces deux constituants sont très différentes d'où la nécessité de les séparer. De plus, en Touraine, une pellicule brune sur la partie extérieure de l'écorce se développe naturellement sur la tige de tournesol en fin de croissance la recouvrant et engendrant une forte production de poussière lors du broyage. Toutefois, à la fois l'écorce et la moelle sont valorisables en tant que granulats végétaux avec des problématiques de formulation et mises en œuvre différentes. Les cannes, une fois broyées vont donc devoir subir un processus pour séparer la moelle de l'écorce et dépoussiérer les granulats.

1.4.2 BIOCOMP : programme scientifique

Le projet BIOCOMP financé par la région Centre Val de Loire dans le cadre d'un appel à projets est issu de la rencontre en 2013 entre une collectivité locale, le Pays Touraine Côté Sud et, un artisan spécialiste des bétons végétaux Éric Julien et le laboratoire de Mécanique et de Rhéologie de l'université de Tours. Ce projet issu de problématiques liées à un territoire, a pour objectifs de comprendre le comportement des matières premières choisies localement pour le développement des éco-matériaux, optimiser la formulation des bio-composites et les caractériser afin de comprendre leur comportement hygrothermique pour proposer aux artisans un cahier des charges pour les matières premières et des règles de mise en œuvre de matériaux biosourcés pour l'isolation des bâtiments. Une première partie du projet a été consacrée à l'étude des matières premières liant et végétaux (sélection, taille, propriétés physiques…) ainsi qu'à l'optimisation de la formulation des mélanges à partir d'une formulation artisanale. Une seconde partie a été dédiée à l'étude des propriétés thermiques des bio-composites en prenant en compte la variation du taux d'humidité et de la masse volumique. Une troisième partie du projet s'est intéressée à l'étude de l'influence de l'enduit de finition à base de terre sur les

propriétés thermiques, acoustiques, et hydriques des biocomposites pour répondre aux besoins de mise en œuvre et aux difficultés rencontrées sur les chantiers de rénovation.

1.5 Conclusion

Le soutien de la Région Centre-Val de Loire au projet BIOCOMP va dans le sens de la mise en place de politiques de transitions énergétiques à l'échelle de bassins de vie. La déclinaison de ce projet a pour objectif de réduire l'empreinte énergétique du Pays Touraine Côté Sud tout en développant l'activité artisanale, en permettant aux agriculteurs de générer davantage de marges sur leurs cultures de tournesol et de colza et en générant une activité économique annexe liée au conseil, à la formation ainsi qu'à la transformation et commercialisation d'isolants biosourcés. Outre la réduction des impacts environnementaux engendrée par l'utilisation de tels matériaux, les porosités rencontrées dans les bétons terre:granulats végétaux engendrent un apport de performances aux niveaux hygrothermiques, acoustiques ainsi qu'en amélioration de la qualité de l'air intérieur. Ces propriétés sont directement reliées à la nature des matières premières utilisées (liant et granulats) que nous développons dans le deuxième chapitre.

2 Caractérisation des matières premières et formulation des biocomposites

2.1 Introduction

Après avoir exposé le contexte global du recours aux matériaux d'isolation à base de végétaux, les objectifs du projet BIOCOMP, et une revue de la littérature concernant les avantages et les limites d'utilisation de la terre-crue et les matériaux biosourcés face aux défis rencontrés par le secteur des matériaux d'isolation pour le bâtiment, nous nous intéressons dans ce chapitre d'une part à l'étude et la caractérisation des matières premières que l'on désire utiliser, et d'autre part aux procédés de formulation, de fabrication et d'optimisation des biocomposites.

Lorsque l'on évoque la performance des matériaux isolants pour le bâtiment, l'aspect thermique est souvent prépondérant. Ces performances isolantes sont reliées à la capacité des matériaux à emprisonner l'air (voir le vide) sans phénomènes de convection. La conductivité thermique est donc reliée à la densité des matériaux et à leur porosité. Les granulats végétaux utilisés dans les matériaux d'isolation sont constitués par le parenchyme végétal qui induit la présence de macroporosités de différentes tailles selon l'espèce végétale utilisée et la partie de la plante concernée. La porosité des granulats végétaux a donc été caractérisée ici à la fois par microscopie électronique à balayage et par porosimétrie à air. Cette porosité est reliée à la masse volumique des granulats qui est également reliée à leur conductivité thermique. Ces différentes propriétés des granulats utilisés ont par conséquent été mesurées de même que leurs caractéristiques d'absorption capillaire.

La terre-crue ayant pour origine la dégradation des roches mères a été utilisée dans l'habitat traditionnel dans de nombreux pays depuis des milliers d'années que ce soit en utilisation structurelle (briques d'adobe, pisé, bauge) ou en remplissage d'ossature (torchis). Cette dernière est dorénavant supplantée par d'autres matériaux minéraux comme le ciment de Portland ou la chaux nettement plus performants mécaniquement lorsqu'ils sont utilisés comme liant pour l'élaboration de bétons. Les liants minéraux tels que le gypse utilisé pour l'élaboration du plâtre n'étant pas disponibles sur tous les territoires, le calcaire et l'argile nécessaire à la fabrication de chaux ou de ciment quant à eux se trouvent plus abondamment répartis en France, mais les structures industrielles permettant leur fabrication ne sont pas systématiquement présentes sur

chaque zone géographique. En revanche la terre-crue, mélange de particules de différents diamètres (argiles, silts, sables et graviers) composant les sols outre son avantage environnemental de ne pas nécessiter de cuisson fortement émettrice de gaz à effets de serre pour être utilisée en tant que liant, est présente de façon uniforme en France, elle se trouve comme co-produits de sites d'extraction de sable, de pierre via les résidus de lavage ou est extraite directement en vue d'une utilisation avec ou sans cuisson. Pour être compatible avec une utilisation dans la construction d'édifices, la répartition des différents éléments de la terre-crue ainsi que le type d'argile qui la compose doivent être caractérisés en amont. Les proportions et compositions des terres disponibles connues, un choix pourra être effectué quant au type d'utilisation pour laquelle elle est compatible. L'argile disponible caractérisée ici a été comparée à celles utilisées dans d'autres projets utilisant des mélanges terre-crue granulats-végétaux afin de cerner des caractéristiques générales.

Concernant les biocomposites caractérisés dans cette étude, l'hétérogénéité des granulats végétaux, les différences de fraction volumique entre le liant et les granulats ainsi que les contraintes de compactage différentes vont induire des propriétés thermiques et mécaniques différentes.

Le protocole d'élaboration des biocomposites (liant terre-crue et granulats végétaux) est inspiré des techniques de mise en œuvre par banchage utilisées en Indre et Loire, les proportions ont préalablement été testées conjointement avec des artisans utilisateurs de biomatériaux sur chantiers. Le protocole, les proportions (et donc les masses volumiques engendrées pour les différents biocomposites) étudiés en vue d'une optimisation des performances sont décrits en dernière partie de ce chapitre.

2.2 Transformation des végétaux et séparation

L'outil de transformation développé par les membres du GDA de Montrésor a évolué depuis un simple passage à l'ensileuse et un broyage sommaire via des moissonneuses batteuses modifiées en 2013 à un passage dans un bol broyeur équipé de grilles de tamis de différentes dimensions permettant d'aboutir à un granulat de diamètre inférieur à 15mm, dépoussiéré susceptible de répondre aux exigences du label granulat chanvre mis en place par l'association « construire en chanvre » éditrice des règles professionnelles de la construction en chanvre (Association Construire en Chanvre 2012). La paille de colza ne nécessitant pas d'étape de défibrage ou séparation subit un simple broyage/calibrage/dépoussiérage.

Les cannes de tournesol nécessitent une étape supplémentaire dont l'objectif est la séparation de la partie extérieure rigide de la tige (l'écorce) et de la partie interne nettement moins dense (la moelle). En effet le groupement d'agriculteur est intéressé à valoriser ces deux produits séparément pour des utilisations différentes.
Cette séparation n'est à l'heure actuelle pas encore totalement optimisée, les méthodes de triage par soufflerie semblant donner les résultats les plus satisfaisants.

2.3 Préparation au laboratoire

Le GDA de Montrésor a fourni au Laboratoire de Mécanique et de Rhéologie de Tours (devenu depuis le Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé) des granulats végétaux ayant subi un premier broyage concernant les tiges de tournesol ainsi que de la paille de colza non broyée. Les granulats de tournesol subissent un premier tri dans l'atelier de transformation du GDA permettant d'obtenir des sacs de granulats avec prédominance de moelle ou d'écorce. Avant l'acquisition d'un bol broyeur, les végétaux étaient broyés via une ligne de transformation composée de moissonneuses batteuses et permettant d'aboutir à des granulats grossier (voir distribution granulométrique Figure 2-1). Un second broyage a par conséquent été nécessaire afin d'obtenir une taille de granulat conforme à l'élaboration d'éprouvettes au laboratoire (Figure 2-2) en s'inspirant des prérequis exigés pour les granulats de chènevotte édictés pour les règles professionnelles de la construction en chanvre (Association Construire en Chanvre 2012). Ce broyage a été effectué dans les locaux du CERMEL (Centre d'Etude et de Recherche des Matériaux Elastomères de l'Université de Tours) à Joué-lès-Tours avec un broyeur à couteaux Retsch SM100 en utilisant des grilles de 10mm. Les différents granulats broyés sont présentés sur la Figure 2-3. L'écorce de tournesol quant à elle, ne nécessitait pas de tri supplémentaire, la moelle présente en faible quantité ne représentant qu'une infime proportion massique. En revanche, la forte présence de poussière dans ces granulats d'écorce après broyage a nécessité de les passer à un tamisage de 1,6mm. L'origine de cette poussière est due en grande partie à la décomposition d'une pellicule brune présente sur la partie externe de l'écorce. Concernant la moelle de tournesol, la présence de granulats d'écorce impacte fortement la masse volumique, une étape de tri manuelle s'est donc avérée nécessaire avant broyage afin d'améliorer la pureté des granulats permettant de diminuer fortement leur masse volumique.

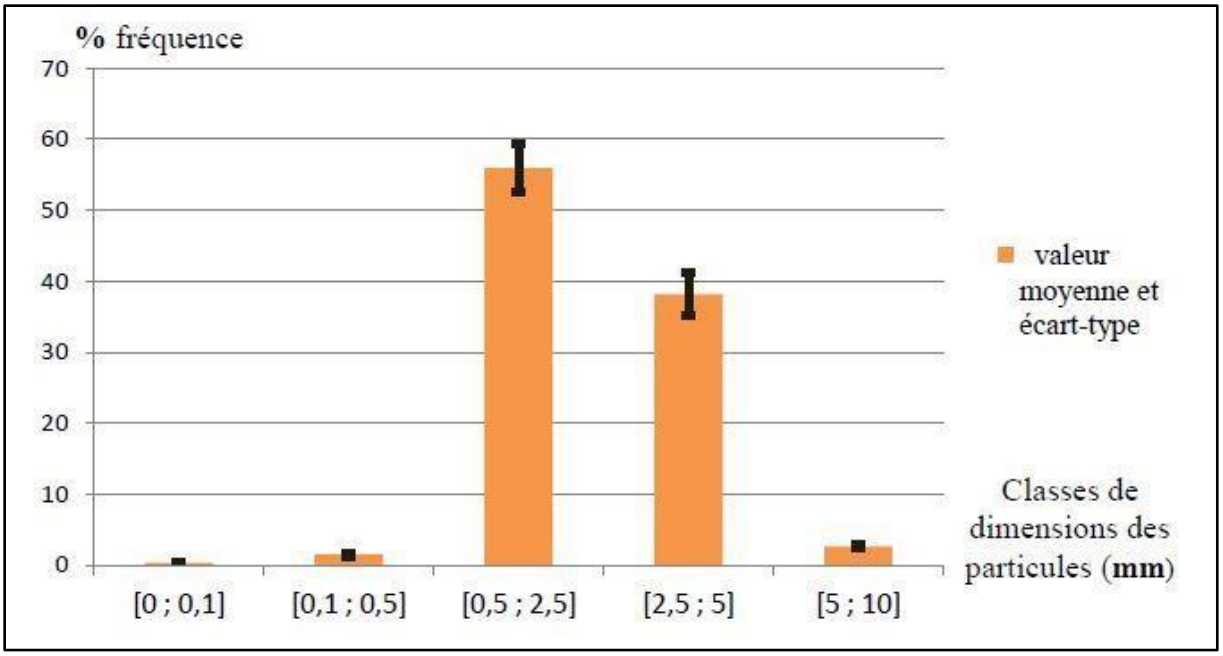


Figure 2-1. Distribution granulométrique des granulats de tournesol (Chabannes 2012)

Figure 2-2. A gauche : mélange moelle-écorce de tournesol grossièrement broyée après

passage à l'unité de transformation du GDA Montrésor, au milieu écorce de tournesol après broyage au laboratoire à droite, moelle de tournesol après broyage au laboratoire

Figure 2-3. Granulats végétaux broyés : En haut à droite: SB, haut à gauche: SP, bas à droite: RS, bas à gauche: SBP

Les granulats utilisés finalement pour la confection des échantillons de bio-composites sont désignés par : RS (Rape Straw) pour le colza, SB (Sunflower Bark) pour l'écorce de tournesol, SP (Sunflower Pith) pour la moelle de tournesol et SBP (Sunflower Bark and Pith) pour le mélange moelle-écorce de tournesol. Le mélange SBP a une masse volumique variant selon les échantillons récupérés, mais reste néanmoins légèrement inférieure à celle de RS. Dans l'objectif de fixer la masse volumique de SBP, celle-ci a été systématiquement ajustée à la valeur de celle de RS pour faciliter également la comparaison entre les granulats. Cet ajustement a été réalisé en faisant varier la proportion d'écorce dans les mélanges SBP à disposition jusqu'à obtenir une masse équivalente à celle de RS pour un même volume.

2.4 Terre crue

Compte tenu des objectifs du projet à savoir la valorisation de matériaux locaux du territoire du Sud-Touraine allié à un faible impact environnemental, un liant à base de terre crue a été choisi pour élaborer les bio-composites. En effet, l'étude de l'analyse de cycle de vie du béton de chanvre réalisée par Sylvie Prétot et Florence Collet (Pretot et al. 2014) révèle un matériau respectueux de l'environnement et qui pourrait l'être davantage en diminuant l'impact du liant (chaux). Le bilan environnemental des liants hydrauliques ou aériens est fortement terni par leur cuisson. Cette absence de cuisson est par conséquent l'un des principaux intérêts de la substitution de la chaux par la terre crue *a fortiori* si celle-ci est extraite localement. Les propriétés hygroscopiques et la compatibilité des propriétés liantes de l'argile avec les granulats végétaux sont autant de caractéristiques supplémentaires en faveur de l'emploi d'un liant à l'argile comme cela a été réalisé pour remplacer pour des composites terre:chanvre pour se substituer au chaux : chanvre (Degrave-lemeurs et al. 2018), (Mazhoud et al. 2016) ou pour la mise en place de matériaux composites à base de typha australis (Samin 2017).

Dans le cadre de l'étude de la mise en place d'une filière d'éco-construction en Sud-Touraine, le territoire du Pays Touraine Côté Sud a identifié deux sites potentiels d'approvisionnement en terre crue. Le cahier des charges des artisans étant de pouvoir disposer d'une terre-crue à forte proportion d'argile afin que les propriétés cohésives du liant soient optimisées afin de minimiser les proportions de terre-crue et ainsi avec pour objectif d'optimiser les propriétés isolantes des enduits terre-végétaux. La terre-crue recherchée doit permettre de correctement lier et enrober les fibres à l'état liquide et, une fois sèche, être suffisamment résistante.

Dans cette optique, le terme d'enduits en terre-allégée tel qu'indiqué par Franz Volhart (Volhard 2016) : *« Tout comme pour le torchis et l'adobe, la terre allégée est un mélange de terre et de fibres ou d'autres composants légers, mais sa différence réside dans le fait que l'argile (ou terre argileuse) ne constitue pas la matrice principale du matériau. Elle n'est que le liant des fibres qui forment ici le principal composant du volume du matériau »*, convient par conséquent pour dénommer les biocomposites étudiés ici.

2.4.1 Bac de rétention d'argile

Les carrières d'extraction de sable situées le long de l'ancien lit des rivières Vienne (Parçay sur Vienne, Marcilly sur Vienne (Figure 2-4)) et Cher (Saint-Aignan sur Cher), filtrent le sable du

sous-sol et stockent les eaux de lavages limono-argileuses dans des bassins de rétention. Ces bassins sont curés périodiquement permettant la récupération de quantités importantes de terres limono-argileuses. Ces dernières n'ont pas été retenues par le projet car n'étant pas broyées et criblées, elles contiennent des cailloux et graviers ainsi qu'une part plus ou moins importante d'humus. Cette ressource disponible sur de nombreux territoire est toutefois exploitée pour d'autres projets de recherches, notamment concernant le terre-chanvre (B. Mazhoud et al. 2017).

Figure 2-4. Carrière de sable Sograco Marcilly sur Vienne

2.4.2 Carrière de La Rouchouze

La carrière de terre de La Rouchouze est exploitée sur la commune de Langeais historiquement pour la fabrication de briques réfractaires et plus récemment pour la réalisation de faïences, sculptures et les enduits. L'atelier de cette briqueterie (Figure 2-5) a conservé les outils de broyage, criblage permettant de fournir une terre crue calibrée pour la préparation de terre crue ou cuite sous différents formats. Cette terre crue est appréciée des éco-constructeurs locaux car étant de couleur claire, elle autorise l'utilisation de pigments pour obtenir différentes teintes d'enduits de finition de façon similaire à certains enduits décoratifs du commerce.

Figure 2-5. Site d'extraction de terre-crue du site de La Rouchouze haut et atelier de broyage (bas gauche) et malaxage mise en forme (bas droite)

2.5 Méthodes de caractérisation des matières premières

2.5.1 Caractérisation des granulats

2.5.1.1 Masse volumique en vrac

La masse volumique des granulats végétaux a été déterminée en suivant les recommandations du RILEM Technical-Committee 236. Les granulats ont été placés à l'étuve à 50°C jusqu'à stabilisation de leur masse (écart inférieur à 0,1% entre 2 mesures à 24h d'écart) et versés dans un récipient cylindrique de 15 cm de diamètre et 25 cm de haut jusqu'à la moitié de sa hauteur. Le cylindre a ensuite été bouché et renversé 10 fois. Suite à cette étape, le volume final correspondant a été marqué et ce volume a été rempli avec de l'eau et pesé.

La masse volumique en vrac a été calculée à l'aide de l'Equation 1:

$$\rho = {}^{M}/_{M_w} \cdot \rho_{\mathrm{w}} \qquad (1)$$

Avec:

- ρ : Masse volumique du granulat (kg/m^3);
- M : Masse du granulat à sec (g);
- Mw : Masse d'eau correspondant au volume de granulat (g);
- ρw : Densité de l'eau (1000 kg/m^3) ;

2.5.1.2 Microscopie électronique à balayage.

Dans l'optique d'obtenir des informations sur la microstructure des granulats, notamment la forme et la taille des pores, des clichés de microscopie électronique ont été pris à l'aide d'un microscope Zeiss Ultra Plus en mode électrons secondaires à 1,5kV sous un vide de 1,10 – 10,00 mbar. Les échantillons ont été métallisés en amont avec un dépôt de 6mm d'or-palladium n'ayant pas causé de dommage aux agrégats, l'écrasement visible sur les clichés des Figures 2-4 à 2-7 étant dû à la découpe des échantillons.

2.5.1.3 Absorption capillaire.

Les granulats de moelle, d'écorce de tournesol et de colza ont été immergés dans l'eau à 3 températures : 10, 20 et 40°C pendant 1h. La masse des échantillons égouttés à l'aide d'un papier absorbant a été mesurée respectivement après 1, 5, 10, 15, 20, 30, 45 et 60min après quoi les résultats de l'expression suivante (Equation 2) ont été représentés sur la Figure en fonction de la racine carrée du temps.

Absorption capillaire.

$$A(t) = \frac{m(t) - m(t0)}{m(t)} \quad \textbf{(2)}$$

Avec :

- *A(t)[%]* taux d'absorption en eau ;
- *m(t) [kg]* poids de l'échantillon au temps t ;
- *m(t0) [kg]* poids initial de l'échantillon (séché à l'étuve) ;

2.5.1.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique des granulats en vrac a été mesurée en utilisant la technique du fil chaud avec un conductimètre NEOTIM FP2C. Les mesures ont été réalisées en suivant la norme ASTM D5930-97 sur des granulats séchés à 50°C après stabilisation de leur masse. Afin d'obtenir des échantillons symétriques, les granulats ont été enveloppés dans du film plastique alimentaire et le fil chaud placé entre deux « paquets ». D'autres mesures comparatives ont été effectuées en plongeant le fil chaud directement dans les granulats en vrac engendrant des

résultats similaires, l'impact de la géométrie du film plastique peut donc être considéré comme négligeable.

2.5.1.5 Porosimétrie à air

La porosité des granulats végétaux a été mesurée à l'aide d'un porosimètre à air (Figure 2-6) au CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) de Strasbourg. Cette technique de porosimétrie permet d'obtenir des informations sur la porosité totale des échantillons mais pas sur la distribution des pores. La porosimétrie au mercure permet d'obtenir des informations sur la distribution des pores, mais cette dernière méthode est peu fiable quand elle est appliquée à des matériaux fragile et macroporeux dont la taille des pores dépasse les 100 µm de diamètre (Sing 2004). De plus, des déformations des structures poreuses dues aux fortes pressions appliquées au mercure ont par ailleurs été rapportées pour des matériaux légers (Maquet et al. 2003). Tenant compte de ces contraintes, les méthodes d'analyses non destructives comme la porosimétrie à air sont favorisées pour ce type de granulats légers. Ce dispositif permet d'évaluer la porosité ouverte Φ d'un matériau. La mesure est effectuée en déterminant le volume d'air contenu dans une enceinte, avec et sans l'échantillon, cette enceinte étant conçue pour être adiabatique. Elle est munie d'un piston permettant de faire varier son volume intérieur. En déplaçant ce piston et en mesurant l'augmentation de pression qui en résulte, on accède au volume d'air dans la cavité. On suppose pour cela que la transformation est isotherme, et que l'air suit la loi de Boyle-Mariotte (Rezaei & Chatzis 2011).

En mesurant successivement le volume d'air de l'enceinte avec et sans échantillon, on détermine le volume V_s occupé par le squelette du matériau, et on en déduit la porosité correspondant à l'air non occlus (air dans les pores connectés). Afin de déterminer la porosité ouverte Φ des granulats, nous avons utilisé la méthode décrite par Philippe Glé (Glé 2014). Le volume V_s du squelette du matériau poreux est déduit de l'application de la loi de Boyle-Mariotte. Connaissant la masse m de l'échantillon à mesurer, la masse volumique du squelette du granulat ρ_s ainsi que la porosité ouverte Φ peuvent être calculées à partir des Equations 3 et 4, ρ_v représentant la masse volumique apparente :

$$\rho s = \frac{m}{Vs} \quad \textbf{(3)}$$

$$\Phi = 1 - \frac{\rho v}{\rho s} \quad \textbf{(4)}$$

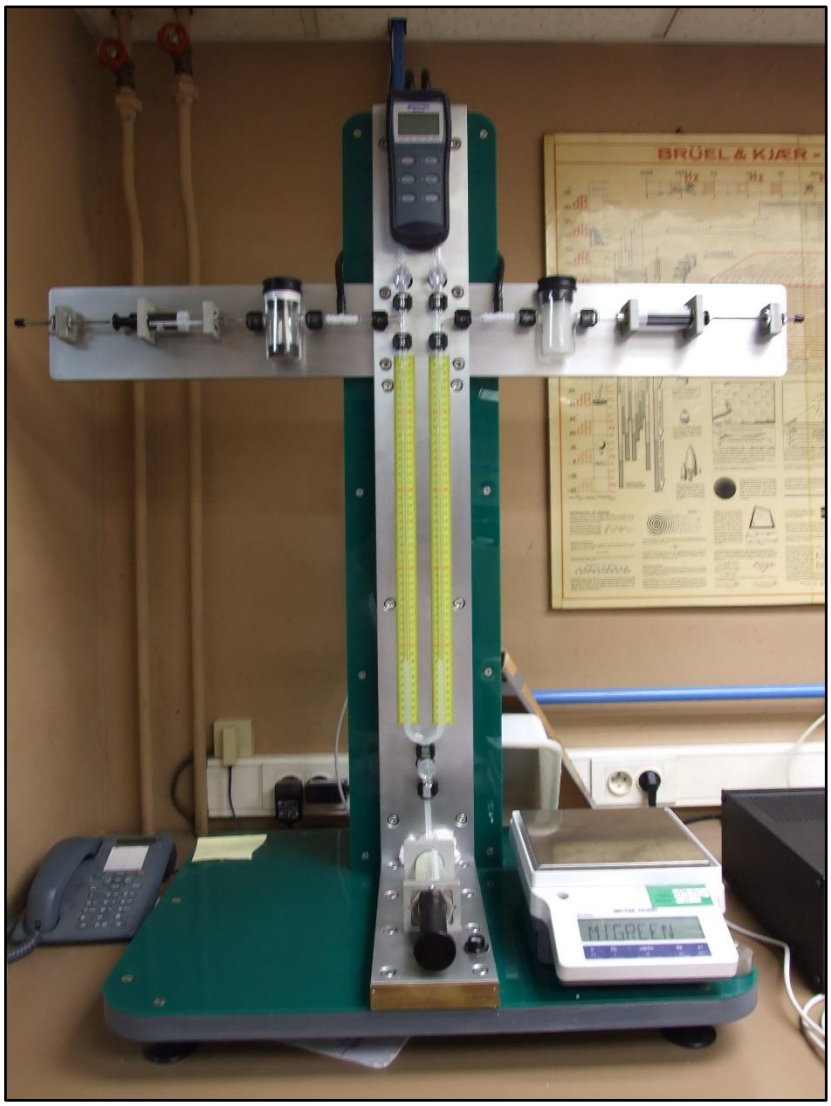


Figure 2-6. Porosimètre à air du CEREMA de Strasbourg

2.5.2 Caractérisation de la terre-crue

L'analyse granulométrique et l'analyse par absorption de rayons x ont été réalisées au laboratoire de Clamart du Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC).

2.5.2.1 Granulométrie

Après tamisage, une séparation granulométrique a été réalisée en suivant la norme NF ISO-2591-1 sur un échantillon homogène de 500g. La taille des différents composant de la terre crue

a été déterminée par superposition de tamis pour les particules situées entre 40 et 500 µm et par la méthode d'absorption de rayons x après dispersion durant une période d'au moins 20 heures.

2.5.2.2 Analyse minéralogique par diffraction de rayons x

La taille et la composition des particules ont été déterminées à l'aide d'un diffractomètre Siemens D5005, la norme NF ISO 13317-3 a été utilisée pour l'analyse qualitative. Le diffractogramme ainsi obtenu a été analysé à l'aide du logiciel Diffract Plus intégrant la base de données ASTM.

2.5.2.3 Valeurs au bleu de méthylène et limite de liquidité d'Atterberg

La limite de liquidité d'Atterberg (Barnes 2018) permet de déterminer la teneur en eau à laquelle la terre-crue argileuse passe de l'état plastique à l'état liquide. La limite de liquidité c'est à dire l'évaluation de la teneur en eau spécifique de l'échantillon de terre-crue a été réalisée avec un appareil de Casagrande.

La première étape de l'essai consiste à rechercher la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un échantillon de sol placé dans une coupelle se referme sur 1 cm lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à 25 chocs répétés avec l'appareil de Casagrande.

Le but de l'essai au bleu de méthylène est d'évaluer globalement la richesse en argile d'un sol, le résultat dépend à la fois de la nature des argiles et de leur quantité. Cette mesure utilise les propriétés d'adsorption que les particules argileuses sont quasiment seules à posséder dans le sol. Du fait que leurs surfaces sont chargées électriquement, elles adsorbent une quantité de bleu de méthylène proportionnelle aux surfaces disponibles, lorsqu'elles sont mises en présence d'une solution de ce colorant.

La nature de la fraction argileuse est exprimée dans cet essai par la surface spécifique ; pour un sol donné, la surface totale développée dépend de la nature minéralogique. Le principe de l'essai est d'introduire dans une suspension de sol, des quantités croissantes de bleu de méthylène, par doses successives, jusqu'à ce que toutes les surfaces d'adsorption étant saturées, apparaît un début d'excès. À partir de la quantité totale de bleu introduite et du poids du sol sec, on calcule la valeur qui correspond à 100g de sol qui est appelée la "valeur de bleu" de ce sol.

La valeur du bleu notée VBS est très utilisée dans la classification des sols pour les terrassements.

2.6 Résultats et discussion

2.6.1 Caractérisation des granulats

2.6.1.1 Masse volumique en vrac

La moyenne de 3 mesures pour chaque granulat a été prise pour déterminer la masse volumique en vrac, les résultats sont indiqués dans le Tableau 2-1, celle-ci est comparée avec d'autres résultats issus de la littérature.

Granulats végétaux	Masse volumique en vrac (kg/m^3)	Masse volumique en vrac (kg/m^3) issues de la littérature
RS	64,9 ±0,9	125 (Rahim, Douzane, A. D. Tran Le, et al. 2016); 78 (Lenormand et al. 2014); 130 (Rahim, Douzane, A.D. Tran Le, et al. 2016)
SB	129,3 ±1,4	134,8 (Magniont et al. 2012); 135(Lenormand et al. 2014); 168(Chabriac et al. 2015)
SP	15,9 ±0,3	20 (Magniont et al. 2012); 34(Chabriac et al. 2015)

Tableau 2-1. Masse volumique des granulats végétaux utilisés (RS, SB, SP)

Les variabilités importantes de la masse volumique des différents granulats végétaux relevées dans le Tableau 2-1 en comparaison avec les travaux de la littérature peuvent être induites par différents facteurs : variété, données climatique ou de terroir, condition de récolte/broyage/stockage (condition et durée) de même qu'il a été relevé que sur une même tige de tournesol, selon la partie concernée, la moelle aura une masse volumique différente si elle est prise en bas, en milieu ou en haut de la tige (Pennec et al. 2013). Ces différents paramètres peuvent notamment influer sur la quantité de moelle présente dans la paille de colza et engendrer des écarts conséquents entre les masses volumiques relevées entre différents

échantillons 64,9kg/m^3 pour cette étude, 78 kg/m^3 pour les échantillons de Lenormand et al (Lenormand et al. 2014) et jusqu'à 130 kg/m^3 relevé par Rahim et al (Rahim, Douzane, A.D. Tran Le, et al. 2016).

2.6.1.2 Microstructure des granulats végétaux

Afin d'évaluer la porosité des différents granulats étudiés, des observations au microscope électronique à balayage ont été effectué à la Plateforme IBiSA de Microscopie Electronique de l'Université de Tours. Nous pouvons constater sur les clichés de la Figure 2-7 que l'écorce de tournesol SB contient des pores de dimension de l'ordre de 10µm tandis que les pores contenus dans la moelle de tournesol SP ou de colza ont des structures alvéolaires pour des dimensions supérieures à 100µm (Figure 2-10). Nous pouvons ajouter que les pores sont allongés selon la direction radiale comme constaté par Pennec (Pennec et al. 2013). La partie extérieure de la paille de colza (Figure 2-9) présente une quantité nettement moindre de pores et de tailles bien plus réduite (*i.e.* inférieure à 15 µm).

Figure 2-7. Ecorce de tournesol SB, sur la droite, cliché MEB section tangentielle

Figure 2-8. Moelle de tournesol SP, sur la droite, cliché MEB section radiale

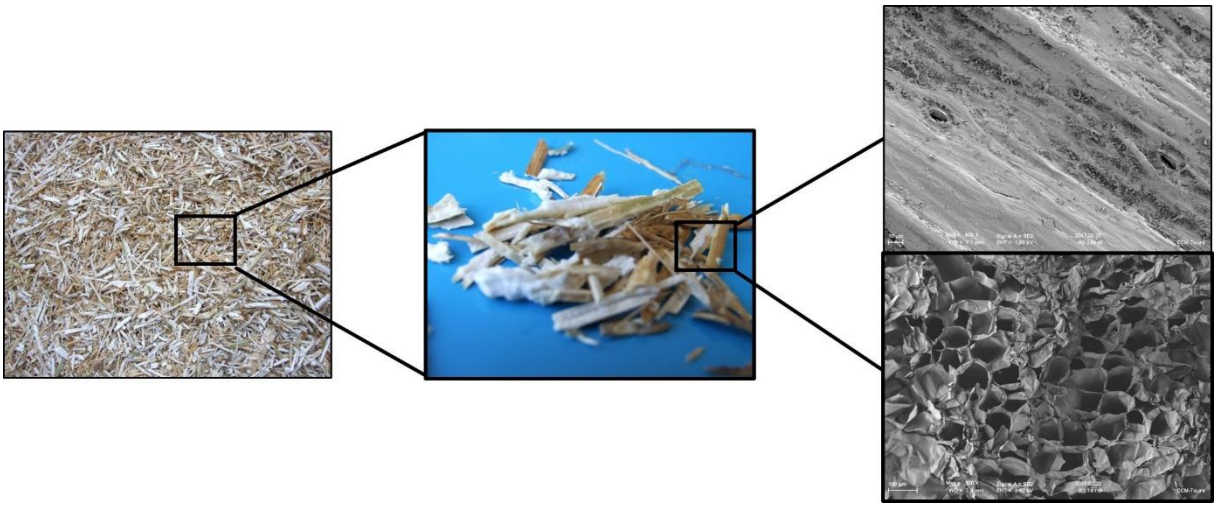


Figure 2-9. Paille de colza RS, cliché MEB moelle (en bas à droite) et paille (haut à droite)

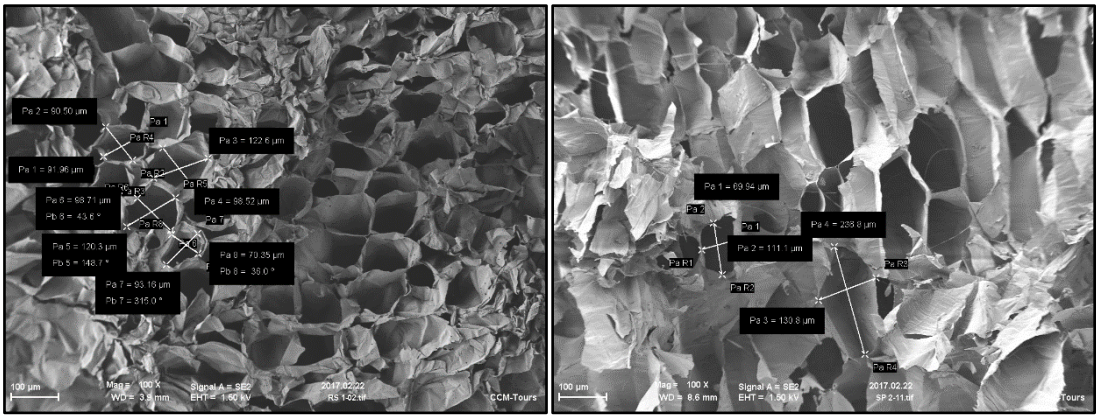


Figure 2-10. Evaluation de la taille des pores au MEB : RS section longitudinale (gauche) et SP section radiale (droite)

2.6.1.3 Absorption d'eau

Les résultats de l'absorption en eau des granulats sont présentés sur la Figure 2-11 et permettent de constater un comportement similaire des granulats SB et RS. La différence de taille de pore entre ces 2 granulats tend à indiquer que celle-ci joue un rôle dans leur comportement hydrophile celui-ci augmentant avec la taille et quantité de pores. Ce comportement se trouve par conséquent exacerbé pour les granulats de SP les plus légers présentant une structure extrêmement poreuse. Ces valeurs très élevées d'absorption en eau ont été relevées par ailleurs par Chabannes (Chabannes et al. 2014) et Nozahic (Nozahic et al. 2012). La Figure 2-11 permet de constater également que cette capacité hydrophile est fortement dépendante de la température se révélant optimale à 20°C.

Il convient toutefois de pondérer les valeurs obtenues en pourcentage d'absorption massique du fait des fortes différences de masse volumique de ces matériaux. Ainsi, rapporté aux volumes de granulat considéré, nous pouvons constater sur la Figure 2-12 que les masses d'eau absorbée par volume de granulat montrent moins de disparité, le granulat le plus dense (SB) étant celui qui absorbe la plus grande quantité d'eau pour un même volume. De plus, cette dépendance des capacités d'absorption diffère d'un granulat à l'autre, en effet, si l'absorption des granulats de RS est peu dépendante de la température (différence maximale de 16%), les granulats de tournesol SB (154%) et SP (223%) quant à eux, enregistrent de grandes variations. Les courbes d'absorption en tant que telles ont des allures similaires quel que soit le granulat et permettent d'observer une partie linéaire lors de laquelle l'absorption est dans un premier temps très rapide et importante (lois de diffusion de Fick) due à la capillarité induite par les structures poreuses.

Dans un deuxième temps, une phase de plateau engendrée par le remplissage à faible vitesse de la porosité piégée et mal connectée suite à la dissolution des bulles d'air dans l'eau.

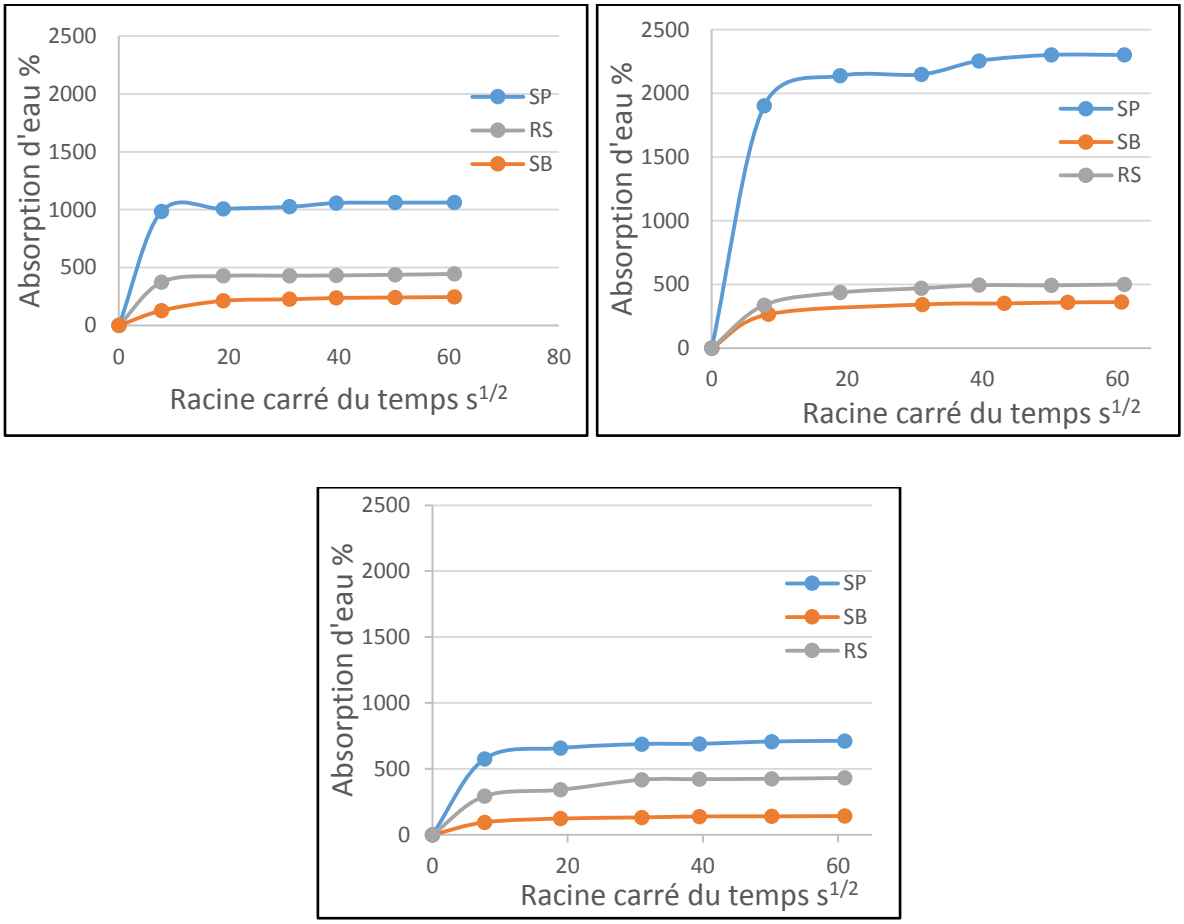


Figure 2-11. Taux d'absorption des granulats végétaux à 10°C (en haut à gauche), 20°C (en haut à droite) et 40°C (en bas)

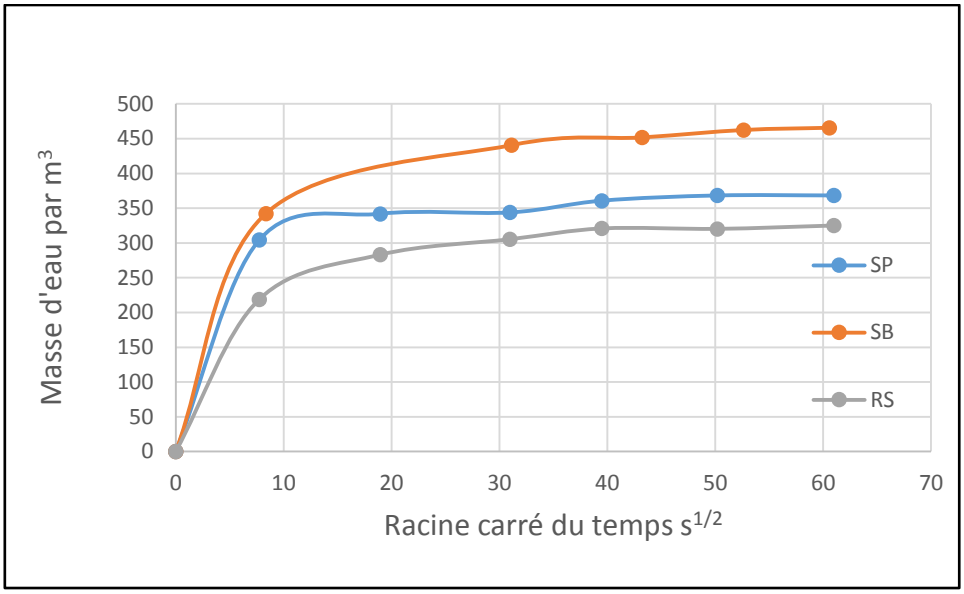


Figure 2-12. Quantité d'eau absorbée par les granulats végétaux à 20°C en fonction du volume de granulats

2.6.1.4 Conductivité thermique

Les résultats des conductivités thermiques sont présentés dans le Tableau 2-2. Comme attendu, les conductivités thermiques les plus faibles sont relevées pour les granulats les plus légers de moelle de tournesol. Ces résultats sont en accord avec d'autres mesures réalisées selon la même technique transitoire de fil chaud (Pennec et al. 2013) tandis que les méthodes de mesures stationnaires telles que la plaque chaude gardée ou le heat flow meter induisent des conductivités thermiques supérieures concernant la moelle de tournesol (Magniont et al. 2012), (Lenormand et al. 2014). Les conductivités thermiques du colza et de l'écorce de tournesol relevées par Lenormand et al avec un hot flux meter ont été mesurées respectivement à 0,067 et 0,074W.m^{-1}.K^{-1} avec toutefois des masses volumiques respectives de 78 et 135 kg/m^3 supérieures à celles de l'étude présente. Une corrélation entre l'augmentation de la masse volumique et la conductivité thermique est constatée (Figure 2-13), les granulats les plus poreux, emprisonnant la plus grande quantité d'air sont les plus légers et les plus performants thermiquement.

Granulats végétaux	Masse volumique en vrac (kg/m^3)	Conductivité thermique (W.m^{-1}.K^{-1})	Conductivité thermique (W.m^{-1}.K^{-1}) issues de la littérature
RS	64,9 ±0,9	0,043±0,001	0,067 (Lenormand et al. 2014)
SB	129,3 ±1,4	0,053±0,002	0,074 (Lenormand et al. 2014)
SP	15,9 ±0,3	0,036±0,001	0,051 (Magniont 2010)

Tableau 2-2-2. Masse volumique en vrac et conductivité thermique des granulats végétaux

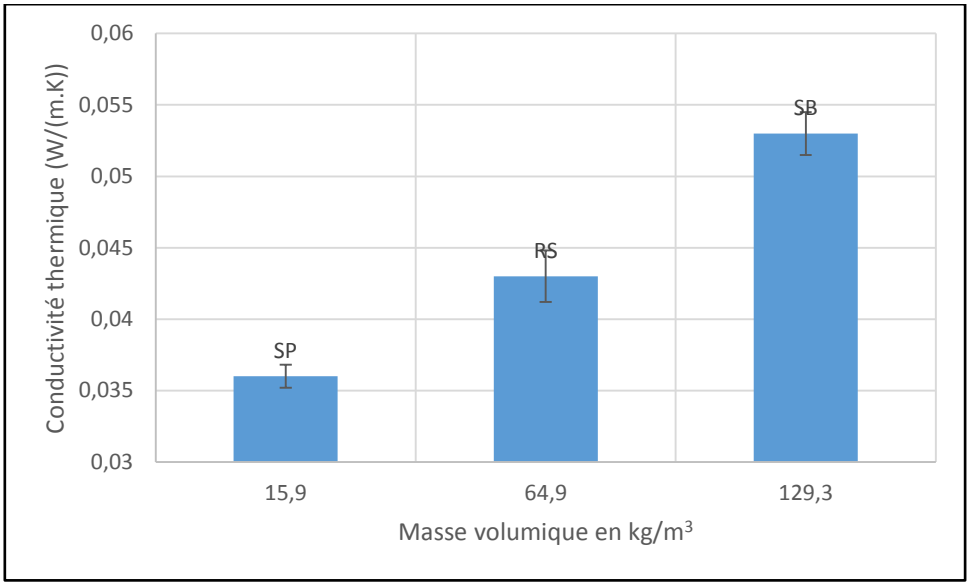


Figure 2-13. Conductivité thermique et masse volumique des granulats

2.6.1.5 Porosité

Les valeurs de la porosité totale des granulats sont présentées dans le Tableau 2-3. Ces résultats nous permettent de constater que la faible masse volumique de la moelle de tournesol est due à une porosité très élevée. De même, les granulats RS et SBP de masse volumique équivalente, présentent une porosité similaire. La composition des squelettes cellulosiques des granulats

végétaux n'impacte par conséquent pas leur masse volumique, à porosité équivalente, leur masse volumique est équivalente. Dans cet ordre d'idée, le granulat SB ayant la plus grande masse volumique est également celui qui a la plus faible porosité. On peut constater sur la Figure 2-14 qu'une relation linéaire reliant la masse volumique et la porosité apparait de façon évidente avec un coefficient de corrélation de -0,999, bien entendu ce type de relation reliant la masse volumique des matériaux cellulosiques avec leur porosité demande à être corroboré par un plus grand nombre de granulats végétaux.

Granulat	Masse volumique (kg/m^3)	Porosité %	Incertitude
SB	129	88,53	0,03
RS	65	94,06	0,06
SBP	65	94,16	0,06
SP	16	98,87	0,9

Tableau 2-3. Porosité totale des granulats végétaux

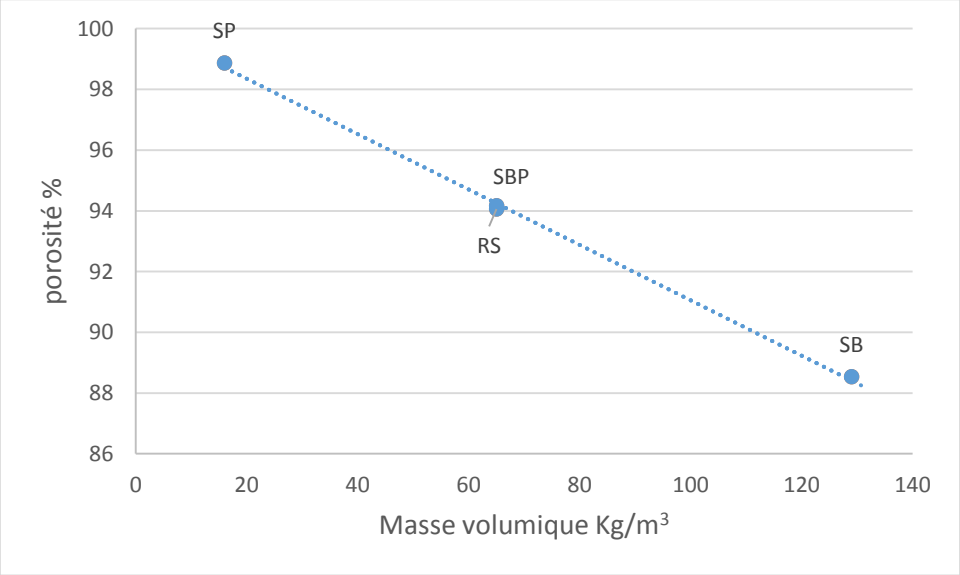
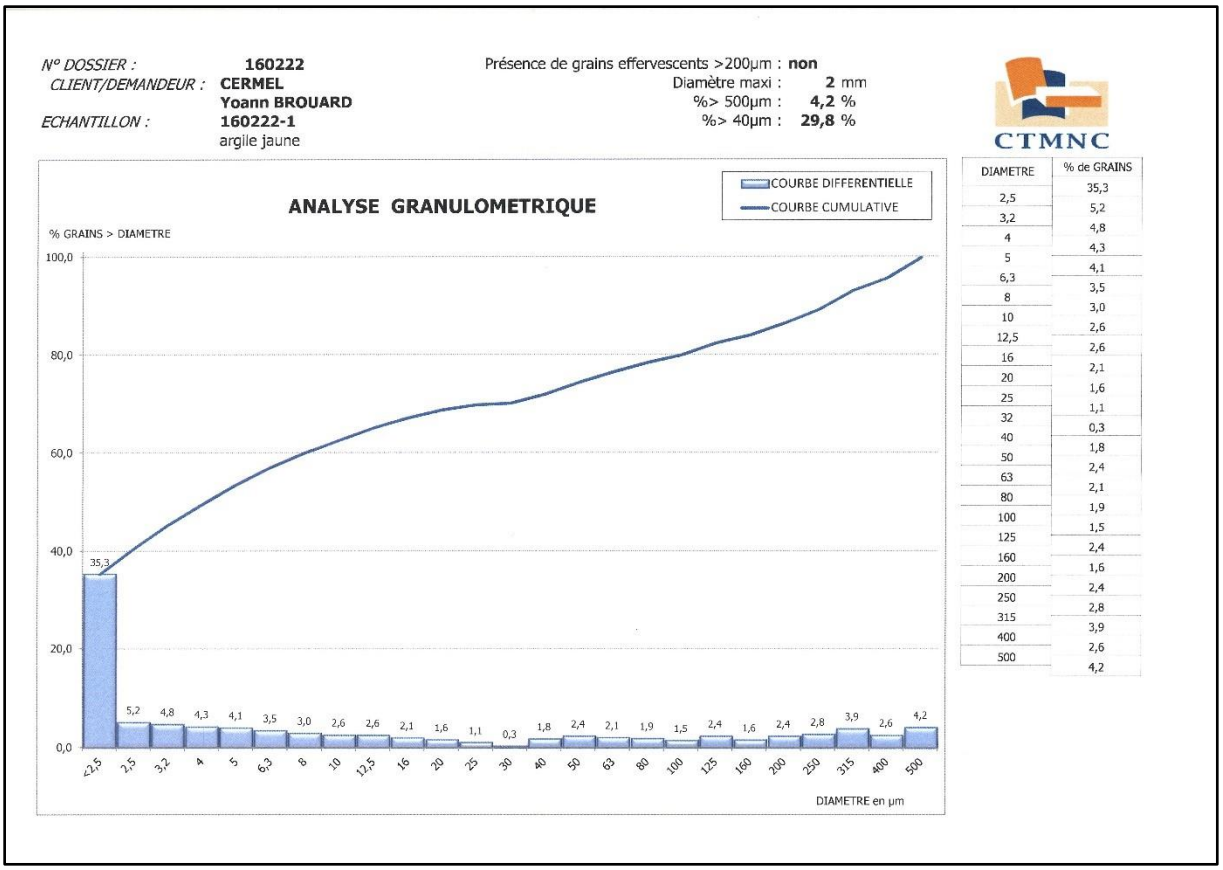


Figure 2-14. Relation entre la porosité et la masse volumique des granulats

2.6.2 Caractérisation de la terre-crue

2.6.2.1 Granulométrie

Les mesures granulométriques dont la courbe granulométrique est représentée sur la Figure 2-15 nous permettent de déterminer les fractions granulaires suivantes : 35% d'argile, 40% de silt et 25% de sable. Cette proportion minoritaire en sable (particules > 0,06mm) rend la terre-crue plus cohésive permettant son utilisation en tant que liant dans des bétons végétaux. Les proportions d'argile, silts et sable se situent dans la gamme de proportions relevées pour d'autres projets alliant liant terre-crue et granulats végétaux (Tableau 2-4).



DIAMETRE	% de GRAINS
2,5	35,3
3,2	5,2
4	4,8
5	4,3
6,3	4,1
8	3,5
10	3,0
12,5	2,6
16	2,6
20	2,1
25	1,6
32	1,1
40	0,3
50	1,8
63	2,4
80	2,1
100	1,9
125	1,5
160	2,4
200	1,6
250	2,4
315	2,8
400	3,9
500	2,6
	4,2

Figure 2-15. Courbe d'analyse granulométrique de la terre-crue de La Rouchouze

2.6.2.2 Analyse par diffraction de rayons x

Après analyse des pics de diffraction avec la base de données ASTM, les minéraux suivant ont pu être identifiés kaolinite, montmorillonite et nontronite (Figure 2-16). Cette analyse ne donne que des résultats qualitatifs, l'intensité des pics donnant des informations sur la cristallinité des

minéraux mais non sur leurs proportions. Des analyses complémentaires par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (ICP) permettant d'obtenir des informations sur les proportions des différents types d'argile n'ont pas pu être menées ; toutefois la détermination des limites d'Atterberg permet de donner des indications sur le type d'argile présente de façon prépondérante entre une argile active « gonflante » (la montmorillonite) et une peu active (la kaolinite).

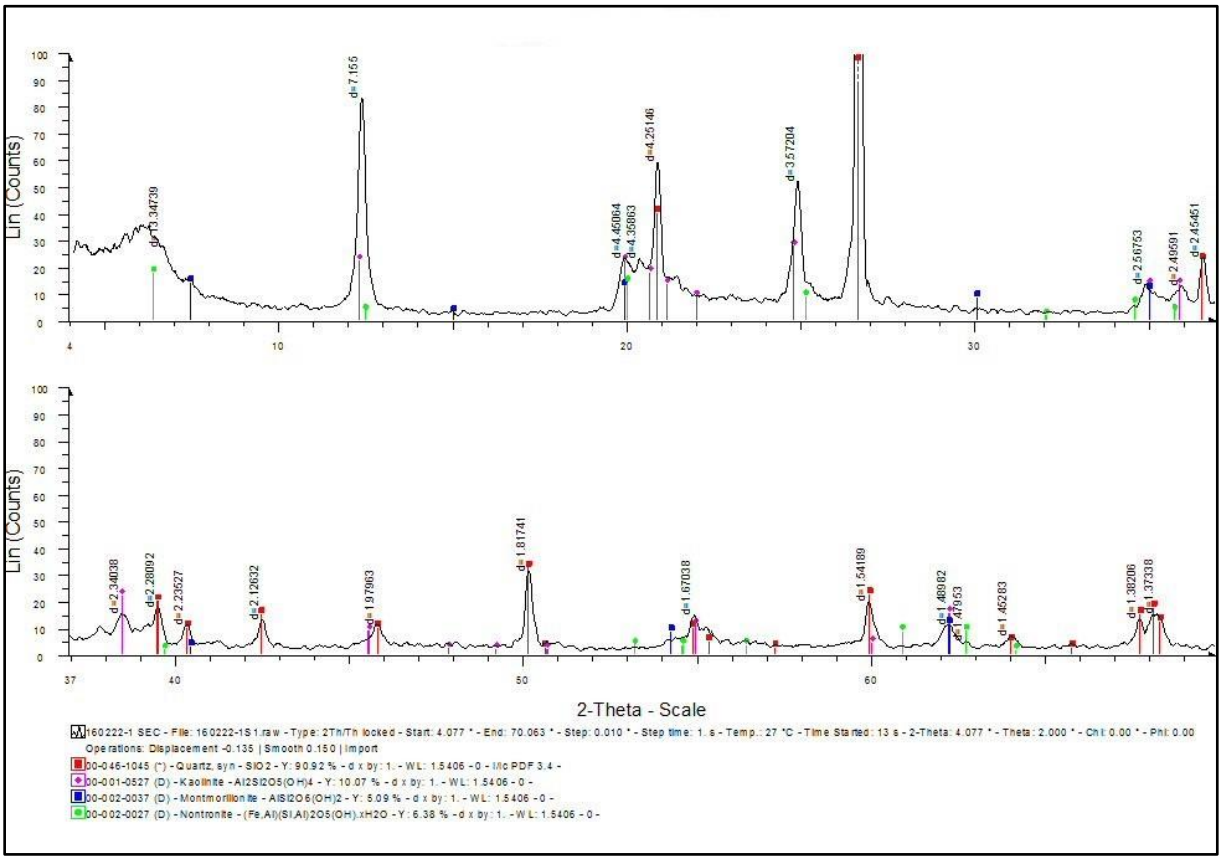


Figure 2-16. Diffractogramme de rayons X de la terre crue de La Rouchouze

2.6.2.3 Valeur au bleu de méthylène et limite de liquidité

La limite de liquidité a été déterminée pour cette argile. Elle se situe à environ 43% c'est-à-dire un comportement de type kaolinite pour laquelle la limite de liquidité est située entre 30 et 110 et inférieur aux limites des argiles actives telles que la montmorillonite qui sont supérieures à 60 (Summerfield 2001).

Afin de confirmer la prépondérance de la présence majoritaire de kaolinite, la valeur au bleu de méthylène Vb a été calculée et se situe aux alentours de 2,5 indiquant également une présence très majoritaire de kaolinite par rapport à la montmorillonite (Tableau 2-4).

	Argile(%)	Silts(%)	Sable(%)	Graviers(%)	Valeur au bleu de méthylène	Limite de liquidité d'Atterberg (%)
Présent projet	35	40	25	0	2,5	43
Terre-chanvre (clay1) Matthias Degrave (Degrave-lemeurs et al. 2018)	37	17	37	9	2,47	
Terre-chanvre (Clay2) Matthias Degrave (Degrave-lemeurs et al. 2018)	6	44	42	8	2,2	
Terre-chanvre Brahim Mazhoud (Brahim Mazhoud et al. 2017)	14	86	0,2	0	2,33	36
Terre-typha(Samin 2017)	62	25	13	0		50,15

Tableau 2-4. Comparaison des proportions granulaires, limites de liquidité et valeurs au bleu de méthylène de terres-allégées avec différents granulats végétaux

Le Tableau 2-4 nous permet de constater que l'aspect cohésif des terres liantes pour l'élaboration de mélange de terre-allégées se caractérise par la recherche d'une terre avec une forte proportion d'argile sauf pour le projet de Degrave pour lequel les terres à disposition ne contenaient pas de forte quantité d'argile. De même, les fines argilo-calcaires utilisées par Mazhoud issues de carrières d'extraction de pierres calcaires ne présentent pas de fortes proportions d'argile mais une part en limon très élevée participant à l'aspect cohésif pour une quasi absence de sable. Les valeurs au bleu de méthylène caractérisant à la fois l'activité et la quantité d'argile sont toutes inférieures à 3 caractérisant des argiles non gonflantes.

2.7 Elaboration des biocomposites

2.7.1 Mise en œuvre artisanale

Un des objectifs du projet BIOCOMP, est l'optimisation de la formulation artisanale des éco-matériaux utilisé depuis quelques années sur le territoire du Pays Touraine Côté Sud par différents artisans dont Éric Julien. Cet artisan a développé une expérience dans la mise en œuvre des matériaux biosourcés notamment de bétons végétaux à base de chaux, terre crue et de différents granulats végétaux : chènevotte et roseau sous forme de banchage. Cette technique a servi de base pour l'élaboration des formulations et leur optimisation vis-à-vis du liant et des granulats choisis dans le cadre du projet BIOCOMP. En premier lieu des essais ont été effectués sur des chantiers existants permettant d'aboutir au protocole de mise en œuvre suivant : après l'ajout d'une barbotine d'accroche à l'argile sur le mur existant, le mélange terre-granulats végétaux est tassé entre le mur et une planche de coffrage, le coffrage étant remonté au fur et à mesure que le remplissage avance et le décoffrage s'effectuant généralement dans les 24h.
Dès la phase de préparation du projet, il est apparu nécessaire pour les partenaires de travailler sur les possibilités de mécaniser l'application des enduits isolants (soit par compactage soit par projection) afin de pouvoir diminuer la durée et le coût de mise en œuvre, d'obtenir une application de l'enduit plus homogène, moins dépendante de la personne qui met en œuvre et de diminuer la quantité d'eau introduite dans le mortier, ceci avec pour objectif d'optimiser les temps de séchage et de réduire les possibilité d'apparition de moisissures. Autre atout, la mécanisation pourrait permettre de diminuer le pourcentage du liant (terre-crue) augmentant par la même la résistance thermique du mortier isolant.

Les formulations retenues pour cette thèse ont été développées conjointement avec M. Éric Julien en vue de partir des contraintes rencontrées sur un chantier d'éco-construction. Jusqu'à présent, les bétons végétaux sont mis en œuvre par banchage intérieur sur un mur existant (Figure 2-17).

Figure 2-17. Mélange terre-colza banché, presbytère de Chédigny (37)

L'objectif de l'élaboration au laboratoire est de minimiser la quantité du liant pour optimiser les performances thermiques, d'améliorer le protocole de mélange en utilisant, pour s'adapter aux conditions rencontrées sur les chantiers, des proportions volumiques de granulats, d'eau et de liant tout en minimisant les difficultés de malaxage. En effet, lorsque l'eau est ajoutée dans le mélange avec les granulats avant la terre crue, les granulats (*a fortiori* la moelle de tournesol) vont avoir tendance à l'absorber ce qui empêchera l'hydratation des plaquettes d'argile nécessaire pour lui permettre de remplir ses propriétés cohésives. De même, si l'eau est ajoutée en proportions trop importantes, des problématiques de retrait au séchage apparaitront et dans le cas contraire (proportions insuffisantes), le mélange ne sera pas homogène dans la bétonnière (présence d'agglomérats de terre et de granulats).

2.7.2 Saisonnalité, lutte contre les moisissures

Un des freins à l'utilisation des mélanges terre-végétaux par les artisans sur le territoire du Sud Touraine est lié à sa lente cinétique de séchage et à ses conséquences : les délais de finalisation des chantiers (réoccupation des espaces et application de l'enduit de finition) ainsi que le risque élevé d'apparition de moisissures. A l'heure actuelle, la technique de banchage ne peut être appliquée que pour des chantiers permettant une excellente ventilation et préférentiellement

dans une période située entre les mois d'avril et septembre afin de disposer d'une période suffisante pour le séchage de l'enduit isolant et minimiser le risque de développement fongique.

2.7.3 Optimisation des proportions et masses volumiques au laboratoire

Les proportions massiques liant:granulats utilisées lors de cette étude sont 2,4:1. Elles correspondent à la proportion volumique optimisée pour le mélange argile:colza de 1:8 dans l'optique d'obtenir une cohésion suffisante du biocomposite permettant sa mise en œuvre tout en minimisant la quantité de terre-crue apportée. Ce ratio déterminé au laboratoire après plusieurs essais permet une reproductibilité relativement aisée sur le chantier, la force de compactage manuelle nécessaire pour atteindre la masse volumique d'enduits banché correspondante peut dépendre d'une personne à l'autre. En suivant cette proportion massique pour les autres composites, nous aboutissons à une proportion volumique argile:écorce de tournesol de 1:4,7 et 1:26 pour le mélange argile:moelle de tournesol (la singularité du mélange argile:moelle est traitée ci-dessous). Le protocole de fabrication et le principe de la mise en œuvre est similaire à la technique du banchage utilisée sur chantier (Figure 2-17). Le compactage s'effectue dans le sens parallèle à celui du mur, ce paramètre est à prendre en compte lors des essais thermiques afin de mesurer le flux dans le sens perpendiculaire au mur et pour les essais de compression dans le sens parallèle au mur. Afin d'obtenir des mélanges homogènes pour chaque biocomposite en suivant ces proportions, différents volume de mélange argile:végétaux ont été versés dans un moule de même volume, la contrainte de compactage variant pour obtenir des mélanges de masses volumiques différentes répertoriées dans le Tableau 2-5. Il sera donc préférable que cette contrainte de compactage au laboratoire soit respectée sur le chantier dans un processus de mécanisation pour éviter les changements de propriétés des matériaux après la mise en œuvre. L'utilisation de granulats très légers tels que la moelle de tournesol entraine la nécessité d'utiliser un volume de mortier plus important pour atteindre une masse similaire induisant des contraintes de compactages élevées pour atteindre certaines masses volumiques. D'un autre côté, l'utilisation des granulats les plus denses tels que l'écorce de tournesol ne permet pas d'atteindre une homogénéité suffisante pour élaborer les échantillons de faible masse volumique du fait du volume insuffisant de mortier. A cause de ces contraintes, certaines masses volumiques peuvent être atteintes avec certains mélanges mais pas avec d'autres.

Les proportions massiques eau:liant sont de 1:1, elles correspondent à la proportion permettant de réaliser un mélange argile:colza 1:2,4. Le choix a été effectué de maintenir cette proportion pour les différents mélanges entrainant des différences d'homogénéité comme cela a également pu être constaté lors d'approches similaires dans d'autres études (Palumbo Fernández 2016), (Chabannes et al. 2015). Cette différence étant engendrée non seulement par la variation des proportions volumiques liant:granulats mais également par la capacité variable d'un granulat à l'autre d'absorber l'eau liquide. Cette proportion a par conséquent due être réduite à 1:0,7 pour les mélanges à base d'écorce de tournesol fortement compactés : de SBD8 à SBD10. En effet, l'eau en excès a tendance à s'écouler du moule lorsque les proportions de 1:1 sont respectées pour ces masses volumiques.

La notion de biocomposite (matrice:fibre ou matrice:granulat) peut être questionnée ici car les proportions de terre crue utilisée possédant une forte proportion d'argile sont minimisées afin d'optimiser les performances thermiques. La terre crue aurait davantage vocation à être considérée comme un enrobage des granulats plutôt qu'une matrice. Ceci est *a fortiori* le cas pour les mélanges argile:moelle possédant des proportions volumiques de 1:26. Lorsque les mélanges SP sont faiblement compactés − comme c'est le cas pour les composites de proportion SPD2 − la cohésion des granulats ne peut se faire uniquement par la quantité d'argile présente en faible quantité. Un second mécanisme de cohésion entre ici en compte et permet l'élaboration de composite de très faible masse volumique. Les sucres tels que la pectine ainsi que la lignine présents en forte quantité dans la moelle de tournesol sont relâchés en présence d'eau et font office d'adhésifs (Yan et al. 2016) avec une compression à froid. Cette propriété a également été constatée et appliquée pour l'élaboration de panneaux de particules à base de moelle de tournesol sans liant élaborés par thermocompression après avoir été humidifiés (Vandenbossche et al. 2012),(Lenormand et al. 2014), (Lenormand et al. 2017) ou lors de l'élaboration de composites à base de paille et de chènevotte sans ajouts de liant (Collet et al. 2016).

2.7.4 Protocole de fabrication des échantillons au laboratoire

Dans un premier temps, l'eau et l'argile sont mélangées en totalité. En effet, du fait de la forte hygroscopicité de granulat végétaux (notamment la moelle de tournesol, ceux-ci auraient tendance à absorber une grande quantité d'eau empêchant une bonne hydratation de l'argile tout en renforçant les risques de fissuration dus au phénomène de retrait. Les granulats végétaux

préalablement séchés à l'étuve à 40°C ne sont versés que 10 minutes plus tard afin de laisser le temps à l'argile de s'hydrater. La quantité de mortier désirée est pesée et versé dans le moule cylindrique ou parallélépipédique en plusieurs fois selon le volume de mortier. Lors de l'élaboration des éprouvettes cylindriques utilisées pour les essais de compression, une réhausse est de même nécessaire, un premier compactage est réalisé jusqu'à la hauteur de l'éprouvette, puis une deuxième quantité de mortier est introduite dans la réhausse et le mortier est de nouveau compacté pour arriver à la hauteur de l'éprouvette à l'aide de la presse Zwick/Roell Z010 (Figure 2-18 et 2-19). Ainsi, 2 compactages sont nécessaires pour aboutir aux éprouvettes cylindriques de diamètre 110mm et de hauteur 220mm pour les échantillons SPD2, RSD5 et SBPD5 et 3 remplissages et compactages sont nécessaires pour obtenir les éprouvettes SBD8. Les contraintes de compactage engendrées par la presse pour aboutir aux masses volumiques (SBD8, RSD5, SBPD5 et SPD2) pour les moules cylindriques sont respectivement de (0,392, 0,044, 0021 et 0,009 MPa). Les échantillons pour les essais de sorption-désorption, porosité et acoustiques ont été compressés manuellement en respectant les mêmes masses volumiques.

Masse volumique (kg/m^3)	Biocomposites
D1 300kg/m^3	SPD1
D2 450kg/m^3	SPD2
D3 600kg/m^3	SPD3
D4 730kg/m^3	SPD4, SBPD4, SBD4, RSD4
D5 760kg/m^3	SPD5, SBPD5, SBD5, RSD5
D6 790kg/m^3	SPD6, SBPD6, SBD6, RSD6
D7 830kg/m^3	SBPD7, SBD7, RSD7
D8 860kg/m^3	SBPD8, SBD8, RSD8
D9 890kg/m^3	SBD9
D10 930kg/m^3	SBD10

Tableau 2-5. Nomenclature des masses volumiques des mortiers à l'état frais

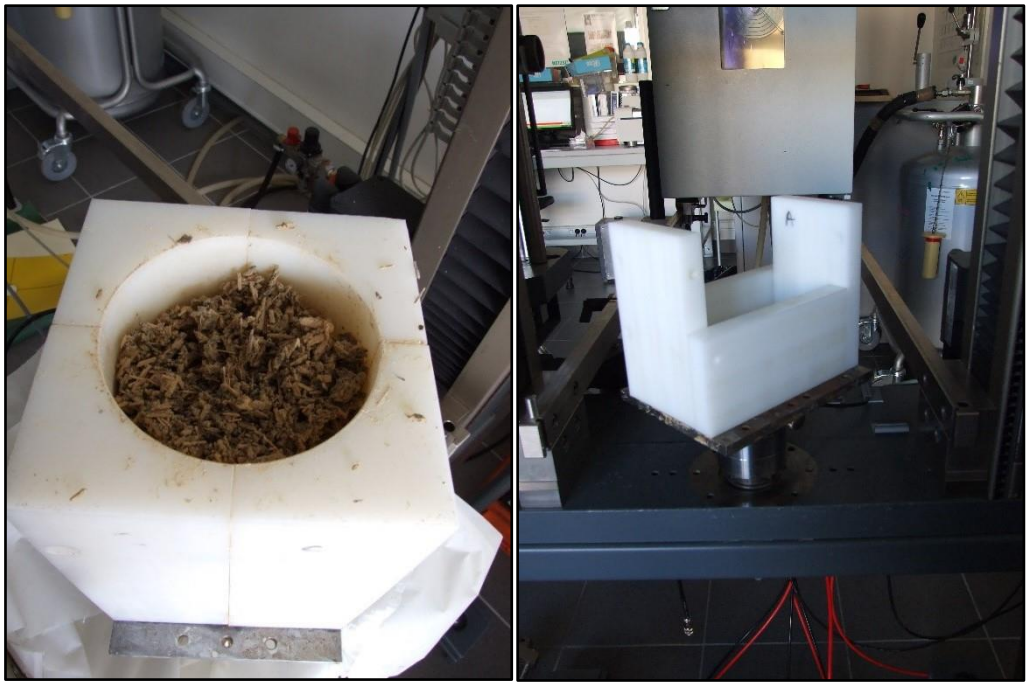


Figure 2-18. Préparation des échantillons avec la presse Zwick/Roell Z010 press. A gauche: cylindrique, droite : paralllélépipédique (mesures thermiques)

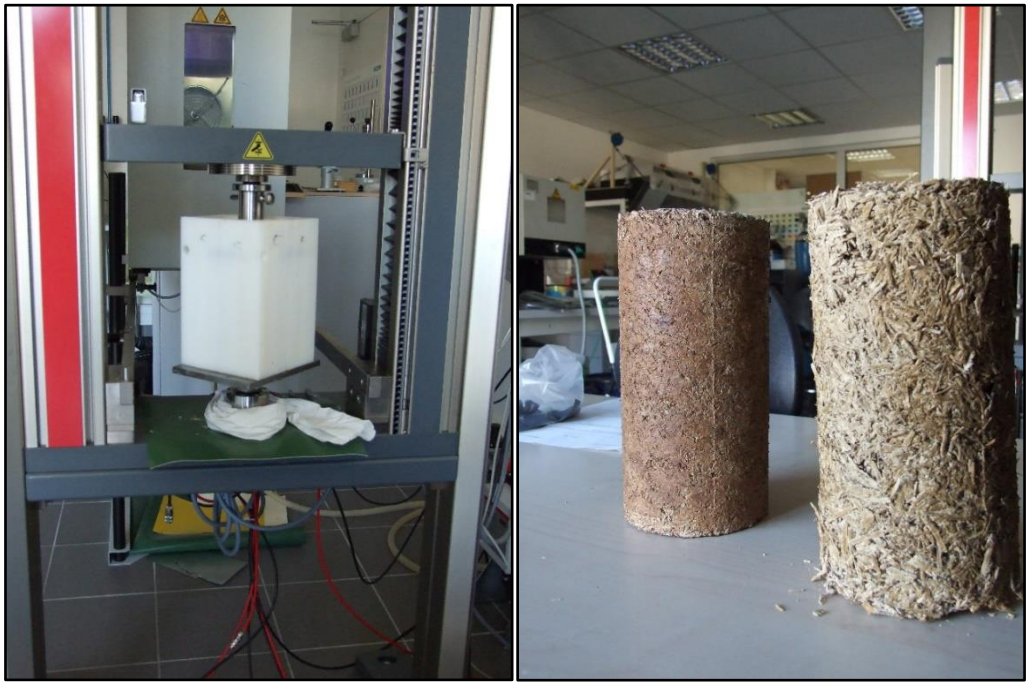


Figure 2-19. A gauche, compactage des échantillons cylindriques, à droite: de gauche à droite échantillons SBD8 et RSD5

La mise en place manuelle des bétons végétaux ne permet pas en termes de rendement (temps de travail, coût) de répondre au besoin massif de rénovation énergétique tel qu'appelé dans la loi sur la transition énergétique. Conscient de la réflexion à apporter pour améliorer la productivité, les responsables de ce projet au niveau de la collectivité du Sud Touraine souhaite que la mise en œuvre soit mécanisée. La mécanisation envisagée nécessite l'utilisation d'une projeteuse associée à une bétonnière ou bien à un ensemble cardeuse/malaxeur. En effet, différents outils de projection ont été développés pour les bétons de chanvre avec des principes différents (mélange en amont ou en sortie de buse), aboutissant à des résultats différents en termes de quantité d'eau/liant ou d'homogénéité de l'enduit. Les partenaires du projet n'ont pas encore arrêté leur choix sur une machine spécifique ce choix impactera la formulation du biocomposite, on peut en attendre une diminution de la quantité de liant ainsi qu'une orientation différentes des granulats (la modification des propriétés mécaniques dues au sens de compactage étant investiguée dans le chapitre III). Des prélèvements d'échantillons après la mise en œuvre seront réalisés afin d'étudier l'effet du procédé de mécanisation sur les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques au laboratoire de mécanique LaMé.

2.8 Conclusion

Les matériaux isolants pour la construction issus de la mise en place d'une filière de production d'éco-matériaux à l'échelle d'un territoire subissent une forte hétérogénéité engendrée par le type de granulats utilisé ainsi que par le processus de leur récolte-transformation et également par le type de liant rencontré sur chaque territoire ou encore leur mise en œuvre. La différence de masse volumique d'un granulat végétal broyé liée à la présence de pores de grande dimension à un autre peut varier d'un facteur 8 provocant de fortes disparités en termes de conductivité thermique ou d'absorption capillaire et, nécessite l'ajustement des formulations et mises en œuvre. Nous allons étudier dans les chapitres suivants l'influence de ces écarts sur les performances des biocomposites aux niveaux thermiques hydriques, mécaniques et acoustiques.

3 Caractérisation thermique, hydrique et mécanique des biocomposites

3.1 Introduction

Ce chapitre aborde les propriétés thermiques, hydriques et mécaniques des différents biocomposites élaborés à partir des composants (granulats et liant) et selon le protocole présenté dans le chapitre précédent.

En effet, les attentes et les axes de recherches faisant fréquemment l'objet de publications concernant les matériaux d'isolations biosourcés tournent majoritairement autour de leurs propriétés thermiques, viennent ensuite des critères de résistance à la compression paramètres nécessaires pour évaluer le caractère autoporteur voire structurel de ces matériaux selon les conditions de leur utilisation (Figure 3-1).

D'un point de vue des performances thermiques, selon la norme NF P75-101, un produit destiné au bâtiment peut être considéré comme un isolant thermique si sa conductivité thermique est au plus égale à 0,065 $W.m^{-1}.K^{-1}$ à 10°C et si sa résistance thermique est au moins égale à 0,5 $m^2.K/W$. Un enduit léger de conductivité supérieure à cette valeur sera qualifié de correcteur thermique. La masse volumique des matériaux biosourcés, critère abondamment étudié dans la littérature scientifique (Figure 3-1), est reliée à la fois aux performances thermiques et mécaniques. Il s'agit d'un paramètre pertinent pour comparer un béton végétal élaboré avec des matières premières similaires ainsi que les matériaux caractérisés dans d'autres laboratoires de recherche, c'est ce que nous avons voulu montrer ici.

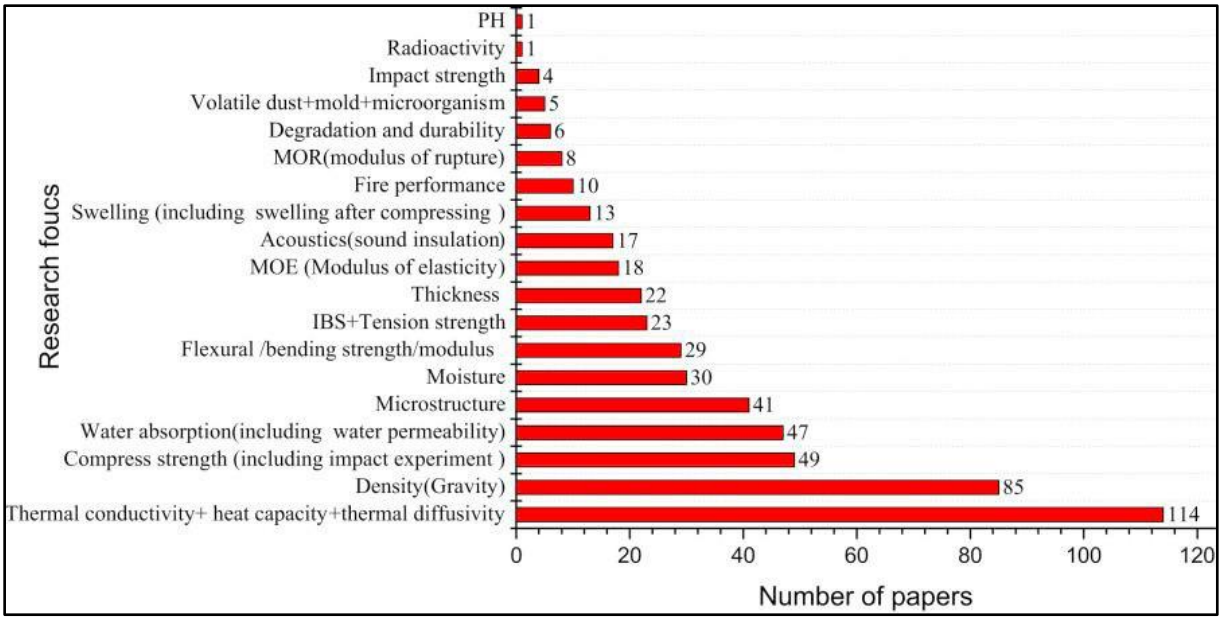


Figure 3-1. Critères d'étude des matériaux d'isolation biosourcés (Liu et al. 2017)

La plupart des matériaux isolants destinés pour une utilisation dans l'habitat n'ont pas pour vocation de soutenir la structure des édifices, selon les usages (dalles, murs, combles, panneaux), les contraintes mécaniques exigées vont différer. Dans le cas d'enduits isolants, le matériau devra au minimum supporter son poids propre, la norme allemande DIN 4108-10 concernant les matériaux d'isolation thermiques manufacturés fixant la contrainte à atteindre en compression simple à 0,02MPa.

La quantité d'eau présente à l'instant t dans un matériau d'isolation impacte sensiblement ses performances thermiques, les concepteurs peuvent chercher à profiter de cette caractéristique et favoriser l'absorption de vapeur d'eau avec pour objectif de lisser les pics d'humidité à l'intérieur des pièces d'un habitat pour en augmenter le confort et profiter des effets thermodynamique liés à la condensation et l'évaporation de vapeur d'eau dans les matériaux engendrant des phénomènes passifs de climatisation. La connaissance des propriétés hydriques de ces matériaux est par conséquent nécessaire pour l'interprétation de ses performances.
La connaissance des phénomènes de capillarité propres aux matériaux d'isolation à base de végétaux est également cruciale car outre les performances thermiques fortement dégradées d'un matériau poreux imbibé d'eau, lorsque le liant utilisé est à base de terre-crue, la dégradation des propriétés mécaniques est un risque élevé menaçant l'intégrité du matériau et

enfin, le risque d'un développement de moisissures comme cela a été constaté sur des bétons de chanvres exposés aux intempéries (Jay et al. 2017) avec des conséquences néfastes pour l'aspect sanitaire de la qualité de l'air intérieur.

Optimiser les matériaux à base de terre-crue pour améliorer leurs performances mécaniques et diminuer leur sensibilité à l'immersion est devenu un axe de recherche pour l'amélioration des techniques de construction à base de terre crue. L'emploi d'additifs est une piste d'optimisation des mélanges terre-végétaux qui a été investiguée également ici de manière exploratoire et qui demanderait une étude plus approfondie dans un avenir immédiat ; de même l'empreinte environnementale engendrée par la stabilisation est questionnée.

3.2 Caractérisation thermique

3.2.1 Protocole de caractérisation thermique

Différents échantillons prismatique de section 8,5x15,0cm et de hauteur 8,5cm ont été préparés avec la presse Zwick/Roell Z010, les masses volumiques des échantillons à sec indiquées dans le Tableau 2-5 ont été obtenues en faisant varier la quantité de mortier ayant été compactée dans les moules parallélépipédiques. Les essais de conductivité thermique ont été réalisés sur des échantillons dans un premier temps placés à l'étuve à 50°C jusqu'à stabilisation de leur masse. La méthode du fil chaud a été utilisée en appliquant la norme ASTM D5930-97. La sonde du conductimètre NEOTIM FP2C a été placée entre deux échantillons de même géométrie de manière symétrique (Figure 3-2). L'hypothèse principale de cette méthode est de considérer le volume étudié comme étant cylindrique avec un transfert de chaleur radial unidimensionnel et une longueur de fil infinie.

Figure 3-2. A gauche, conductimètre NEOTIM FP2C, à droite, sonde fil chaud placée entre deux échantillons de RSD5

La conductivité thermique est déterminée en considérant l'évolution de la température en fonction du logarithme du temps. La conductivité thermique est alors déduite de l'augmentation de la température en fonction du temps. La valeur moyenne de la conductivité thermique a été déterminée à partir de 7 mesures pour chaque matériau.

3.2.2 Influence de la masse volumique.

La porosité totale des bétons de chanvre pour une formulation de type mur se situe entre 70 et 80% (Glé 2014), celle des biocomposites de cette étude mesurée au porosimètre à air, varie entre 64 et 90% (Tableau 3-1).

Biocomposites	Porosité %	Incertitude
SBD8	64,27	0,02
RSD5	77,11	0,04
SBDPD5	73,96	0,04
SPD2	90,23	0,15

Tableau 3-1 . Porosité totale des biocomposites

Comme attendu, la conductivité thermique des différents biocomposites est dépendante de leur masse volumique (Figure 3-3). Pour des masses volumiques variant de 235 à 714 kg/m^3, la conductivité thermique augmente de 0,040 à 0,162 W.m^{-1}.K^{-1}. L'évolution des comportements des différents composites en fonction de l'augmentation de leur masse volumique révèle

quelques différences comme on peut le constater sur la Figure 3-3. Il convient de noter que les masses volumiques apparentes indiquées dans la Figure 3-3 ont été obtenues par pesées des échantillons secs et mesures géométriques, des phénomènes de retrait et gonflement différents selon les matériaux vont intervenir expliquant pourquoi, par conséquent, les matériaux élaborés à masse volumique équivalente représentées dans le Tableau 2-5 vont développer des masses volumiques différentes à sec selon les matériaux. Les mélanges avec du colza ou de la moelle de tournesol sont moins affectés par l'augmentation du compactage. Ces granulats vont avoir tendance à induire un gonflement une fois le démoulage effectué, la masse volumique va donc être moindre qu'un échantillon moins sujet au gonflement comme ceux contenant l'écorce. De même, les composites composés d'écorce possèdent une plus grande proportion volumique de liant (argile), lorsque la force de compactage va augmenter, les porosités inter-granulaires vont être réduites avant les porosités intra-granulaires entrainant par la même l'apparition de ponts thermiques et l'augmentation plus rapide de la conductivité thermique.

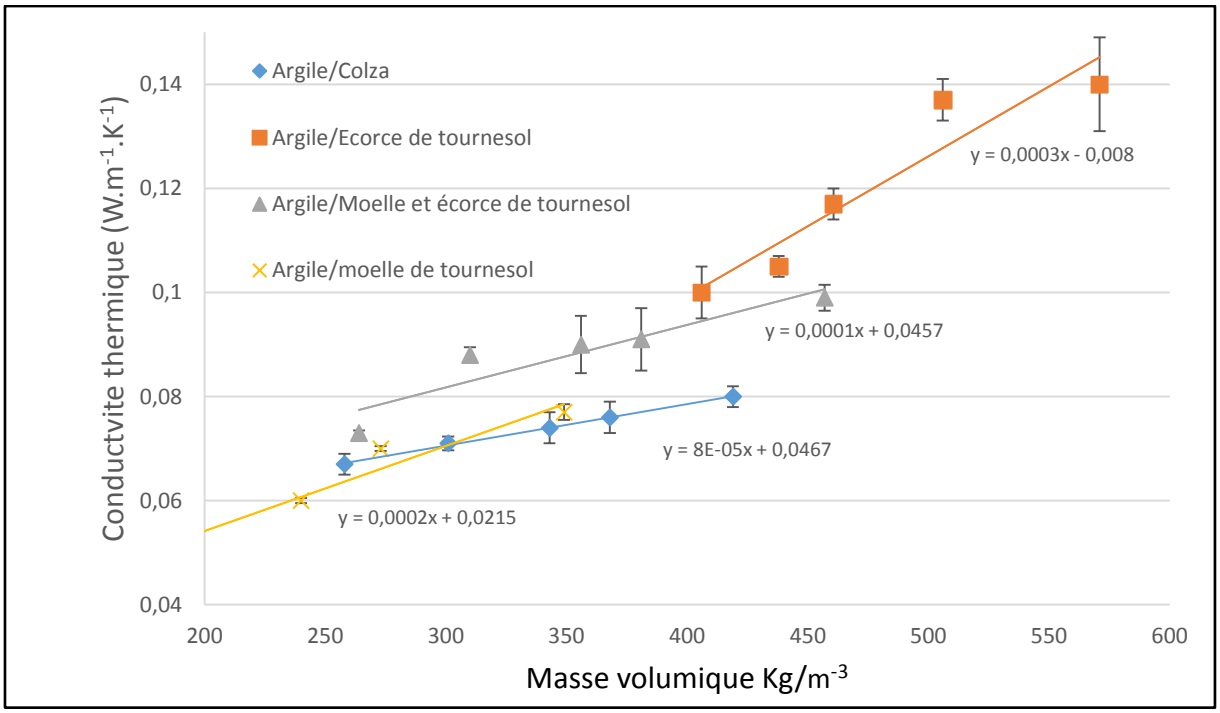


Figure 3-3. Conductivité thermique des biocomposites en fonction de leur masse volumique

Afin de comparer le comportement thermique des biocomposites de cette étude en fonction de leur masse volumique avec d'autres bétons végétaux et d'autres liants et granulats, les résultats

de différentes études sont exposés dans le Tableau 3-2 pour des masses volumiques comprises entre 200 et 800 kg/m^3.

Ces résultats sont également présentés sur la Figure 3-4 avec la relation empirique (Equation 5) établie par Cérézo (Cerezo 2005) et mentionnée dans différents travaux de recherche afin de comparer la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de différents bétons végétaux (Ratiarisoa et al. 2016), (Walker & Pavía 2014), (Collet & Pretot 2014), (Laborel-Préneron et al. 2016), (Labat et al. 2016). Cette relation établie initialement pour les bétons de chaux-chanvre tend à être corrélée pour d'autres liants et d'autres granulats végétaux. Toutefois, le comportement des différents composites de cette étude de masse volumique et de granulats différents ne peut pas être représenté par une relation linéaire, une relation polynomiale $\lambda = 5.10^{-7}*\rho^2 - 0{,}0002*\rho + 0{,}0855$ donne une meilleure tendance. Les échantillons ayant la masse volumique la plus élevée (SBD8) et la moins élevée (SPD2) sont davantage en corrélation avec la relation de Cérézo que les échantillons avec des masses volumiques intermédiaires entre 350 et 550 kg/m^3.

La diminution de la masse volumique des échantillons présentés dans cette étude est due à un volume de porosité plus important. L'augmentation du volume de pore est due à l'utilisation de granulats possédant une plus grande porosité parallèlement à l'augmentation de leurs proportions volumiques induisant une conductivité thermique plus faible.

$$\lambda = 0{,}0002*\rho + 0{,}0194 \quad \textbf{(5)}$$

Granulats	Liant	Masse volumique kg/m^3	Conductivité thermique W/(m.K)	Références
SP (SPD2)	Argile	235	0,055	Etude actuelle
RS (RSD5)	Argile	438	0,0712	Etude actuelle
SBP (SBPD5)	Argile	512	0,0878	Etude actuelle
SB (SBD8)	Argile	714	0,1578	Etude actuelle
bois	Argile-ciment	490	0,100	Al Rim et al (Al Rim et al. 1999)
bois	Argile-ciment	700	0,14	Al Rim et al (Al Rim et al. 1999)
bois	Argile-ciment	681	0,18	Bouguerra et al (Bouguerra et al. 1998)

bois	Argile-ciment	621	0,170	Bouguerra et al (Bouguerra et al. 1998)
chènevotte	Liant Pouzzolanique	573	0,137	The Manh (Dinh The 2014)
chènevotte	Chaux	627	0,138	Walker et al (Walker & Pavía 2014)
Moelle de tournesol	Liant Pouzzolanique	670	0,132	Magniont et al (Magniont et al. 2012)
Moelle de tournesol	Liant Pouzzolanique	777	0,176	Magniont et al (Magniont et al. 2012)
Lavande non traitée	Liant Pouzzolanique	577	0,142	Ratiarisoa et al (Ratiarisoa et al. 2016)
Lavande traitée	Liant Pouzzolanique	661	0,162	Ratiarisoa et al (Ratiarisoa et al. 2016)
Terre-paille	Argile	241	0,071	Labat et al (Labat et al. 2016)
Terre-paille	Argile	381	0,088	Labat et al (Labat et al. 2016)
Terre-paille	Argile	403	0,099	Labat et al (Labat et al. 2016)
Terre-paille	Argile	449	0,104	Labat et al (Labat et al. 2016)
Terre-paille	Argile	531	0,120	Labat et al (Labat et al. 2016)

Tableau 3-2. Comparaison de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique de différents bétons végétaux issus de la littérature

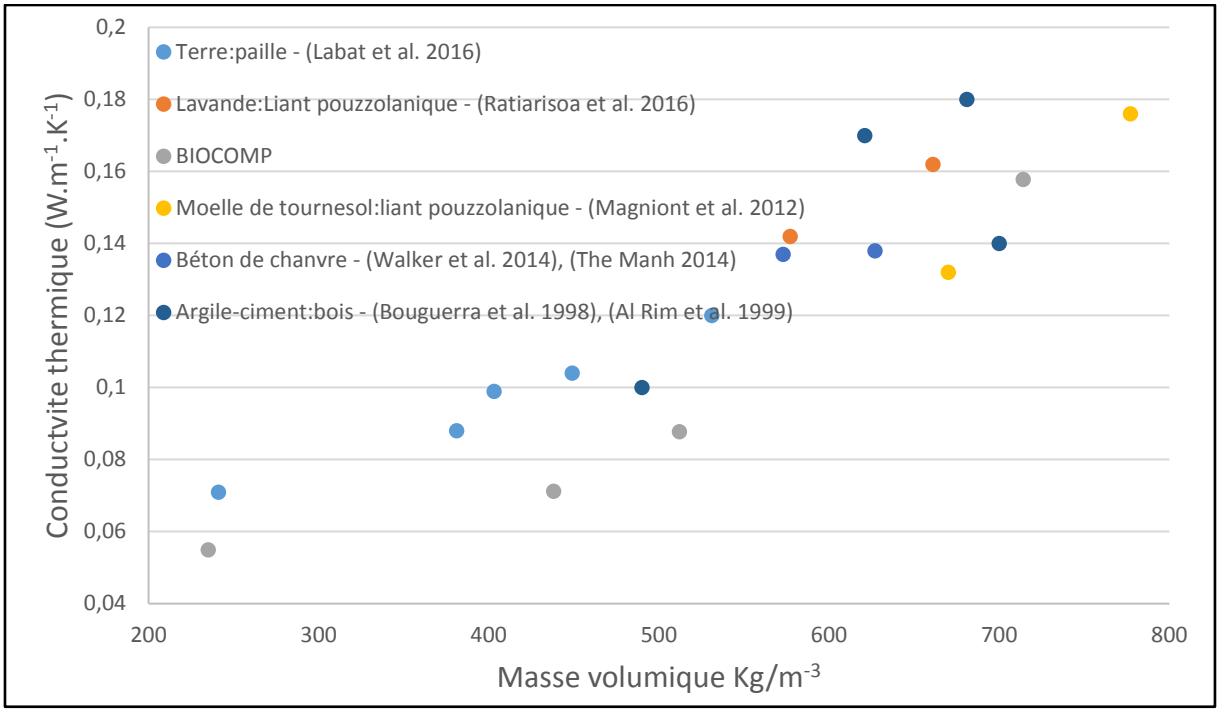


Figure 3-4. Conductivité thermique en fonction de la masse volumique de mélanges terre-végétaux et autres bétons végétaux

3.2.3 Influence de la teneur en eau et de l'humidité relative

Dans l'objectif de caractériser la conductivité thermique à différents taux d'humidité, les échantillons de RSD5, SPD5, SBPD5 et SBD8 ont été exposés à 3 humidités relatives différentes (66%, 86% et 98%) dans des dessiccateurs avec différentes solutions salines. En plus de ces 3 humidités, les échantillons ont été placés d'une part dans une étuve à 50°C jusqu'à stabilisation de leur masse pour obtenir la conductivité à sec et d'autre part imbibés d'eau jusqu'à saturation. Les échantillons placés dans les atmosphères à différentes humidités ont été pesés jusqu'à stabilisation de leur masse, processus qui a pris plusieurs semaines. Après stabilisation, la conductivité thermique des différents échantillons a été mesurée puis placée sur la Figure 3-5 en fonction de l'humidité relative et de la teneur en eau. Les mélanges à base de colza (RSD5) présentent la plus forte augmentation de leur conductivité thermique entre l'état sec et 98% d'humidité relative (+48,5%) tandis que des augmentations de 34,5%, 32% et 17,5% de la conductivité thermique du SBD8 sont mesurées sur le même intervalle pour les échantillons respectifs SBD8, SBPD5 et SPD2. Cette augmentation est corrélée avec l'augmentation de la quantité d'eau présente dans les échantillons. Comme cela a été expliqué

par El Fgaier et al. (El Fgaier et al. 2016), l'augmentation de la quantité d'eau qui vient remplir progressivement les pores en chassant l'air présent induit une augmentation de la conductivité thermique du matériau, la conductivité thermique de l'eau étant plus importante que celle de l'air. De plus, à partir d'une certaine humidité relative, la vapeur d'eau se condensant dans les pores provoque l'apparition de ménisque générant des ponts thermiques (El Fgaier et al. 2016).

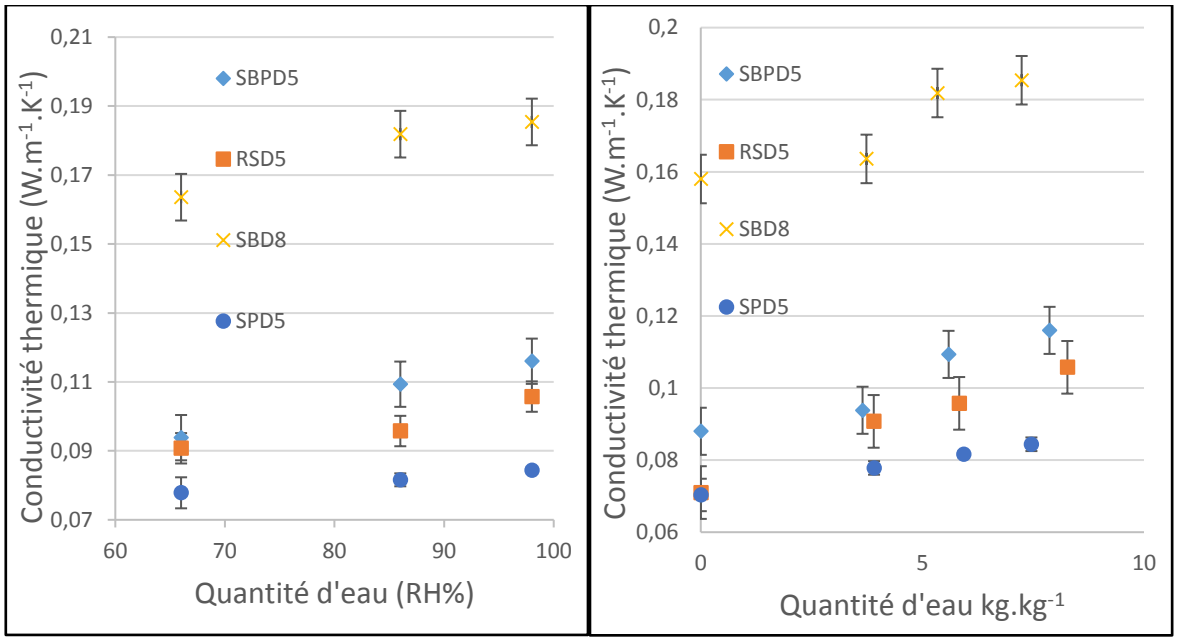


Figure 3-5. Influence de l'humidité relative (à gauche) et de la quantité d'eau (à droite) présentes dans les échantillons sur leur conductivité thermique

3.3 Caractérisation mécanique

3.3.1 Protocole de caractérisation mécanique

Les essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur des éprouvettes de 11cm de diamètre et 22cm de hauteur. Trois éprouvettes ont été réalisées pour chaque mélange les tests de compression ont été menés à une vitesse de 500µm/min (i.e. $\dot{\varepsilon}\sim 5.6s^{-1}$, les essais sont donc considérés comme quasi-statiques) avec une presse Instron 8872 possédant une cellule de charge 25 KN. Les essais ont été réalisés après 28j et la stabilisation de la masse des éprouvettes (différence inférieure de 0,10% entre 2 pesées).

3.3.2 Module de Young et contrainte maximale de compression

Le module d'Young des différents composite est présenté sur la Figure 3-6 en fonction de leur masse volumique. Il a été obtenu à partir des pentes des courbes de contrainte/déformation entre

7.10^{-3} and 2.10^{-2} MPa (Figure 3-7). Les profils des différentes courbes de cette dernière figure indiquent une réponse non-linéaire prononcée des mélanges terre-végétaux.

Contrairement aux bétons de chaux-chanvre (Niyigena 2016), (Cerezo 2005), aucune relation n'a pu être définie entre la masse volumique et le module d'élasticité. Les modules de Young obtenus sont nettement moins élevés que ceux observés pour des bétons de chaux-chanvre (Niyigena et al. 2016). Ces valeurs se rapprochent de celles obtenues sur des éprouvettes de terre-chanvre non stabilisées situées entre 2,6 et 3,3 MPa (Brahim Mazhoud et al. 2017) lorsque le module est calculé à partir de la pente à l'origine. Cette différence de propriété peut être expliquée par la faible proportion volumique de liant par rapport au granulat. En effet, comme relevé par Tai Thu Nguyen (Nguyen 2010), lorsque les rapports liant/granulats sont faibles, un squelette rigide de liant ne peut pas prendre forme autour des granulats. Dans notre cas, le liant a un rôle cohésif mais n'est pas présent en quantité suffisante pour augmenter la résistance les mélanges, ceci est d'autant plus prégnant pour les composites à base de granulats légers présents en proportion volumique plus importante et pour lesquels les modules d'élasticité et contrainte de compression maximale sont les plus faibles.

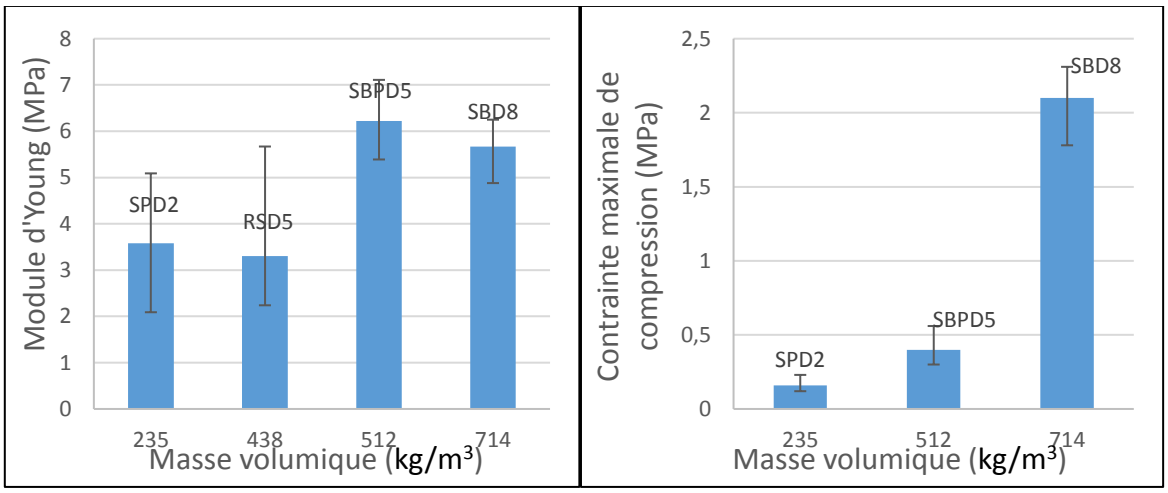


Figure 3-6. Module d'élasticité et contrainte maximale de compression en fonction de la masse volumique des mélanges terre-végétaux respectivement à gauche et à droite

Le composite RSD5 a un comportement en compression différent des autres mélanges. En effet, l'augmentation continue de la contrainte de compression n'induit pas de rupture fragile mais une déformation fragile continue (voir courbe Figure 3-7) et avec un comportement compactant visible sur l'état de l'échantillon (cf. Figure 3-8). Ce comportement est généralement constaté pour les bétons de terre/chanvre, chaux/chanvre ou plâtre/paille pour des mélanges très poreux

avec de faibles ratios de liant :granulats (Brahim Mazhoud et al. 2017), (Nguyen 2010), (Arnaud & Gourlay 2012), (Belayachi et al. 2016). En comparant les résultats avec ceux obtenus pour des mélanges terre/chanvre non stabilisés (Brahim Mazhoud et al. 2017) (Vinceslas et al. 2017) ou de bétons de chaux-chanvre (Collet 2015), (Niyigena et al. 2016), nous pouvons constater que la contrainte de compression maximale de SBPD5 autour de 0,4MPa se situe dans des valeurs similaires à celles-ci tandis que pour l'échantillon SPD2 plus léger, la rupture intervient pour une contrainte plus faible de 0,16MPa. Concernant les modules d'élasticité, les valeurs des composites de cette étude situées entre 3 et 6MPa sont bien inférieures aux valeurs relevées pour les bétons de chanvre (Niyigena et al. 2016) de l'ordre 30 à 40MPa sans précontraintes.

Les composites SBD8 dont la masse volumique est plus importante atteignent une valeur de compression maximale de 2,1MPa nettement supérieure aux autres composites. Le volume de liant est plus important pour ce mélange permettant la mise en place d'un squelette plus rigide autour des granulats. De plus, la contrainte de compactage lors de l'élaboration de SBD8 est de 0,392MPa soit nettement supérieure à celle des autres composites (0,009, 0,021 et 0,044 pour respectivement SPD2, SBPD5 et RSD5) ce qui corrobore les travaux menés par Tai Thu Nguyen sur les bétons de chanvre précontraints qui possèdent une valeur maximale de compression supérieure (Nguyen 2010). En effet, pour un ratio massique chaux:chènevotte de 2,15 (la masse volumique de la chènevotte de 102kg/m^3 se rapprochant de celle de l'écorce de tournesol) et un rapport eau:liant de 0,93, lorsque la contrainte de compactage passe de 0,4 à 1,4 MPa, la résistance en compression progresse de 0,4 à 1,4Mpa à 28 jours. Toutefois, contrairement à ce qui été constaté dans cette thèse (Nguyen 2010) avec un liant à la chaux, dans notre cas cette augmentation de contrainte n'a pas engendré d'augmentation du module d'élasticité. L'augmentation de la masse volumique des composites est reliée à leur résistance à la compression mais pas à leur rigidité (Figure 3-7).

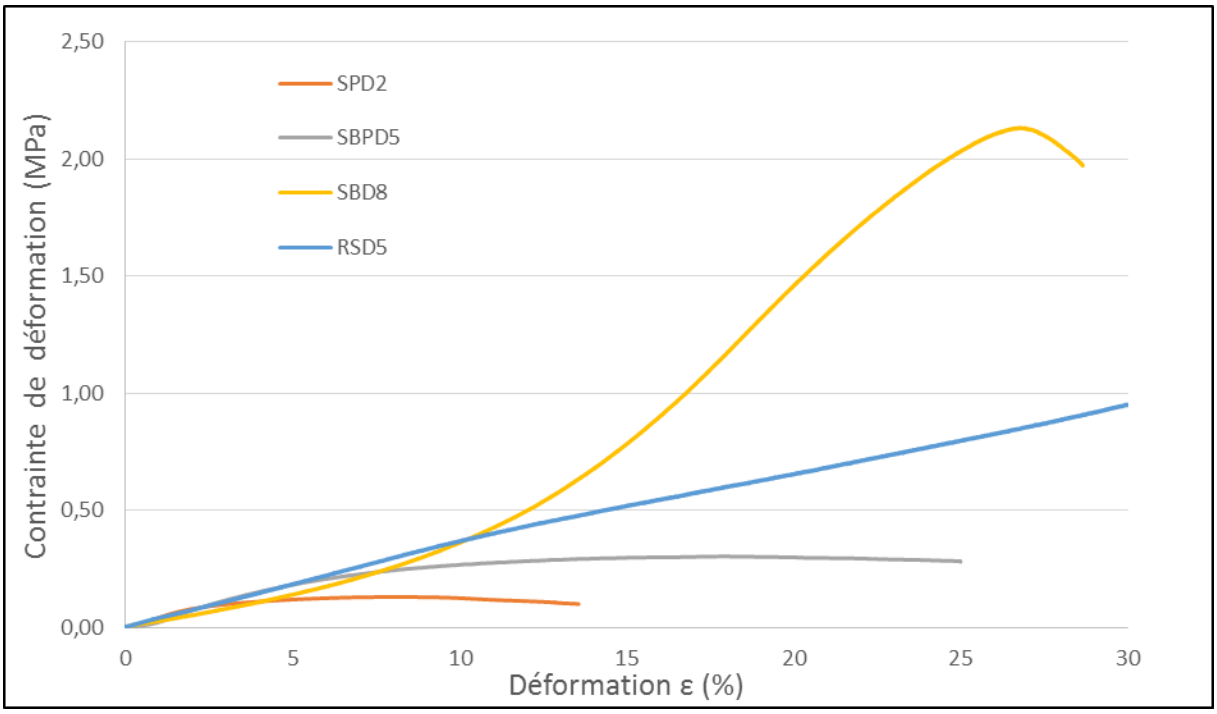


Figure 3-7. Courbes contraintes/déformations des biocomposites SPD2, RSD5, SBPD5 et SBD8

La rupture des biocomposites lorsqu'elle a lieu (pour les mélanges ne contenant pas de colza) se développe à l'extrémité de l'échantillon qui était située en haut de l'éprouvette lors de son compactage comme cela a également été constaté par Kashtanjeva et al. (Kashtanjeva et al. 2015) pour des bétons de chanvre. Il s'agit de l'endroit où la masse volumique est moins importante et où apparaitront les premières fissures. L'effet tonneau dans ce cas semble minimisé par rapport aux fragilités induites par la différence de masse volumique le long de l'éprouvette et de la faible proportion de liant.

Les échantillons RSD5 à base de paille de colza quant à eux vont fortement se comprimer de façon irréversible sans pour autant atteindre de rupture comme cela a pu être observé par Belayachi et al concernant des bétons de paille (Belayachi et al. 2013).

Figure 3-8. Echantillon SBPD5 après rupture (à gauche) et RSD5 sans rupture mais à forte déformation (à droite)

3.3.3 Influence du sens de compactage sur les caractéristiques mécaniques des bio-composites :

La procédure d'élaboration des échantillons par compactage dans un moule reproduit la mise en œuvre par banchage parallèle au mur tel qu'elle est employée sur les chantiers de rénovation. Ce sens de compactage induit une orientation préférentielle des fibres, *a fortiori* pour les fibres longues comme la paille de colza. L'objet de l'expérimentation suivante est d'évaluer la différence de comportement mécanique du biocomposite le plus anisotrope à savoir RSD5 en fonction de son sens de compactage donc de l'orientation de la paille. Les éprouvettes RSD5-H issues du moule horizontal (Figure 3-9) sont placées verticalement lors des essais de compression. Ceci permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques de compression concernant un sens de compactage perpendiculaire au mur ce qui pourrait être le cas pour la mise en place d'un enduit projeté ou bien la préfabrication de caissons remplis horizontalement. Le moule vertical permet d'obtenir des éprouvettes RSD5-V préfigurant le sens pour lequel les essais mécaniques précédents ont été réalisés correspondant aux contraintes subies par un matériau lors d'un banchage classique.

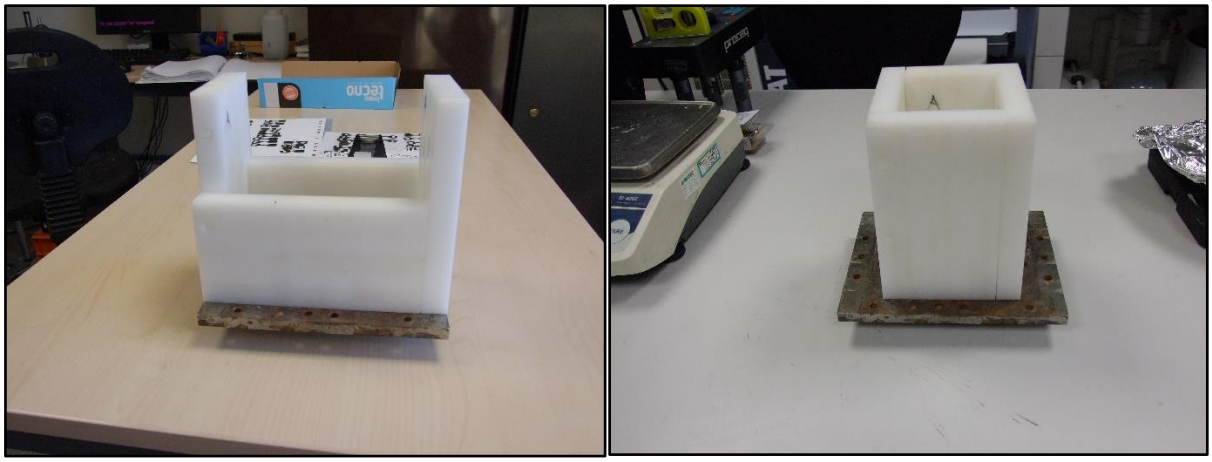


Figure 3-9. Moule pour compactage horizontal (RSD5-H) à gauche et vertical (RSD5-V) à droite

Nous avons soumis les échantillons rectangulaires (RSD5-H et RSD5-V) de dimensions (7,5x 7,5 x 15cm) à un essai de compression simple, les courbes de contrainte en fonction de la déformation sont présentées dans la Figure 3-10.

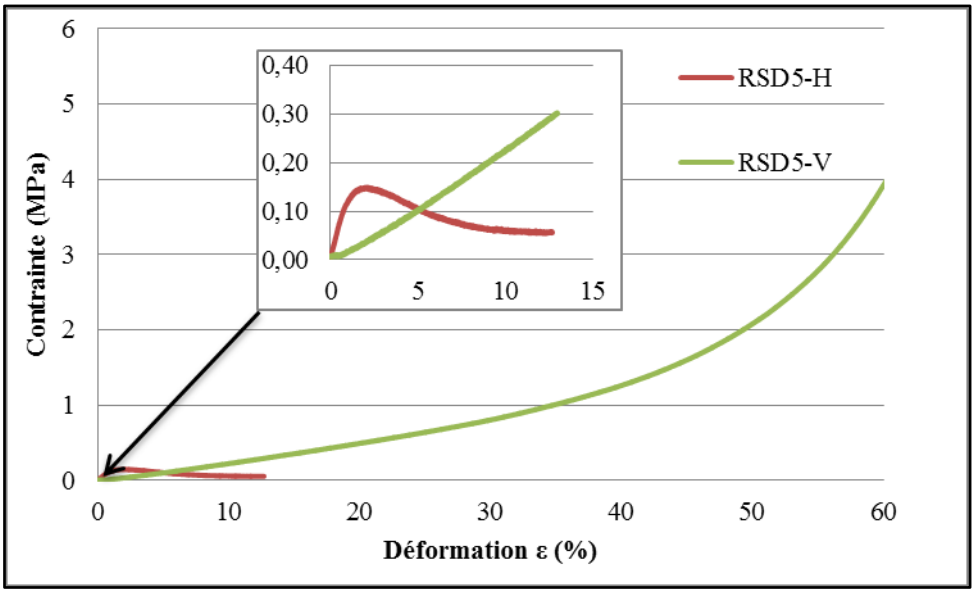


Figure 3-10. Courbe de la contrainte en fonction de la déformation pour les deux sens de compactage : verticale et horizontal

Biocomposite	E(MPa)	σ_{max} (MPa)
RSD5-V	2,5	5,43
RSD5-H	12,77	0,15

Tableau 3-3. Caractéristiques mécaniques des échantillons compactés verticalement et horizontalement

Le module d'Young des éprouvettes horizontales présentant une orientation des fibres de colza dans la direction de compression est 5 fois plus élevé que lorsque les fibres se trouvent orientées perpendiculairement à la direction de compression (Tableau 3-3). La rigidité de la paille de colza qui reprend l'essentiel des contraintes de compression étant plus importante dans le sens vertical qu'horizontal.

Les échantillons RSD5 cylindriques testés précédemment ne présentaient pas de rupture, les pailles de colza étaient orientées perpendiculairement à la direction de compression, ce qui correspond aux éprouvettes RSD5-V parallélépipédiques testées ici présentant un comportement similaire. Lorsque les granulats de colza sont orientés dans la même direction que la direction de compression (composite RSD5-H), nous observons cette fois-ci une rupture se propageant sur toute la hauteur de l'éprouvette (Figure 3-12). Le profil des courbes RSD5-H et RSD5-V diffère fortement, lorsque les fibres sont orientées verticalement (Figure 3-12), le matériau ne présente pas de caractère ductile contrairement à son comportement lorsque les fibres sont orientées horizontalement. Cette différence de comportement peut se révéler importante à prendre en compte lorsque le bâtiment est utilisé en zone à risque sismique élevé. En effet, dans le cas d'une ossature noyée dans un béton végétal, le remplissage terre-végétaux pourra reprendre plus aisément une variation d'efforts lorsque ses fibres sont orientées perpendiculairement à la direction de sollicitation.

Figure 3-11. Essai de compression sur échantillon RSD5-H à gauche et RSD5-V à droite

3.4 Caractérisation hydrique : courbes de sorption/désorption

3.4.1 Courbes de sorption/désorption

Les isothermes de sorption/désorption ont été obtenues à partir de la méthode gravimétrique en utilisant des solutions salines. Afin de contrôler l'humidité relative à différentes atmosphères, des échantillons de chaque composite (SPD5, RSD5, SBPD5 et SBD8) ont été placés dans des dessiccateurs contenant différentes solutions salines permettant d'obtenir des taux d'humidité différents. Les échantillons ont été placés dans les atmosphères suivantes : 12, 33, 44, 55, 66, 76, 86, 93 et 98 %. Avant d'être placés dans les dessiccateurs correspondants, les échantillons ont été séchés à l'étuve à 60°C pendant 24h. De façon complémentaire, l'autre moitié des échantillons a été saturée en eau par immersion totale et placée dans des dessiccateurs aux mêmes ambiances hydriques. Chacun des échantillons est pesé deux fois par jour jusqu'à stabilisation de leur masse. Cette stabilisation pouvant intervenir après plus de 2 mois pour que la masse des échantillons se stabilise aux plus hautes humidités relatives. Toutefois, cette

stabilisation intervient plus rapidement que pour les bétons chaux-chanvre et chaux-colza (Rahim et al. 2015), plus spécifiquement pour les hautes valeurs d'humidité relative.

Les courbes de sorption/désorption ont été tracées pour les composites RSD5, SBPD5, SPD5 et SBD8 sur la Figure 3-13, celles-ci peuvent être classées de type II selon la classification de l'IUPAC (Sing 1982), ce profil d'isothermes de sorption/désorption est caractéristique des matériaux ligno-cellulosiques (Palumbo Fernández 2016). Le degré de saturation a été obtenu en appliquant le rapport de la masse de l'échantillon à l'équilibre moins la masse de l'échantillon sec sur la masse obtenue à saturation moins la masse de l'échantillon sec. Les comportements des différents échantillons en termes de profils de courbes de sorption et désorption sont similaires entre 30 et 76%HR. Au-delà de 80% d'humidité relative, les différences en terme de taille de pores, réseaux poreux et porosité vont avoir une influence sur l'apparition ou non d'effets bouteille d'encre engendrant des aires d'hystérésis plus importantes (El Fgaier et al. 2016). Les forces capillaires vont ainsi différer d'un matériau à l'autre. Nous pouvons ainsi constater que l'aire d'hystérésis entre la sorption et la désorption est plus importante concernant le matériau SBD8 possédant des pores de plus faible dimension que ceux des autres matériaux.

Sari Airaksinen (Airaksinen 2005) associe les hystérésis entre les isothermes de sorption et de désorption aux condensations capillaires qui ont lieu dans les structures poreuses: l'évaporation capillaire se produit pour de plus faibles pressions relatives que la condensation capillaire (El Fgaier et al. 2016). L'eau est condensée dans les pores sous forme liquide et se retrouve ainsi piégée des indices d'activité de l'eau inférieurs auxquels elle devrait être libérée. Les courbes d'hystérésis observées aux hautes humidités relatives lorsqu'observées dans les bétons fortement poreux sont généralement expliquées par une combinaison de phénomènes, les hystérésis liées aux condensations capillaires, celles liées aux angles de contact et enfin aux phénomènes dits de bouteille d'encre (Daian 1986), (El Fgaier et al. 2016).
Les isothermes de sorption/désorption des composites RSD5 et SBPD5 sont très similaires, on n'observe pas de différences notables selon les granulats végétaux utilisés, cette absence d'influence du type de granulats a été observée par ailleurs par Belayachi et al. (Belayachi et al. 2015) concernant le type de granulats utilisé dans des bétons de paille. L'aire d'hystérésis engendrée par le composite SBD8 est légèrement plus importante, on observe de même de plus

fortes valeurs de saturation en eau que pour les autres composites aux humidités relatives élevées. Ceci peut être dû à l'apparition de ponts capillaires à de plus faibles valeur d'humidité relative du fait de la présence de pores de plus petites dimensions dans l'écorce de tournesol que dans les autres granulats étudiés.

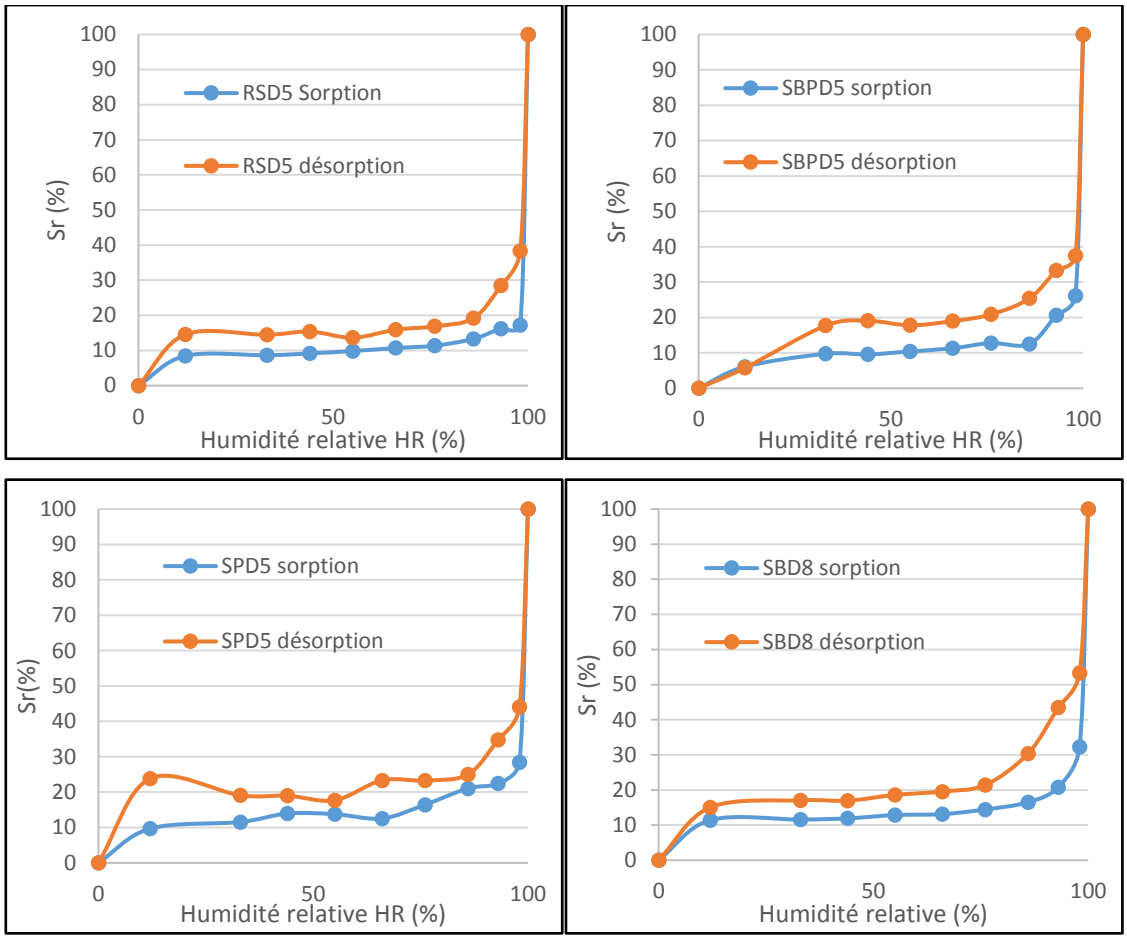


Figure 3-12. Isotherme de sorption/désorption des biocomposites SPD5, RSD5, SBPD5 et SBD8

3.4.2 Absorption capillaire

Outre les capacités des bétons végétaux à réguler l'humidité ambiante sous forme de vapeur d'eau, la connaissance de leur capacité à entrainer des remontées capillaires dans les parois voire à se désagréger en cas d'immersion partielle permettront d'anticiper des consignes de mise en œuvre. Les maitres d'œuvre et artisans préconisent en effet de protéger les matériaux biosourcés exception faite du liège, de tout contact avec l'eau liquide celle-ci pouvant entrainer

leur dégradation directe ou via l'apparition de moisissures. L'ajout d'additifs peut permettre de limiter certaines dégradations dues à l'érosion et au ruissellement comme c'est le cas du silicate d'éthyle (Tiennot et al. 2014). Les mesures d'absorption capillaire ont été par conséquent réalisées sur deux échantillons de chacun des biocomposites RSD5, SBPD5, SPD2 et SBD8 sans additif (échantillons témoins), et par la suite sur des échantillons avec 5% de chaux (nom biocomposite + suffixe L) et 5% de silicate d'éthyle (nom biocomposite + suffixe SE) après une cure de 28 jours pour examiner l'influence de ces deux additifs sur le comportements des biocomposites En effet les premiers essais réalisés sur les biocomposites ont montré la dégradation des échantillons pendant les essais de capillarité. Ces observations nous ont conduits à réfléchir à stabiliser les matériaux en ajoutant les additifs (chaux ou silicate d'éthyle) utilisés dans la littérature.

La terre crue a été substituée par des mélanges terre-chaux à 5% massique de :

- Chaux aérienne formulée Tradical PF80 M. Cette chaux contient 85% de chaux aérienne et 15% de liants hydrauliques, elle est conforme aux DTU 26.1 et aux règles professionnelles d'exécution des bétons de chanvre.
- Silicate d'éthyle issu du produit Estel 1100 consolidant pour pierre calcaire de CTS. Il s'agit d'une solution de white spirit à 70% de tétra-éthoxy-silane et 5% de polysiloxanes oligomères.

Le mode de préparation des éprouvettes cylindriques est similaire à celui des éprouvettes sans additifs avec un temps de cure de 28 jours nécessaire pour la chaux et le silicate d'éthyle. 3 éprouvettes de chaque mélange ont été réalisées.

3.4.2.1 Méthode

Afin d'observer les phénomènes de capillarité sur les biocomposites des échantillons cylindriques de 5,5cm de diamètre et 10cm de hauteur ont été préparés selon le protocole décrit précédemment. Après avoir déposé des échantillons en étuve à 60°C, ceux-ci ont été placés au contact d'une nappe d'eau libre de 5mm de hauteur maintenue à niveau constant dans une pièce à atmosphère contrôlée à 23°C (Figure 3-14). Ce mode opératoire a été mis en place sur les différents échantillons utilisés, ceux sans additif (témoins), ceux contenant la chaux et ceux avec silicate d'éthyle.

Des mesures de masse ont ensuite été réalisées à intervalles de temps croissants. La masse initiale du tamis mouillé ayant préalablement été mesurée

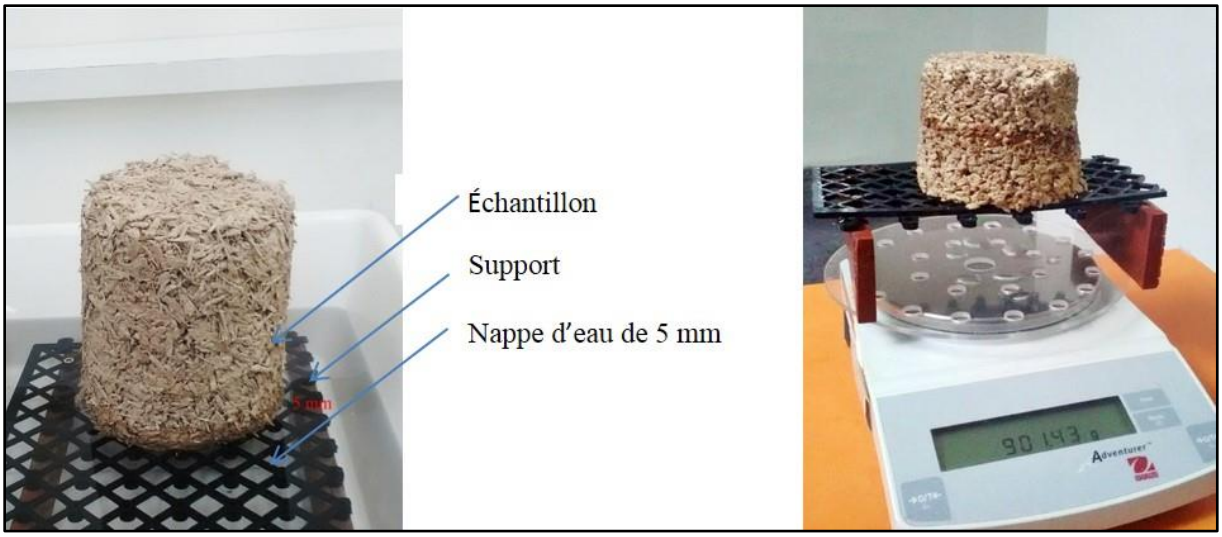


Figure 3-13. Dispositif de l'essai de remontées capillaires

3.4.2.2 Résultats

Les courbes d'absorption d'eau représentées sur la Figure 3-15, nous permettent de constater la présence d'une phase d'absorption rapide sur environ 30 minutes suivie par une diminution de la valeur de la pente avant d'aboutir à un plateau lorsque l'absorption atteint une hauteur de remonté capillaire maximale. La valeur de la pente de ces courbes lors de la première phase d'absorption nous permet d'aboutir aux coefficients d'absorption qui sont indiqués dans le Tableau 3-4 conjointement avec la hauteur maximale de remontée capillaire.

Le coefficient d'absorption capillaire a été obtenu à partir des mesures de masses d'eau spécifiques absorbées par unité de surface comme fonction de la racine carrée du temps. Le coefficient de transfert liquide A_c est obtenu à partir de la pente de la courbe d'absorption de masse lorsqu'elle est exprimée en fonction de la racine carrée du temps tel que décrit par l'Equation 6 :

$$Ac = \frac{\Delta m}{A.\Delta\sqrt{t}} \qquad \textbf{(6)}$$

Avec:
A_c (kg/(m^2.s$^{1/2}$): coefficient d'absorption d'eau
Δm (kg): masse d'eau absorbée
A (m^2): surface de contact entre l'eau et l'éprouvette
t (s) : durée d'absorption

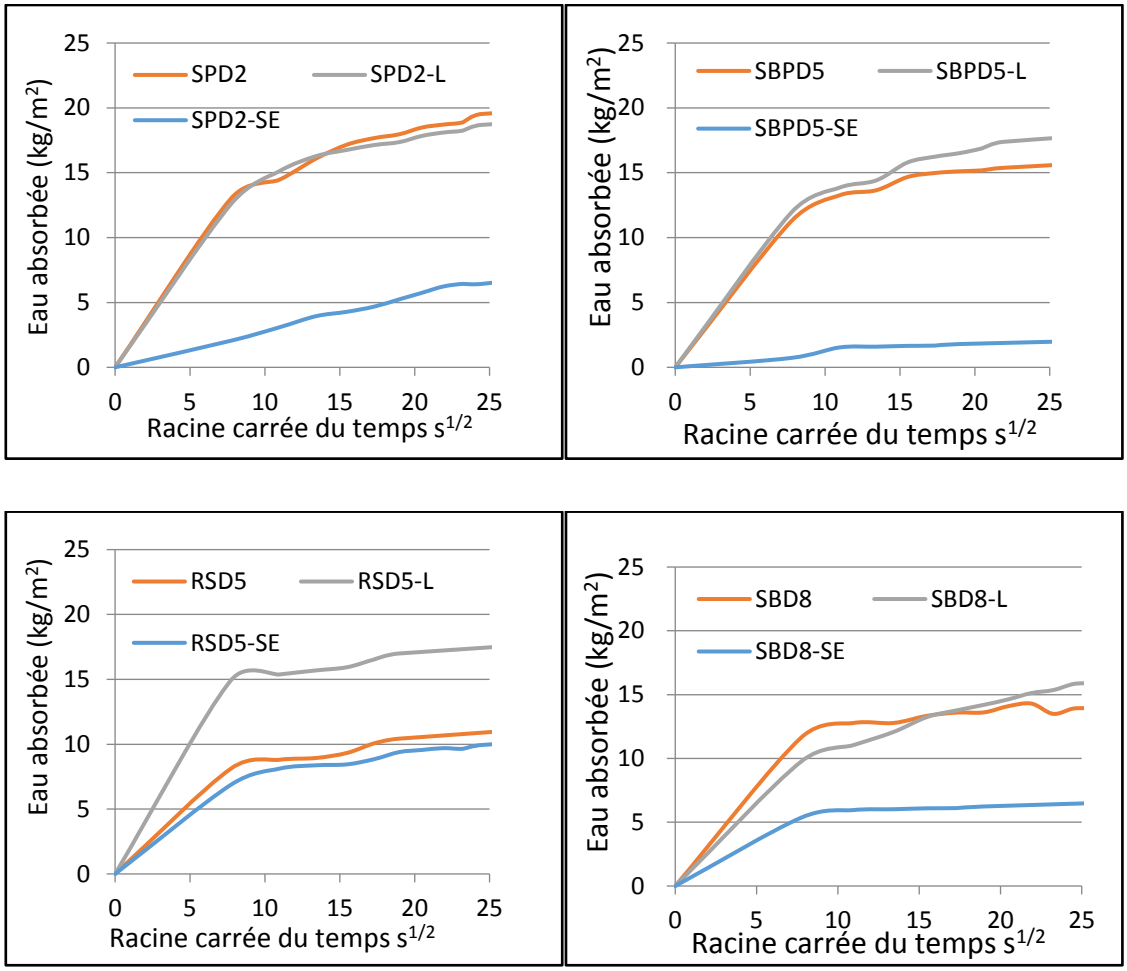


Figure 3-14. Courbes d'absorption d'eau par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps pour les différents biocomposites (témoins, avec chaux (-L) et silicate d'éthyle (-SE))

Les graphiques précédents montrent l'évolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour les différents échantillons.

Nous remarquons que les plus fortes quantités d'eau absorbées sont engendrées par SPD2. Cette valeur est en accord avec les propriétés intrinsèques d'absorption des granulats présentées dans le chapitre II. Cette forte capacité d'absorption est accompagnée d'un gonflement important des composites SPD2. L'influence de la porosité des granulats végétaux sur les propriétés capillaires des bétons végétaux a été constatée par ailleurs concernant les mélanges chaux-chanvre et chaux-colza, le composant chaux-colza étant plus sensible que celui en chaux-chanvre aux remontées capillaires(Rahim, Douzane, A. D. Tran Le, et al. 2016).

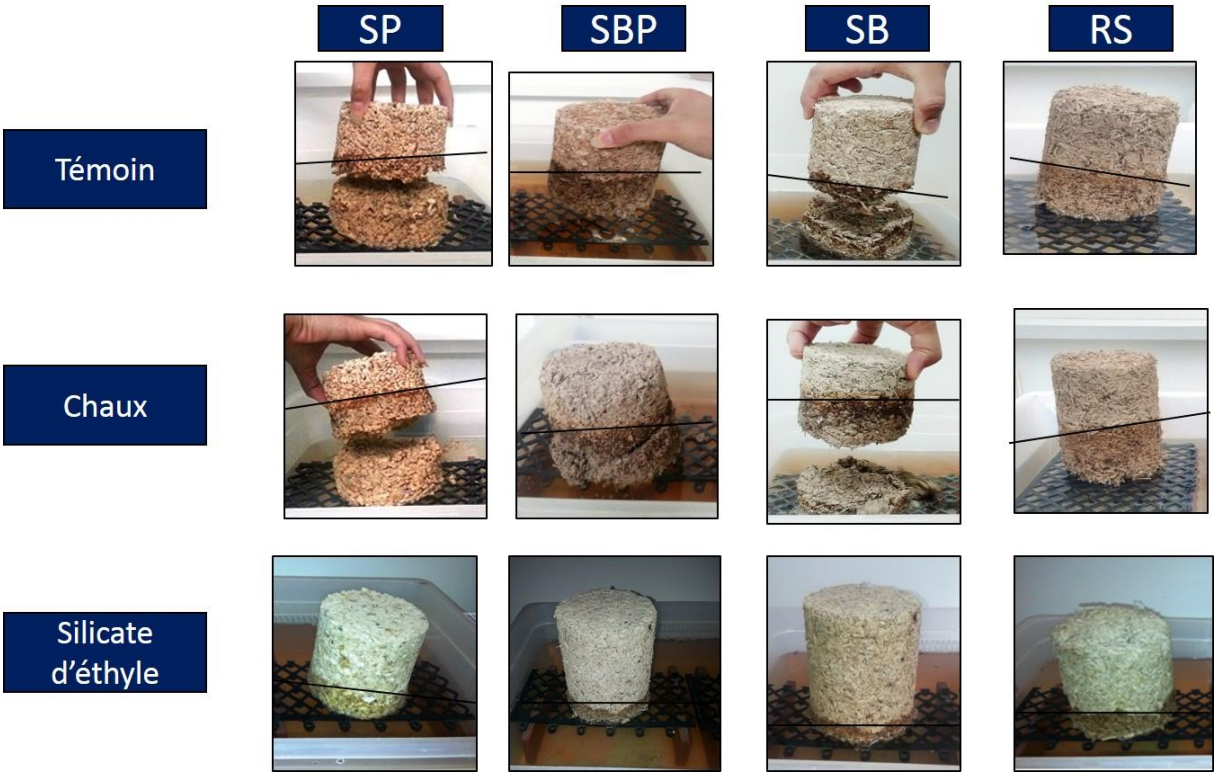


Figure 3-15. Hauteur atteintes en fin d'essai par les remontés capillaires des biocomposites avec sans additifs

Les coefficients d'absorption d'eau des échantillons avec silicate d'éthyle sont sensiblement moins élevés que ceux similaires des échantillons témoins et avec chaux, les écarts sont d'autant plus marqués pour les composites SBD8 possédants la plus forte proportion de terre-crue (Figure 3-17). La différence de coefficient d'absorption entre les matériaux et selon les additifs utilisés est indiquée dans le Tableau 3-4. On constate que les remontées capillaires sont moins importantes pour les biocomposites traités au silicate d'éthyle (Tableau 3-4). De même, une différence de hauteur des remontées capillaires est constatée entre les échantillons sans additifs et les échantillons traités à la chaux. Dans le cadre des matériaux utilisés ici, l'addition de chaux au liant terre-crue ne diminue pas la capillarité et favorise le délitement des composites contrairement à ce qui a été observé par Cédric Flament sur les fines de lavage (Flament 2012), avec un ajout de chaux favorisant au contraire des remontées capillaires plus hautes comme cela a également été constaté par Gomes et al. lors de l'ajout de chaux ou de ciment à l'argile dans des murs en pisé (Idalia Gomes et al. 2016). Cette augmentation de la capillarité conjointement avec l'ajout d'additifs est due selon eux à une augmentation de la porosité liée à la floculation de l'argile et peut engendrer une dégradation plus rapide des murs en pisé, les

auteurs conseillent par conséquent d'effectuer les réparations de murs en pisé sans utiliser des additifs comme la chaux ou le ciment. D'un autre côté, le gel de silice engendré par l'interaction du silicate d'éthyle avec les plaquettes d'argile (principalement la kaolinite) a permis de rigidifier le squelette granulaire (voir chapitre III) tout en diminuant la porosité inter-granulaire et, par conséquent, diminuant la capillarité des matériaux traités.

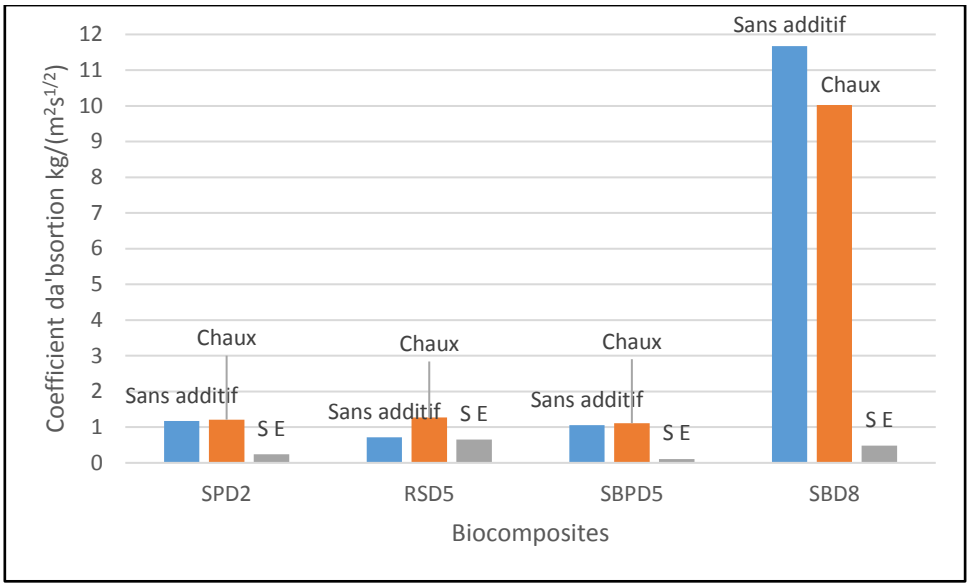


Figure 3-16. Coefficients d'absorption des différents composites avec et sans additifs

Biocomposites	Coefficients d'absorption capillaire ($kg/(m^2s^{1/2})$)	Hauteur maximale de remontée capillaire (mm)
SPD2	1,39	60
SPD2-L	1,43	58
SPD2-SE	0,28	55
RSD5	0,72	55
RSD5-L	1,27	70
RSD5-SE	0,65	28
SBPD5	1,06	56
SBPD5-L	1,11	68
SBPD5-SE	0,11	21
SBD8	11,67	52
SBD8-L	10,02	93

SBD8-SE	0,57	28

Tableau 3-4. Coefficient d'absorption capillaire des biocomposites avec et sans additifs

3.5 Influence du silicate d'éthyle et de la chaux sur les propriétés mécaniques des biocomposites

3.5.1 Stabilisation à la chaux

La chaux est un additif fréquemment utilisé pour la stabilisation de la terre crue que ce soit en géotechnique ou pour la fabrication d'adobes ou de briques de terre comprimées (Brahim Mazhoud et al. 2017), (Garzón et al. 2016). L'amélioration des propriétés mécaniques est due aux réactions pouzzolaniques lentes engendrant la génération de silicates de calcium et d'aluminates de calcium hydratés (C-S-H) et (C-A-H) dans le cas de kaolonites (Khay 2012), (Wang et al. 2012), (Brahim Mazhoud et al. 2017). La quantité de chaux qui sera additionnées à la terre crue passe par un maximum après quoi son augmentation en proportion n'apportera que peu de bénéfices selon Gutella et al. (Guettala et al. 2002). L'objectif dans ce projet étant de conserver un bilan environnemental vertueux, nous nous sommes basé sur un ajout de chaux fixé à 5%.

3.5.2 Stabilisation au silicate d'éthyle

Les propriétés de consolidation et d'hydrofugation du silicate d'éthyle ou tétra-éthoxy-silane $Si(OC_2H_5)$ ont d'abord été constatées et exploitées pour la consolidation des pierres calcaires (Association MEDISTONE 2010), (Bromblet et al. 2002). Plus récemment, les capacités du silicate d'éthyle à stabiliser les terres kaolinitiques notamment dans l'optique d'améliorer la résistance à l'érosion du patrimoine archéologique ont commencé à être étudiées (Tiennot et al. 2014). Le silicate d'éthyle, molécule faisant partie de la famille des produits silicones réagit à l'humidité de l'air en formant de la silice hydratée. L'un de ses avantages est qu'il ne va pas produire de sel susceptible de créer des efflorescences et de fragiliser les mortiers au séchage, mais de l'alcool éthylique, qui s'évapore au fur et à mesure que la réaction d'hydrolyse se poursuit. Quand le silicate est ajouté à l'argile, cette hydrolyse a lieu par l'échange de groupes

hydroxyles présents en grand nombre à la surface des particules d'argile (*a fortiori* dans les argiles kaolinitique) engendrant un grand nombre de liaisons avec les gels de silices (Wheeler 2005).

3.5.3 Comportement des biocomposites stabilisés

Seuls les résultats concernant les biocomposites avec les granulats suivants : colza, écorce de tournesol, mélange moelle-écorce sont présentés ici. En effet, faute de granulat de moelle de tournesol en quantité suffisante, nous n'avons pas pu réaliser un nombre statistiquement représentatif d'éprouvettes. Une tentative a toutefois été réalisée en réutilisant d'anciennes éprouvettes du biocomposite SPD2 en les réhydratants et en les adjuvantants de façon idoine. Toutefois, la consistance des mélanges est singulièrement différente d'un mélange n'ayant pas été réutilisé et le composite est moins rigide. En effet, les granulats de moelle de tournesol après avoir été hydratés et séchés ne retrouvent pas leur volume initial (effet d'éponge séchée) ni leur volume à l'état hydraté lors d'une seconde hydratation, leur proportion volumique diffère par conséquent des granulats non recyclés. Un autre facteur influençant la plus faible cohésion du biocomposite vient de la proportion plus faible de polysaccharides relâchée par la moelle de tournesol entrainant une adhésion moindre des granulats par les sucres (voir chapitre II). Ces constations ont été corrélées par les tests mécaniques entrepris sur les échantillons témoins qui présentent une forte déviation par rapport aux biocomposites non recyclés.

Les échantillons à base de colza ne développant pas de rupture mais une augmentation continue de la contrainte de compression dans le domaine plastique avec ou sans additifs, les contraintes maximales ont uniquement été mesurées pour les échantillons à base d'écorce et de moelle-écorce de tournesol. Ceci nous amène à apporter les éléments de discussion qui font suite :

L'ajout de chaux à 5% dans les biocomposites induit systématiquement une diminution des performances mécaniques en rigidité ou en résistance à la compression. L'ajout de chaux est pourtant utilisé pour son apport en termes d'augmentation de la rigidité mécanique lorsqu'il est ajouté pour stabiliser des sols dans des proportions de 5 à 10%. Les biocomposites de cette étude possèdent une faible proportion volumique de terre crue, cette proportion se révèle insuffisante pour créer un squelette granulaire suffisamment rigide pour reprendre la totalité des efforts imposés aux éprouvettes. La quantité et le type de granulat végétaux influent donc de façon prépondérante sur les propriétés mécaniques. De plus, la stabilisation de la terre-crue avec la chaux s'effectue via la création de liaison pouzzolaniques de type C-S-H et C-A-H or,

la présence de granulats végétaux lors de la préparation des mortiers libère différents polysaccharides (Marechal & Rigal 1999), (Sedan 2007), cette lixiviation exacerbée par l'apport alcalin de la chaux va inhiber la création des liaisons C-S-H et C-A-H et entrainer un effet de farinage tout en entrainant un mécanisme de dégradation des fibres végétale par hydrolyse alcaline et minéralisation (Yan et al. 2016). Ce phénomène constaté sur les bétons de chanvre (Sedan 2007), (Nozahic 2012) est davantage prégnant ici car les granulats utilisés pour ces composites se trouvent en forte proportion volumique. De plus, la chaux est utilisée en faible proportion. La réaction pouzzolanique de la chaux va par conséquent être inhibée de même que son hydratation tout en diminuant la part « collante de la terre crue ». Son adjonction va par conséquent avoir pour effet de diminuer les propriétés mécaniques des composites comme cela peut être constaté sur la contrainte à rupture des composites (Figure 3-17) ou leur module d'élasticité (Figure 3-18).

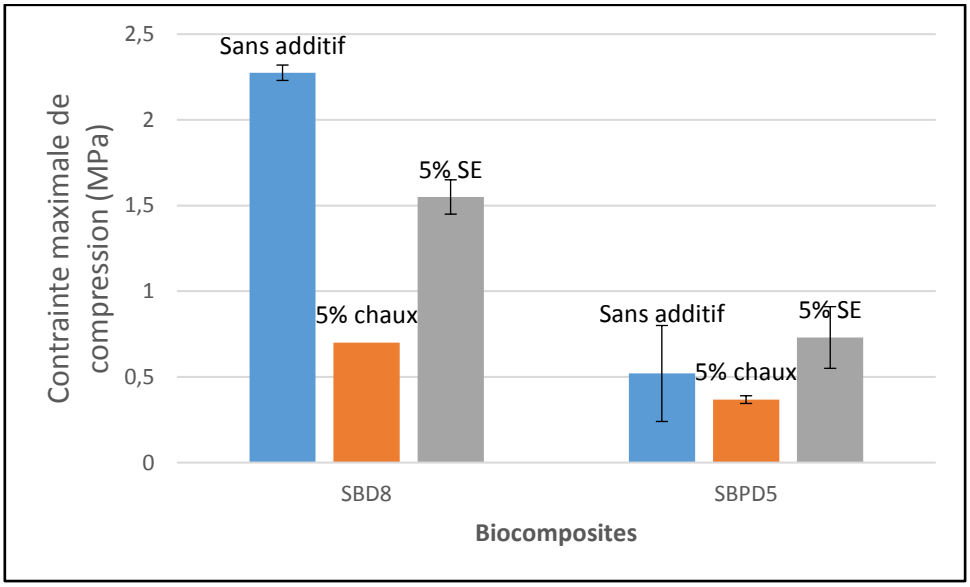


Figure 3-17. Contrainte maximale des biocomposites avec et sans additifs

La Figure 3-18 représente l'impact de l'ajout de chaux et de silicate d'éthyle sur les biocomposites RSD5, SBPD5 et SBD8 en termes de rigidité. L'impact de ces additifs sur les échantillons à base de colza se révèle mineur, comme il a été constaté pour l'échantillon RSD5 précédemment, les efforts sont essentiellement repris par la paille, l'influence du liant « la matrice » étant minorée. Les écarts de rigidité deviennent notables pour les échantillons à base d'écorce et de moelle-écorce de tournesol.

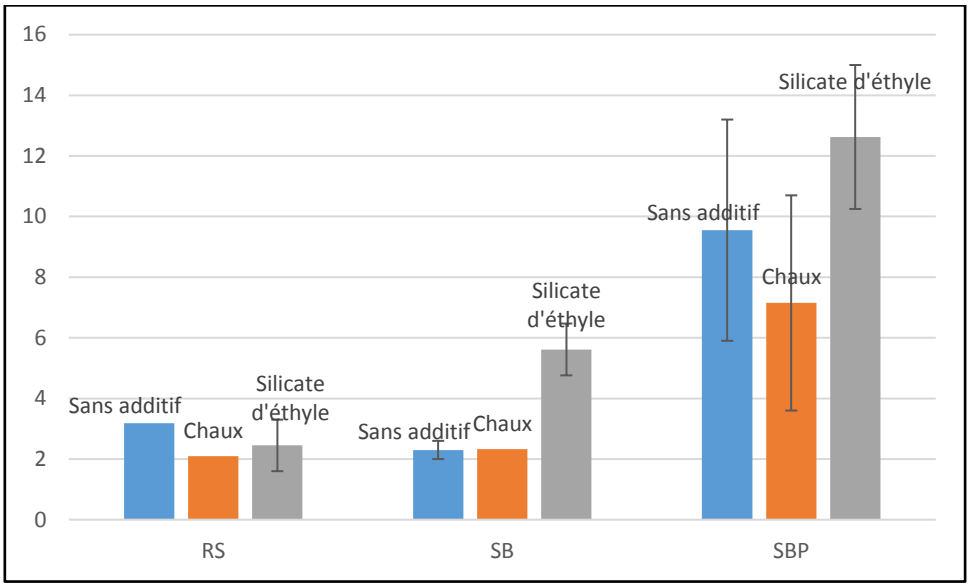


Figure 3-18. Module de Young des biocomposites avec sans additifs

3.5.4 La stabilisation de la terre-crue est-elle à rechercher ?

La terre crue, matériau vernaculaire utilisé depuis des millénaires (des briques de terre crue ont été utilisées en Mésopotamie vers 10 000 avant J.C.) dans la plupart des régions du globe, a pu démontrer sa durabilité lorsque les techniques d'utilisation et d'entretien des édifices sont maitrisées de façon assidue (Heathcote 1995) – des murs de terre crue de 900 ans sont entretenus par le peuple Taos au Nouveau Mexique, des immeubles de plus 400 ans subsistent au Yémen et dans ces deux cas la longévité des édifice va de pair avec la reprise régulière des enduits de terre extérieur –. Les limites de ce matériau d'un point de vue structurel et de résistance à l'immersion ont amené les populations à lui préférer le béton de ciment de Portland gage de performances mécaniques et résistant à l'érosion et au ruissellement. L'impact environnemental du ciment de Portland a permis de reconsidérer les qualités intrinsèques du matériau terre crue, à commencer par sa faible empreinte énergétique. L'espoir d'une appropriation de ce matériau par les acteurs du bâtiment est à souhaiter dans l'optique d'atteindre les objectifs de la COP21 et celle-ci est supposée passer par une amélioration des performances de la terre afin qu'elles se rapprochent de celles des matériaux conventionnels d'aujourd'hui. L'adjuvantation de la terre crue d'abord utilisée pour la stabilisation des sols permet d'augmenter très sensiblement les performances du matériau terre, notamment par l'ajout de liants hydrauliques (ciment et

chaux) engendrant des réactions pouzzolaniques. Cet axe d'amélioration des performances de la terre-crue a récemment été remis en question par Vandamme et Houben (Van Damme & Houben 2017), leur analyse mettant en exergue un réel gain de performances mécaniques engendré par l'addition de ciment ou de chaux mais ce gain se révèle très insuffisant pour obtenir des performances permettant de soutenir la comparaison avec le béton de ciment de Portland. Au final, le surdimensionnement des structures nécessaire pour compenser cet écart de performance conduit à la mise en œuvre d'un matériau de terre stabilisé ayant une empreinte énergétique supérieure à une structure en béton de ciment utilisant une quantité bien moindre de matériau. Ce constat est davantage exacerbé lorsque l'adjonction est effectuée avec de la chaux. Toutefois, sans vouloir atteindre les performances des liants hydrauliques classiques, l'ajout d'un faible pourcentage (5-10%) de ciment ou de chaux à la terre-crue va considérablement impacter le bilan environnemental du matériau en n'augmentant ses performances « que » de quelques MPa tout en remettant en cause sa recyclabilité (Van Damme & Houben 2017). Ces constats amènent Vandamme et Houben à conclure que dans la plupart des cas, la stabilisation de la terre crue avec de la chaux ou du ciment n'apporte pas suffisamment de bénéfices tant d'un point de vue environnemental que mécanique. Ce constat est à prendre d'autant plus en considération dans le cas de bétons végétaux pour lesquels la prise des liants hydrauliques est inhibée par la lixiviation de sucres et lignines. Un renforcement des propriétés mécaniques des matériaux à base de terre-crue peut toutefois être envisagé en agissant sur les propriétés de surfaces des plaquettes d'argile par l'ajout en très faible pourcentage de substances plastifiantes et floculantes (Landrou et al. 2016).

3.6 Conclusion

Les matériaux isolants sont avant tout prescrits pour leur faible conductivité thermique, les bétons végétaux ne peuvent toutefois que rarement être décrits comme des isolants thermiques du fait de leur conductivité thermique généralement supérieure à 0,065W/m^{-1}.K^{-1}. Il en est de même pour les biocomposites de ce projet excepté pour le mélange argile:moelle de tournesol SPD2 qui a une conductivité de 0,055W/m^{-1}.K^{-1}. Les prérequis en termes de résistance à la compression des biocomposites sont atteints concernant les critères demandés pour les matériaux isolants manufacturés en revanche du fait de leur forte hygroscopicité, les mélanges terre:végétaux doivent être protégés des contacts prolongés avec l'eau sous forme liquide qui

engendrera leur détérioration du fait de l'hydratation excessive de la terre crue et de phénomènes de gonflement-retrait des granulats végétaux tels que décrit par Laborel et al.(Laborel-Préneron et al. 2016). Malgré ces points faibles, les bétons végétaux sont fréquemment prescrits lors de rénovations thermiques impliquant des ouvrages en pierres poreuses tels que le tuffeau (Stephan 2014) de par leurs capacités à respecter les transferts d'humidité naturels opérants à l'intérieur de ces parois anciennes. Pour cette raison, le comportement de ce type de biocomposite lorsqu'il est appliqué sur une paroi en tuffeau est étudié dans le prochain chapitre en prenant en compte les variations climatiques intérieures et extérieures.

4 Impact de l'enduit de finition sur le comportement des biocomposites

4.1 Introduction

L'un des objectifs du projet BIOCOMP est de pouvoir proposer des solutions d'isolation pour les bâtiments présents sur le territoire du Pays Touraine Côté Sud. Ce territoire est caractérisé par la présence majoritaire de bâtis datant d'avant la seconde guerre mondiale. Les matériaux utilisés pour la construction des murs de cet habitat vernaculaire sont majoritairement constitués de pierre calcaire très poreuse dite tuffeau et de moellon hourdies à la terre et à la chaux. Comme indiqué lors de la thèse d'Emma Stéphan (Stephan 2014), l'utilisation de bétons végétaux pour assurer une continuité capillaire avec la pierre calcaire de tuffeau fortement hygroscopique est pertinente. Afin de s'assurer de la cohérence des solutions proposées, étudier le comportement de l'ensemble mur/isolant/enduit de finition s'avère nécessaire à la fois pour évaluer l'impact de l'enduit de finition sur la régulation de l'humidité intérieure ainsi que sur les performances acoustiques des parois concernées et enfin, d'un point de vue de la mise en œuvre de ces enduits pour connaitre quelles implications en terme de durée de séchage de la paroi engendre la mise en place d'un enduit de finition sur l'isolant encore frais. Afin d'étudier ces différents aspects, une caractérisation dynamique des échanges d'humidité au sein de la paroi a été réalisée en déterminant sa capacité de tampon hydrique.

D'un point de vue acoustique, les valeurs d'absorption et d'affaiblissement acoustique de différents biocomposites ont été déterminées en laboratoire. Une simulation numérique hygrothermique en utilisant le logiciel WUFI 2D a été réalisée sur la paroi (tuffeau/bio-composite isolant) afin tout d'abord d'évaluer la validité et l'optimisation des paramètres de cette simulations par rapports aux résultats expérimentaux obtenus sur une paroi placée en chambre climatique puis d'étudier l'influence de l'enduit de finition sur la durée de séchage de la paroi. Cet aspect de l'étude a également pour objet de tenter de répondre à une question importante ayant trait la mise en place de l'enduit de finition et au besoin d'exacerber le séchage au moyen par exemple d'une ventilation ou d'un chauffage des pièces après la mise en œuvre de l'isolant.

4.2 Caractérisation hydrique

4.2.1 Mesures de la capacité de tampon hydrique (Moisture Buffer Value - MBV)

La mesure de la valeur pratique de tampon hydrique (practical MBV) caractérise le comportement hydrique des matériaux lorsque ceux-ci sont exposés à des variations périodiques d'humidité relative. Ce protocole a été élaboré par Rode et al. (Rode et al. 2007) pour déterminer la capacité des matériaux utilisés dans l'habitat à absorber ou désorber l'eau sous forme de vapeur présente à l'intérieur des habitations lorsque l'humidité relative varie du fait de variations de conditions climatiques ou anthropiques. Rode et al. sont partis du constat que les conditions d'usage des matériaux ne sont pas statiques, l'humidité relative dans les espaces intérieurs variant dans une fourchette de valeurs. Les matériaux d'isolation participent à réguler les pics d'humidité relative permettant de maintenir des conditions sanitaires optimales (voir chap. I-3-4). Des mesures permettant de simuler les variations d'humidité relatives ont été effectuées dans une enceinte climatique KBF240 (Figure 4-2). Ici, trois échantillons de chaque formulation (SPD2, RSD5, SBPD5 et SBD8) ont été soumis à des variations d'humidité : 8h à 75%HR et 16h à 33%HR à 23°C. Cette caractérisation dynamique des capacités de tampon hydrique des matériaux prétend simuler de façon plus réaliste les changements d'atmosphère climatique journaliers dans une habitation que dans le cas d'une simulation statique et traduire ainsi ses capacités de régulation de l'humidité intérieure.

Le protocole de mesure proposé par Rode et al. (Rode et al. 2007) a été choisi pour le déroulement de ces essais dynamiques. Des échantillons de 16cm de diamètre et 6 cm d'épaisseur ont été préparés et étanchéifiés avec de l'adhésif d'aluminium sur toutes les faces sauf une afin d'obtenir une surface exposé à l'ambiance hydrique de 0,02m^2 (Figure 4-1). La vitesse du ventilateur dans l'enceinte climatique a été réduite à 10% de sa capacité, une mesure avec un anémomètre hygromètre mobile nous a permis de vérifier que les ambiances étaient similaires autour des différents échantillons placés dans l'enceinte avec un flux d'air inférieur à 0,05m/s (Figure 4-2).

L'expérimentation a été arrêtée après que les écarts de masse relevés entre les quantités d'eau absorbées à 75%HR et désorbées à 33%HR soient devenus inférieurs à 0,20% pendant 3 jours consécutifs. Cette stabilisation a été obtenue après seulement 4 cycles (Figure 4-8). La mesure de tampon hydrique (MBV) est exprimée en g/(m^2.%RH) et a été obtenue à partir de l'Equation 7.

$$MBV = \frac{\Delta m}{A.(\%RHhigh - \%RHlow)}$$ **Équation 7**

Δm représente la moyenne entre la masse d'eau adsorbée (prise de masse) et désorbée (perte de masse) une fois que le système a atteint un équilibre dynamique (g) et *A* représente la surface exposée en m^2.

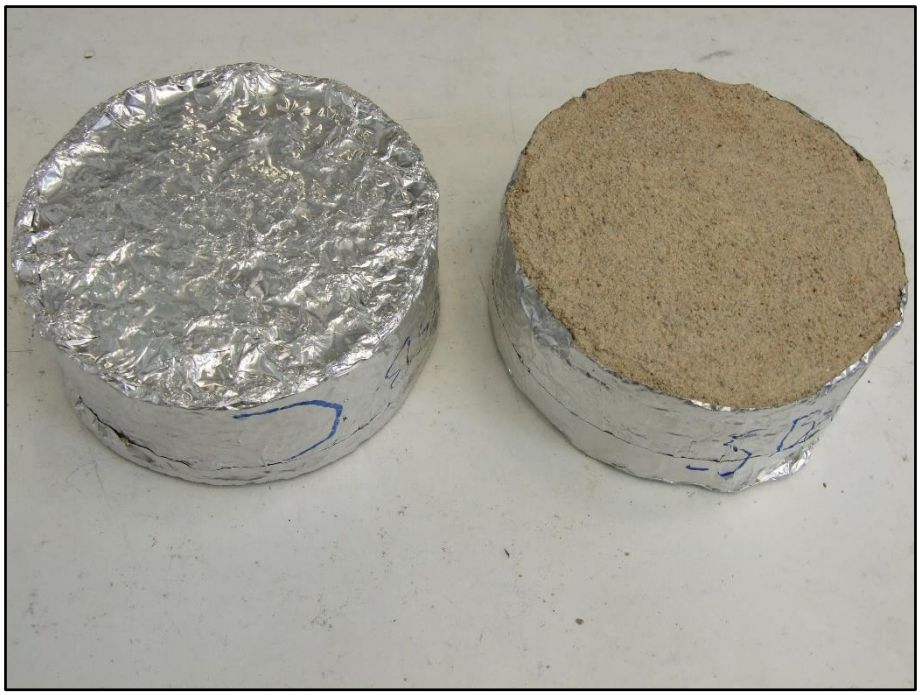


Figure 4-1. Echantillons de biocomposite avec enduit de finition pour essai MBV avec une face exposée

Figure 4-2. Echantillons SPD2, SBPD5, RSD5 et SBD8 dans l'enceinte climatique

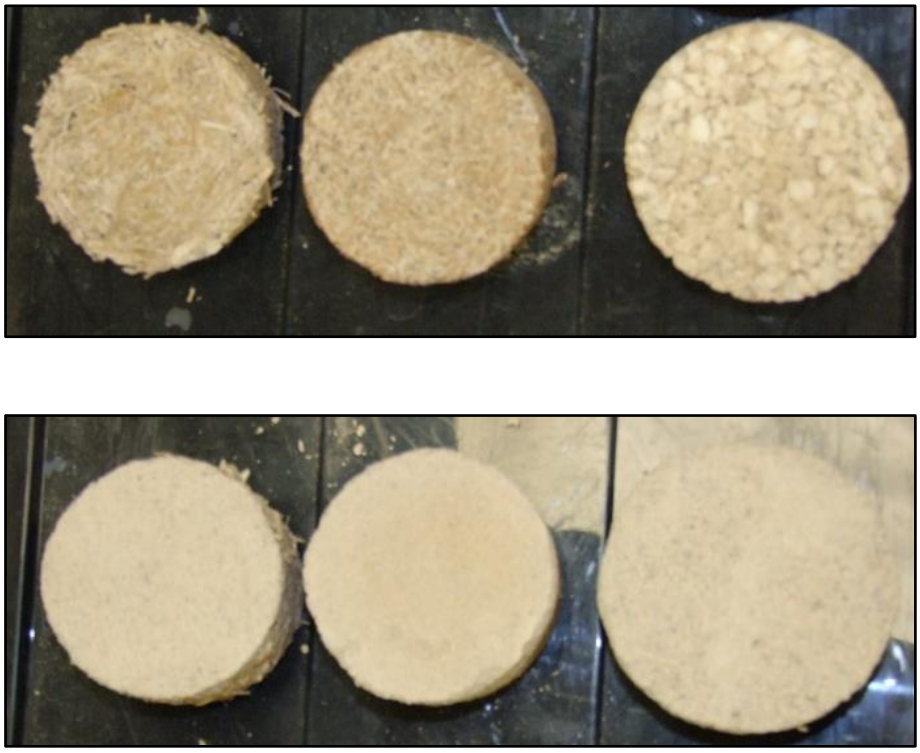


Figure 4-3. De gauche à droite: RSD5, SBD8 et SPD2, avec enduit de finition (bas) et sans enduits de finition (haut)

Parallèlement aux mesures effectuées sur des échantillons de composite brut, nous avons voulu connaître l'influence de l'enduit de finition appliqué sur un tel matériau sur ses capacités de régulation hydrique. Colinart et al. et Collet et al. (Colinart et al. 2016), (Collet et al. 2013) ont étudié l'influence d'un enduit de finition à base de chaux-sable qui a fait chuter de 40 à 50% la capacité de tampon hydrique du matériau par rapport à l'isolant chaux-chanvre non enduit, tandis qu'un enduit de finition en chaux-chanvre ne fait chuter cette valeur que de 8%. En effet, les matériaux étudiés ici ayant vocation à être utilisés en tant qu'isolant intérieur pour la rénovation des bâtiments seront recouverts d'un enduit de finition pour des raisons esthétiques et de protection. L'enduit de finition utilisé pour les bétons de chaux-chanvre est à base de chaux et de sable. Ici, l'enduit de finition utilisé par les artisans est à base de terre-crue et de sable dans les proportions massiques 1:3 avec un rapport terre-crue:eau de 1:0,8. La terre crue utilisée pour la préparation de l'enduit est la même que celle utilisée pour les biocomposites. L'épaisseur d'enduit de finition appliquée sur les échantillons est de 8mm ce qui représente une masse de 340g pour chaque échantillon. Les mêmes échantillons utilisés pour la mesure sans enduits de finition ont été enduits et utilisés pour la deuxième campagne de mesures, les échantillons avant et après application de l'enduit de finition sont représentés sur la Figure 4-3.

4.2.2 Comparaison des capacités de tampon hydrique

La terre crue est connue pour ses qualités de régulation de l'humidité. Palumbo et al. (Palumbo, McGregor, et al. 2016) ont de plus observé que l'ajout de granulats végétaux comme la moelle de maïs permet d'améliorer les capacités de tampon hydrique de la terre crue.

Comme attendu, les capacités de tampon hydrique mesurées ici pour les échantillons non recouverts d'enduits de finition sont supérieures à 2 g/(m^2.%RH) (Tableau 4-1), les MBV des matériaux caractérisés peuvent par conséquent être qualifiés d'excellentes selon la classification proposée par Rode et al. (Rode et al. 2007) ce qui signifie que le matériau a la capacité d'absorber et réémettre des quantités importante de vapeur d'eau contenues dans l'atmosphère intérieure et par la même de lisser les pics ou creux d'humidité relative améliorant ainsi le confort intérieur. Afin de disposer d'éléments de comparaison, les MBV des matériaux de cette étude (avec et sans enduits de finition) ainsi que celles trouvées dans la littérature pour d'autres biocomposites liant-végétaux ont été représentées dans la Figure 4-5. Nous pouvons constater que les capacités de tampon hydrique de ces différents matériaux peuvent être considérées de bonnes à excellentes selon la terminologie proposée par Rode et al (Figure 4-4).

Les facteurs influençant ces valeurs sont liés d'une part au type de liant utilisé et d'autre part aux granulats végétaux utilisés. Ainsi, le béton de amidon-chanvre présente une capacité de régulation hydrique nettement supérieure à celle du béton de chaux-chanvre (Colinart et al. 2016). De même la régulation hydrique des mélanges terre-colza de notre étude est plus importante que celle des mélanges chaux-colza développés par Rahim et al. (Rahim, Douzane, A. D. Tran Le, et al. 2016). Concernant ce dernier, l'écart peu important inférieur à 0,5g/(m^2.%RH) est également influencé par les proportions liants:granulats ainsi que le type de granulats, en effet, le colza utilisé par Rahim et al. (Rahim, Douzane, A. D. Tran Le, et al. 2016) possède une masse volumique (125 kg/m^3) supérieure au colza utilisé ici (65 kg/m^3) avec, respectivement, une porosité mesurée de 89% et 94%, les proportions différentes de moelle dans la paille colza pourraient expliquer ces différences. Un effet synergétique entre le liant et les granulats végétaux peut également être invoqué pour expliquer le comportement excellent des matériaux en termes de régulation hydrique comme cela a déjà été évoqué par Mazhoud et al. (Mazhoud et al. 2016) pour le couple terre-crue : chènevotte, les valeurs de MBV des matériaux en terre-chanvre étant supérieures à celle de la terre-crue seule ou au béton de chaux:chanvre. Il n'est donc pas surprenant de constater de meilleures performances de régulation hydriques des mélanges terre:colza et terre:tournesol par rapport au béton de chaux:chanvre étant donné que les granulats de colza développent un comportement plus hygroscopique que celui de la chènevotte et qu'il en est de même pour l'emploi de la terre-crue vis-à-vis de la chaux ou de liants pouzzolaniques.

Granulats	Liant	Masse volumique kg/m^3	MBV W/(m.K)	Références
RSD5 (Etude présente)	Argile	438	2,87	Etude actuelle
SBPD5 (Etude présente)	Argile	512	2,86	Etude actuelle
SBD8 (Etude présente)	Argile	714	2,72	Etude actuelle

SPD2 avec enduit (Etude présente)	Argile		1,68	Etude actuelle
SBPD5 avec enduit (Etude présente)	Argile		1,86	Etude actuelle
SBD8 avec enduit (Etude présente)	Argile		1,8	Etude actuelle
RSD5 avec enduit (Etude présente)	Argile		1,7	Etude actuelle
Chanvre-paille (35)	Polysaccharide	180	2,27	(Labat et al. 2016)
Chanvre-paille (B1)	Polysaccharide	188	2,2	(Labat et al. 2016)
Chanvre-paille (B2)	Polysaccharide	166	2,22	(Labat et al. 2016)
Chanvre-paille (S2)	Polysaccharide	182	2,42	(Labat et al. 2016)
Béton chaux-chanvre sans enduit	Chaux		1,9	(Lelièvre et al. 2015)
Béton chaux-chanvre enduit [4]	Chaux		1,2	(Lelièvre et al. 2015)
Amidon-chanvre	Amidon	670	4,25	(Umurigirwa et al. 2014)
Liant pouzzolanique-lavande non traitée	Pouzzolanique	577	3,85	(Ratiarisoa et al. 2016)
Liant pouzzolanique Lavande traitée (Ratiarisoa et al. 2016)	Pouzzolanique	661	3,5	(Ratiarisoa et al. 2016)
Argile-chanvre	Argile		2,68	(B. Mazhoud et al. 2017)
Chaux-colza	Chaux	381	2,45	(Rahim, Douzane, A. D. Tran Le, et al. 2016)

Tableau 4-1. Capacités de tampons hydriques de différents biocomposites

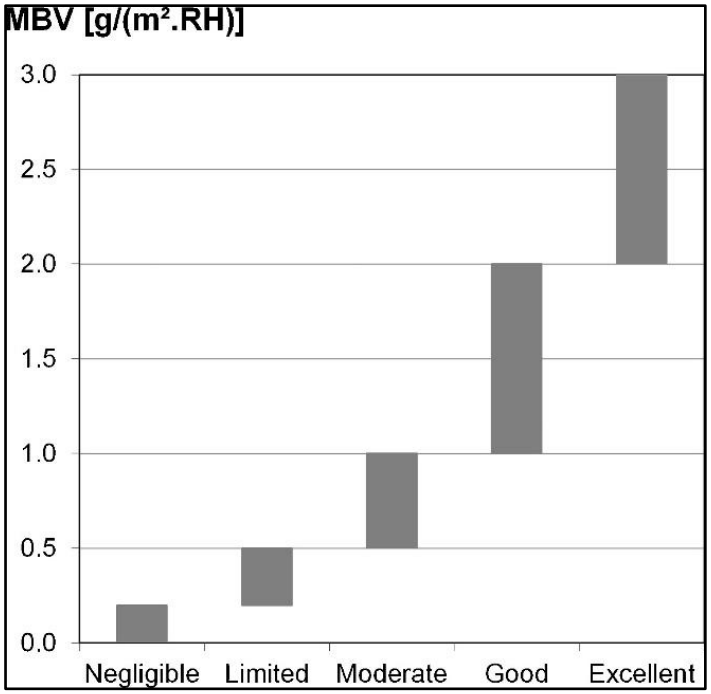


Figure 4-4. Classement qualitatif des valeurs des capacités de tampon hydrique proposé par Rode et al. (Rode et al. 2007)

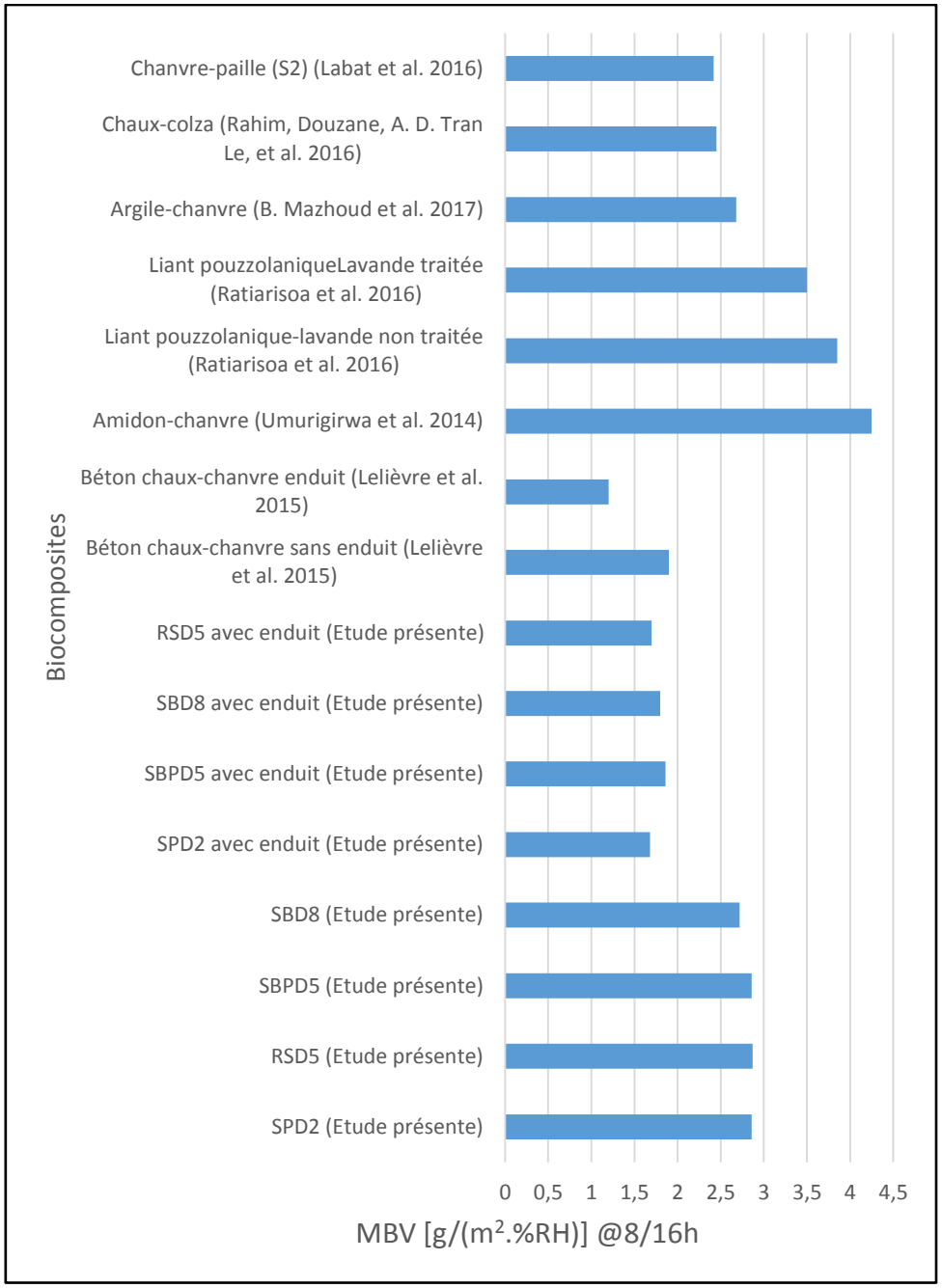


Figure 4-5. Capacités de tampon hydrique (MBV) de différents biocomposites

4.2.2.1 Capacité de tampon hydrique et masse volumique

Nous pouvons constater que la masse volumique des matériaux n'exerce pas une influence significative sur les bétons végétaux comme cela peut-être visualisé sur la Figure 4-6. Il convient également de préciser que les valeurs sensiblement plus élevées de MBV relevées sur les mélanges lavande: liant pouzzolanique ont probablement été influencées par les conditions

expérimentales spécifiées dans l'article de Ratiarisoa et al. (Ratiarisoa et al. 2016) et différentes du protocole Nordtest (température supérieure à 23°C et vitesse de l'air en contact avec les échantillons supérieure à 0,1m/s). L'absence de corrélation entre la masse volumique des matériaux et leurs valeurs de capacité de tampon hydrique, a préalablement été observée par Collet et ses collaborateurs pour des mélanges terre-paille, par Mazhoud et al. Pour des mélanges terre:chanvre et McGregor et al. pour la terre crue (Collet et al. 2016), (Mazhoud et al. 2016), (McGregor et al. 2014).

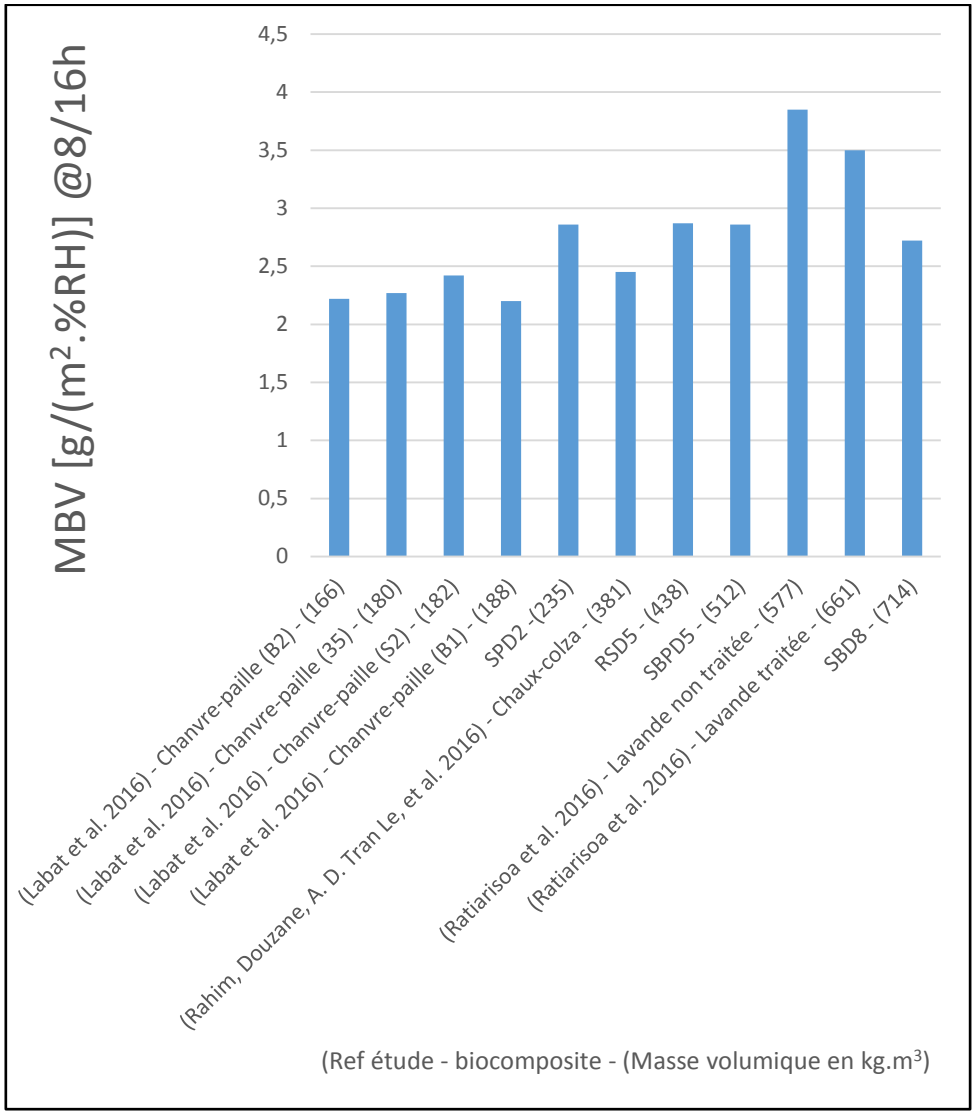


Figure 4-6. Capacité de tampon hydrique de différents bétons à base de granulats végétaux en fonction de leur masse volumique

4.2.2.2 Capacité de tampon hydrique et enduits de finition

L'influence de l'enduit de finition sur les capacités de régulation hydrique a été étudiée dans le cas de bétons de chaux-chanvre par Lelièvre et al. et Collet et al.(Lelièvre et al. 2015), (Collet et al. 2013). Lors de l'application d'un enduit de finition en chaux-sable, Lelièvre et al. ont relevé une diminution des valeurs de MBV de 40% sur les bétons de chanvre. Lors de cette étude, lorsqu'un enduit de finition constitué d'argile et de sable a été appliqué, la capacité de tampon hydrique des biocomposites terre:végétaux a diminué en moyenne de 32% pour SPD2, 35% pour SBPD5, 34% pour SBD8 et 41% pour RSD5 (Figure 4-7). Cette différence de régulation entre les échantillons avec et sans enduits de finition peut également être constatée au cours du temps sur la Figure 4-8 en observant l'amplitude entre la masse d'eau absorbée et la masse d'eau désorbée lors des cycles à 75%HR et 33%HR. La différence d'amplitude entre le RSD5 et le RSD5 avec enduit est de 5g d'eau ce qui correspond à une différence de plus de 20% d'eau absorbée et désorbée pour une surface équivalente.

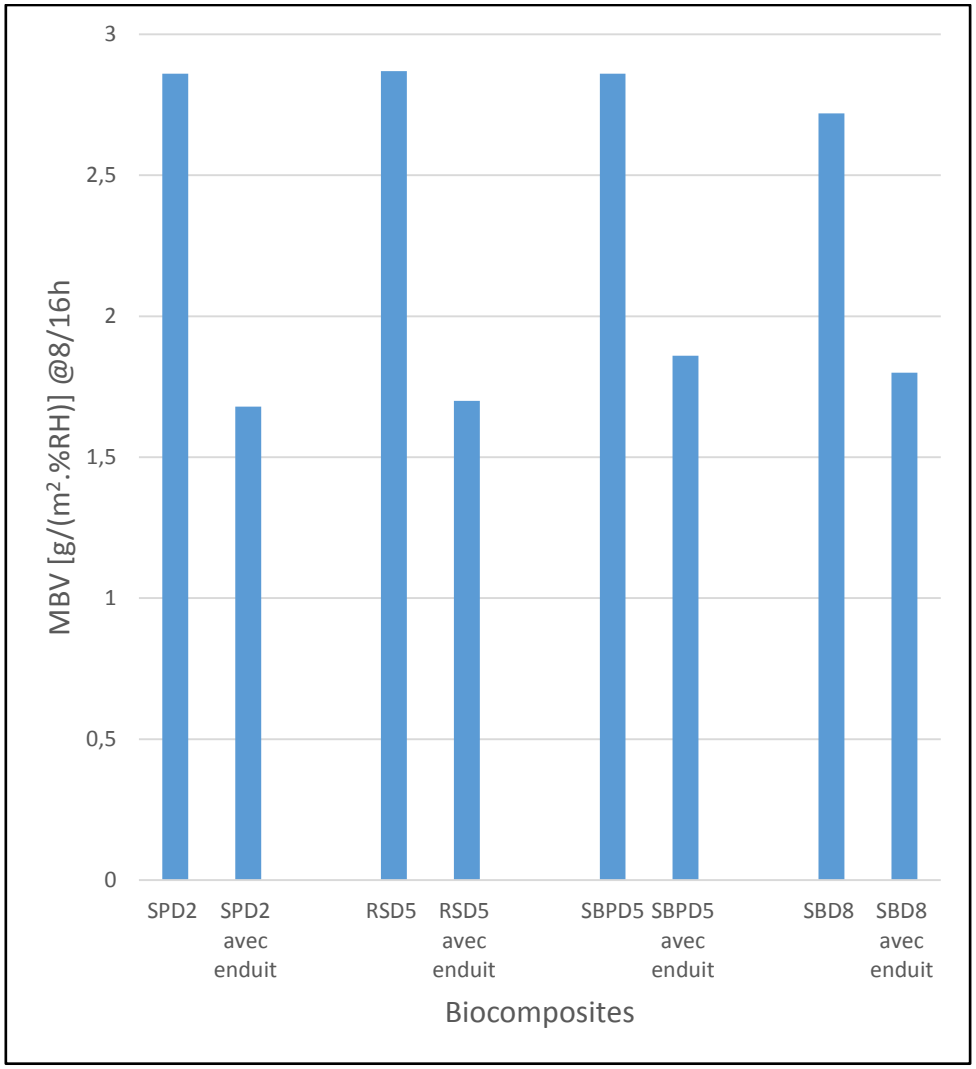


Figure 4-7. Capacité de tampon hydrique des biocomposites avec et sans enduits de finition

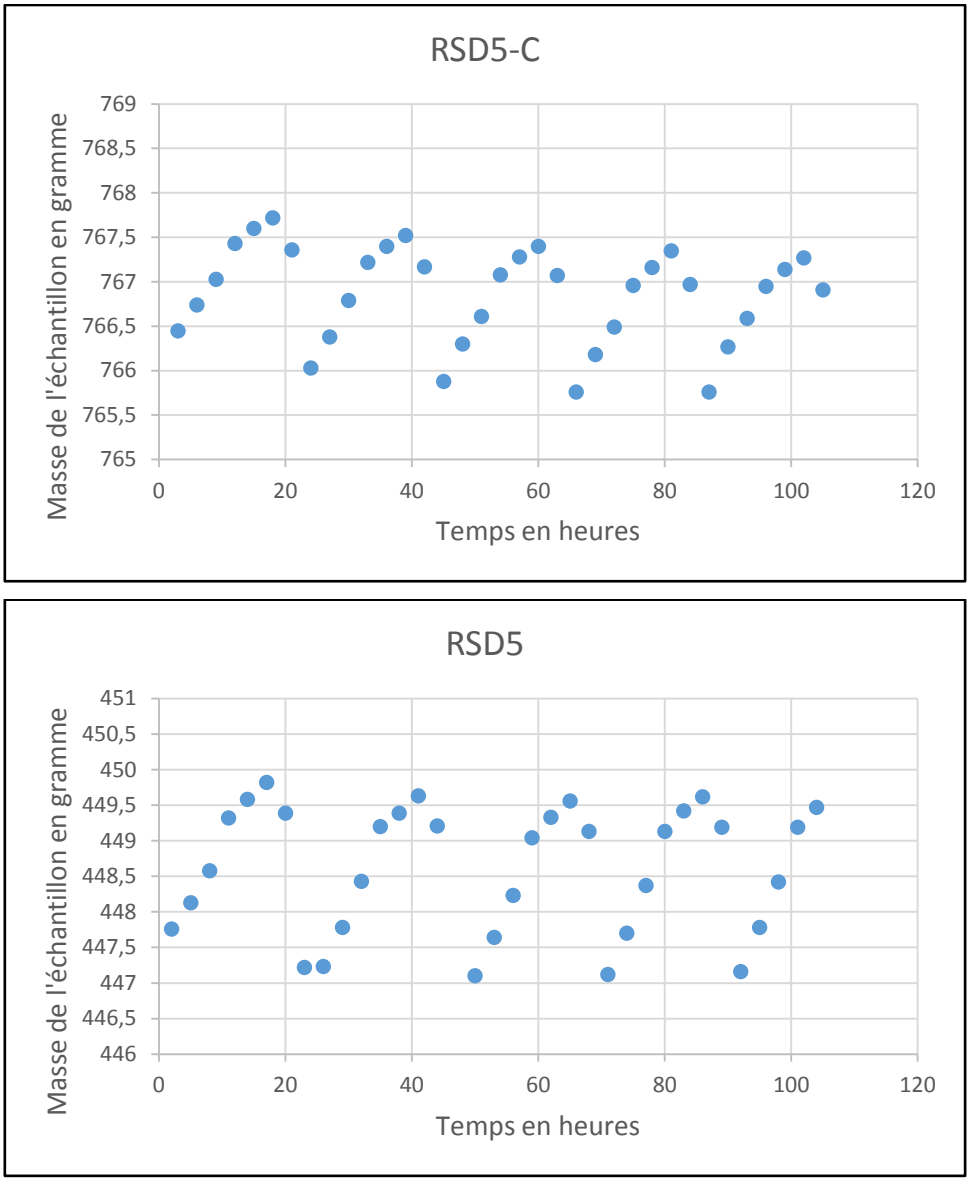


Figure 4-8. Masse d'eau absorbée et désorbée pour les échantillons RSD5 avec enduit (en haut) et sans enduit (en bas) lors des cycles à 75%HR et 33%HR à 23°C

L'argile utilisée pour l'élaboration de l'enduit de finition est majoritairement composée de kaolinite (Chapitre II) or, les propriétés de tampon hydrique varient sensiblement de 1,13 à 3,13g/(m^2.%RH) selon la composition minéralogique des argiles comme indiqué par Mc Gregor et al. (McGregor et al. 2014). Les argiles gonflantes de type montmorillonite (smectite) possédant les valeurs de tampon hydriques les plus élevées. La volonté de conserver une capacité de tampon hydrique excellente peut ainsi pousser à favoriser l'utilisation d'une proportion d'argiles plus gonflantes telles que les smectites dans l'élaboration des enduits de

finition. Palumbo et al. (Palumbo, McGregor, et al. 2016) ont constaté que l'ajout de granulats végétaux améliore la vitesse d'absorption de la vapeur d'eau comparée à la terre-crue seule, ce qui corrobore nos essais. Les auteurs suggèrent donc l'emploi de ce type de matériaux dans les pièces humides telles que les salle-de-bain où la production de vapeur d'eau est soudaine.
Toutefois, comme indiqué par Labat (Labat et al. 2016), il convient de considérer que la régulation hydrique à l'échelle d'une pièce de vie dépend de différents facteurs et pas uniquement de la capacité de tampon hydriques des matériaux de parement et de finition mais également des caractéristiques de la ventilation mise en place dans les pièces concernées notamment le taux de renouvellement d'air intérieur.

4.3 Caractérisation acoustique

Dans le domaine de l'isolation acoustique des bruits aériens dans l'habitat, les propriétés des matériaux de construction généralement investiguées sont l'absorption acoustique dans une gamme de fréquence déterminée via le coefficient α Sabine qui représente la quantité d'énergie sonore non réfléchie par un matériau (située entre 0 à 1 du moins absorbant au plus absorbant) et l'indice d'affaiblissement acoustique ou transmission loss (TL) qui caractérise l'aptitude d'un matériau à atténuer la transmission du son aboutissant à une valeur en dB selon la fréquence émise. La qualité de l'isolation acoustique d'un local dépend de nombreux facteurs, la connaissance des propriétés des matériaux de parement tels que les matériaux isolants et les enduits ne saurait suffire pour garantir des performances d'absorption ou d'isolation acoustique. En effet, l'environnement de la pièce, la topologie, les différents matériaux composant l'intérieur et l'extérieur de la pièce ainsi que la qualité de la mise en œuvre auront des incidences. C'est pourquoi les procédures normalisées de mesures de propriétés acoustiques s'effectuent dans des conditions in situ à l'échelle d'un bâtiment, des mesures à l'échelle d'un mur peuvent également être effectuées dans un laboratoire Il est toutefois nécessaire de connaitre les caractéristiques intrinsèques des matériaux ne serait-ce que pour les comparer avec d'autres matériaux similaires existants sur le marché. Des essais réalisés à l'échelle du matériau ont été développés à l'aide de tubes à impédances (ou tubes de Kundt), ici les essais ont été réalisés à l'aide d'un tube de Kundt de 100mm de diamètre et 1,45m de hauteur et équipé de 3 microphones au CEREMA de Strasbourg (Figure 4-9). La source d'émission imposée par la norme ISO 10534-2 couvre une gamme de fréquence de 50 à 10 000 Hz.

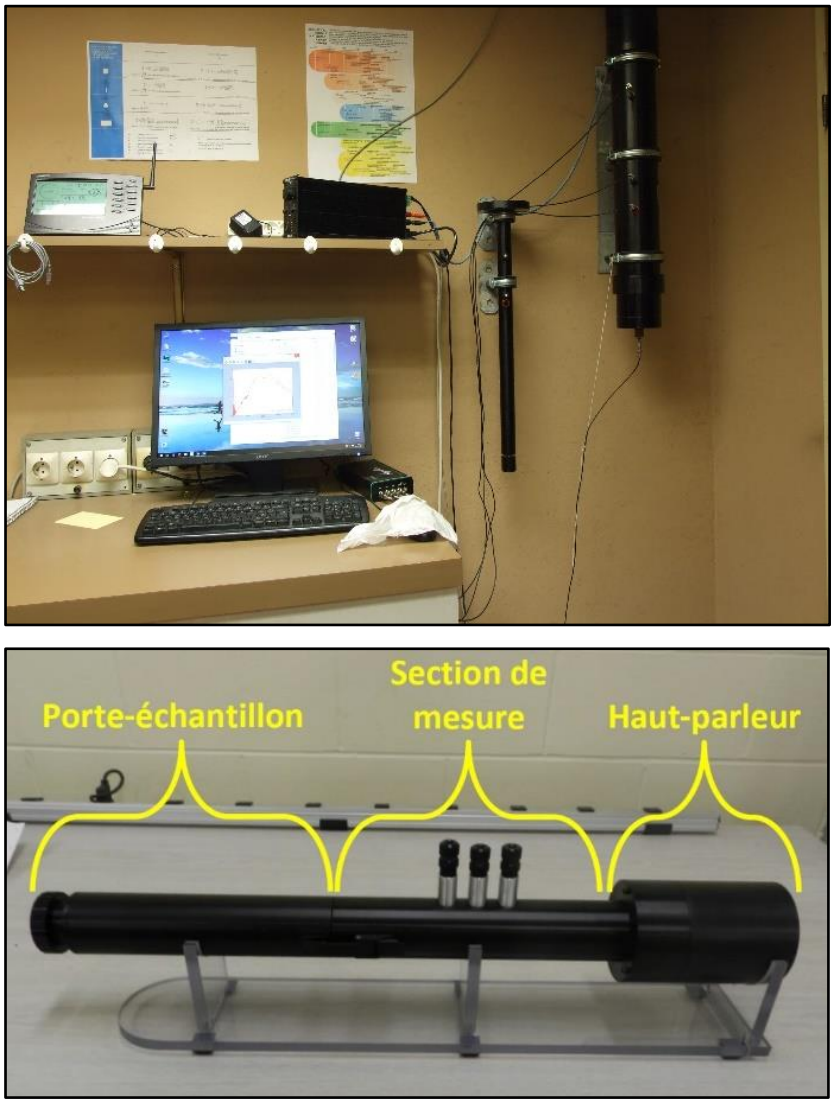


Figure 4-9. Présentation d'un tube à impédance (en bas) et de son installation verticale au CEREMA de Strasbourg (en haut)

La gamme de fréquence prise en compte lors des présents essais se situe entre 250 et 2000 Hz. Cette limite de mesure en haute fréquence f_{max} est fixée par la norme ASTM E1050 selon la relation de l'Equation 8. Il est nécessaire de travailler en-dessous de cette limite supérieure de fréquence pour s'assurer de la propagation d'ondes planes dans le tube par la relation suivante :

$$f_{max} < \frac{0{,}586.c}{d} \qquad \textbf{Équation 8}$$

c représentant la célérité des ondes acoustiques planes en $m.s^{-1}$ et *d* le diamètre interne du tube en m.

Le diamètre du tube est ici de 10cm, un tel diamètre est nécessaire pour minimiser les effets liés à la non homogénéité des matériaux et prendre en compte la taille importante des granulats ainsi que pour empêcher des effets de bord. Afin d'insérer les échantillons dans le tube de Kundt, ceux-ci sont préalablement entourés de ruban de téflon et une fine couche de vaseline est disposée en périphérie de l'échantillon pour s'assurer d'une parfaite étanchéité.

Cette gamme de fréquence restreinte entre 250 et 2000Hz est fixée d'une part par la limite supérieure de fréquence qui est imposée par le diamètre du tube. Il est en effet nécessaire de travailler en-dessous de cette limite supérieure de fréquence pour s'assurer de la propagation d'ondes planes dans le tube. La limite basse de fréquence d'autre part est imposée par la distance existante entre les 2 premiers microphones.

Le tube de Kundt utilisé admettant des échantillons cylindriques d'un diamètre précis de 100mm, des moules cylindriques de diamètre différents ont dû être utilisés. En effet, des effets de retrait ou gonflement des échantillons différents selon les biocomposites apparaissent. Ils peuvent être liés aux granulats en tant que tels (la moelle a tendance à fortement se dilater lorsqu'elle est hydratée et d'engendrer un retrait lors de son séchage). De même, les proportions volumiques liant/granulats varient selon les biocomposites ainsi que la force de compactage utilisée pour leur élaboration. Ces différents facteurs impactent le comportement des matériaux lors de la phase de séchage. Ainsi, les échantillons RSD5 et SBD8 ont tendance à développer un léger gonflement et les échantillons contenant de la moelle de tournesol SBPD5 et SPD2 ont tendance à développer des phénomènes de retrait.

Glé et Arnaud ont déterminé, lors de l'étude de granulats de chanvre (chènevotte) que les pores inter-granulaires plus volumineux et disposant de connections plus larges entre les pores que les pores intra-granulaires, participent pour l'essentiel aux propriétés acoustiques (Glé et al. 2011), (Glé et al. 2012). Trois proportions volumiques liant:granulats différentes sont utilisés dans les différents biocomposites SPD2, RSD5-SBPD5 et SBD8 de forme cylindrique, de diamètre 100mm et d'épaisseur 40mm. De même, la force de compactage utilisée pour l'élaboration des éprouvettes diffère d'un biocomposite à l'autre. Il est par conséquent attendu que le compactage ait une influence sur la porosité inter-granulaire et les propriétés acoustiques.

Lors des mesures, nous avons considéré de façon distincte les deux faces des échantillons. Nous avons vu en effet dans le chapitre 3 que lors de l'élaboration des éprouvettes par compactage, un différentiel de densité se crée le long des cylindres engendrant par la même des ruptures mécaniques de façon préférentielle dans la partie la moins dense. De même, l'aspect des éprouvettes dans le fond et au-dessus de celles-ci est légèrement différent, ils nous a par conséquent semblé nécessaire d'effectuer les essais sur chacune des 2 faces et de les comparer comme ce qui a été effectué par Degrave-Lemeurs et al. (Degrave-lemeurs et al. 2018) pour des mélanges chaux-chanvre et terre-chanvre. Ainsi, la face A représente la face inférieure lisse et la face B, la face supérieure rugueuse des cylindres étant en contact avec le piston lors de la phase de compactage.

4.3.1.1 Effet du type de biocomposite

Les résultats des mesures d'absorption acoustique présentés sur la Figure 4-10 indiquent en effet que l'échantillon le moins compacté (SPD2) développe la meilleure absorption acoustique sur la gamme de fréquence étudiée, les composites RSD5 et SBPD5 de même ratio volumique liant:granulats engendrent des phénomènes d'absorption acoustique similaires et les composites les plus compactés SBD8 vont engendrer des phénomènes d'absorption acoustique réduits comparativement aux autres composites. Une méthode de détermination acoustique de la porosité inter-granulaire développée par Philippe Glé (Glé 2014) corrobore ce différentiel de valeurs, les résultats sont présentés dans le Tableau 4-2. Un pic d'absorption avec un coefficient α Sabine de 0,8-0,9 est observable vers 800-1000Hz pour les composites RSD5 et SBPD5 et un pic d'intensité supérieure à 0,95-1,00 est observable dans la zone 1000-1500Hz pour le composite SPD2. La présence de pics d'absorptions indique la présence de plusieurs échelles de porosités comme cela a pu être constaté sur les bétons de chanvre par Cérézo (Cerezo 2005) pour des épaisseurs de 100mm. Le composite SBD8 ne développe quant à lui aucun pic d'absorption, les valeurs du coefficient α Sabine présentant des valeurs stables de 0,4-0,6 sur la gamme de fréquence 250-2000Hz.

Biocomposites	Masse volumique (kg/m3)	Estimation porosité intragranulaire (>10µm)
SBD8	714	44%

RSD5	438	57%
SBDPD5	512	Non exploitable
SPD2	235	66%

Tableau 4-2. Porosité intergranulaire des biocomposites évaluée par méthode acoustique

Les propriétés d'affaiblissement acoustique sont quant à elles davantage affectées par la masse volumique des matériaux utilisés, plus celle-ci est élevée, plus le matériau aura la capacité d'absorber les ondes sonores incidentes. En effet, plus une paroi sera lourde et épaisse plus l'affaiblissement sera important selon la loi de masse applicable pour une paroi ne comportant qu'un seul matériau homogène (Equation 9).

$$TL = 19logM + 20logf/500$$ **Équation 9**

Avec *TL* : affaiblissement acoustique
M : masse surfacique de la paroi en kg/m^2
f : fréquence

Les résultats des mesures d'affaiblissement acoustique présentés sur la Figure 4-11 sont en bonne adéquation avec la hiérarchie des valeurs attendues vis-à-vis de la masse volumique des composites présentée dans le Tableau 4-3. Ainsi, l'affaiblissement acoustique engendré par SBD8 est environ 2 fois supérieur à celui engendré par les composites RSD5 et SBPD5 et 3 fois supérieur à celui engendré par le matériau le moins dense : SPD2.

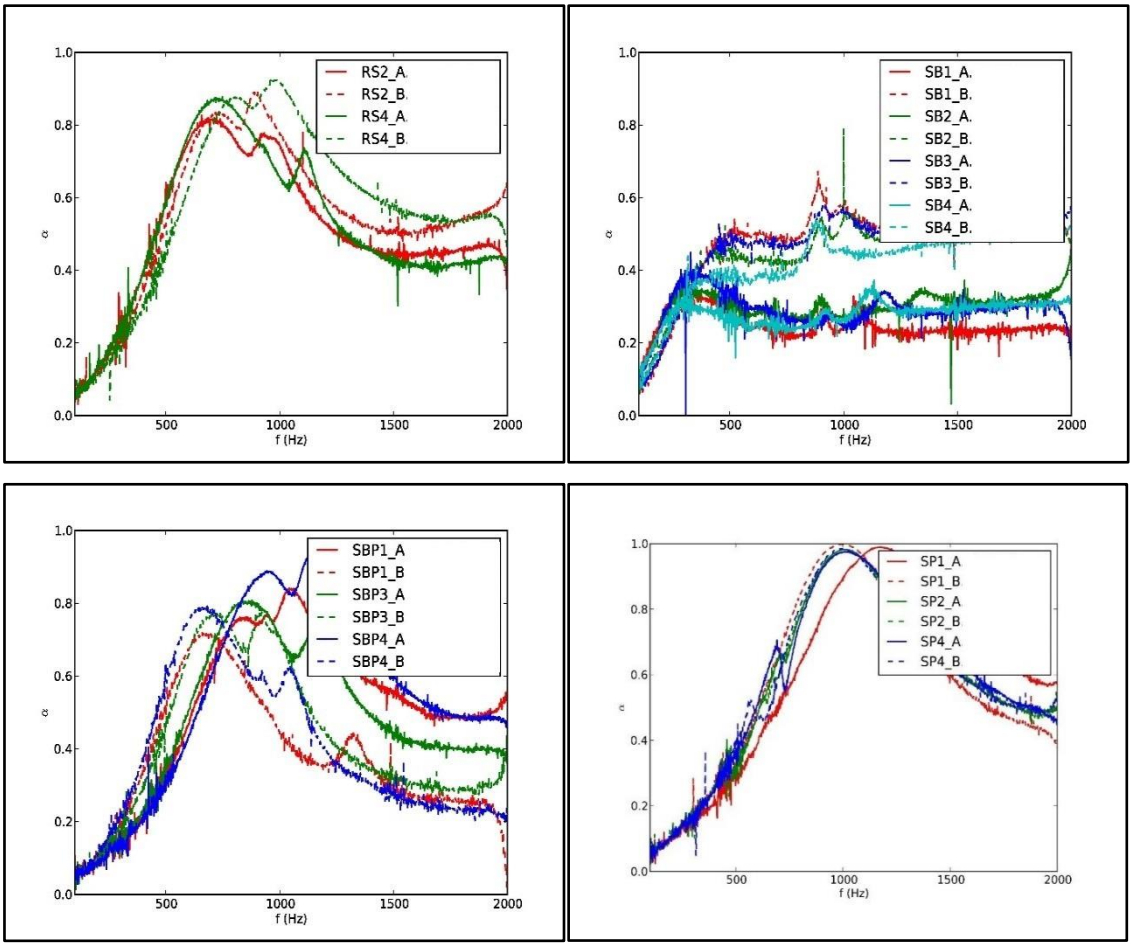


Figure 4-10. Coefficients d'absorption α Sabine des composites RSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) selon les faces inférieures (A) ou supérieures (B)

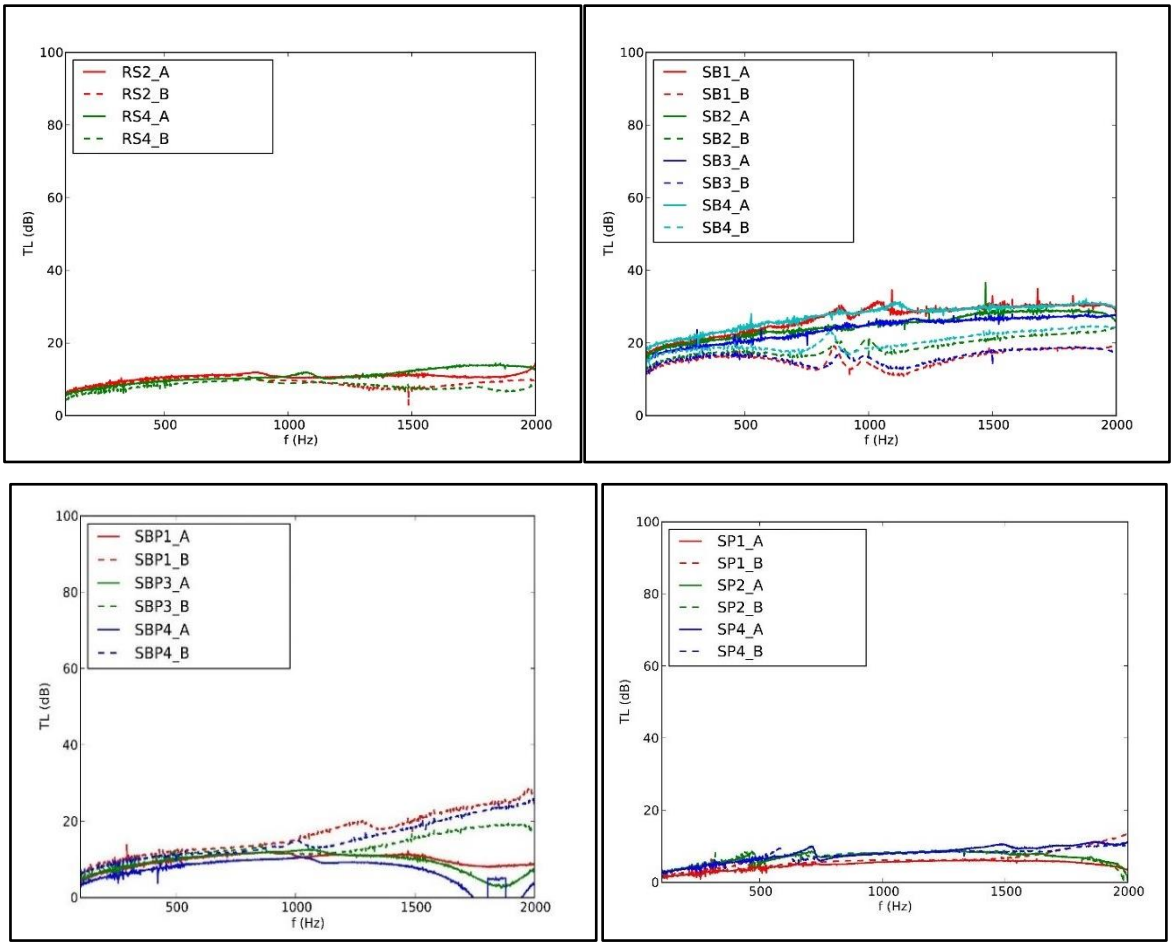


Figure 4-11. Affaiblissement acoustique TL des composites RSD5 (haut à gauche, SBD8 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite) selon les faces inférieures (A) ou supérieures (B)

4.3.1.2 Effet de l'enduit de finition

Les matériaux isolants élaborés à partir des composites SPD2, RSD5, SBPD5 et SBD8 sont en règle générale recouverts d'un enduit de finition dont la vocation est à la fois esthétique et d'éviter un effritement des isolants par contact. L'impact de l'ajout d'enduits de finition élaborés à base de mortiers terre-sable dans les proportions et épaisseurs décrites au paragraphe précédent de ce chapitre a été étudié. L'application de ces enduits engendre une modification de l'état de surface du matériau, plus lisse, favorisant la réverbération et minimisant par conséquent l'absorption acoustique. De même cette couche de 8mm de mélange terre-sable a une masse volumique nettement plus importante que celle des biocomposites et possède sa

propre porosité. Une augmentation de l'affaiblissement acoustique est par conséquent attendue par rapport aux composite sans enduits de finition.

Nous constatons sur la Figure 4-12 une homogénéisation des valeurs d'absorption acoustique des différents matériaux. Le parement apposé sur le matériau isolant gouverne les propriétés acoustiques des composites. Une baisse drastique de l'absorption acoustique est observée suite à l'application de l'enduit terre-sable, le coefficient d'absorption α Sabine se situant entre les valeurs 0,1 et 0,2 sur la gamme de fréquence 250-2000Hz avec une absence de pics d'absorption contrairement aux composites sans-enduits.

Nous constatons sur la Figure 4-13 que les propriétés d'affaiblissement acoustique engendrées par les composites enduits sont sensiblement améliorées, elles sont de l'ordre de 40 à 60dB pour les composites enduits RSD5 et SBD8 et de 30 à 40dB pour les composites SBPD5 et SPD2 dans la gamme de fréquence 500-2000Hz tandis que ces valeurs se sont révélées inférieures à 20dB pour les composites sans enduits RSD5, SBPD5 et SPD2 et de l'ordre de 20 à 30dB pour les composites SBD8. L'enduit de finition apporte un gain de performance conséquent en termes d'affaiblissement acoustique des sons extérieurs. Il convient toutefois de prendre en compte que l'obtention d'une parfaite étanchéité en périphérie des échantillons est difficile à assurer, même avec comme ici, un colmatage à la vaseline. Cette prise en compte est nécessaire pour analyser les écarts d'affaiblissement acoustique pouvant apparaître pour un même matériau selon les échantillons.

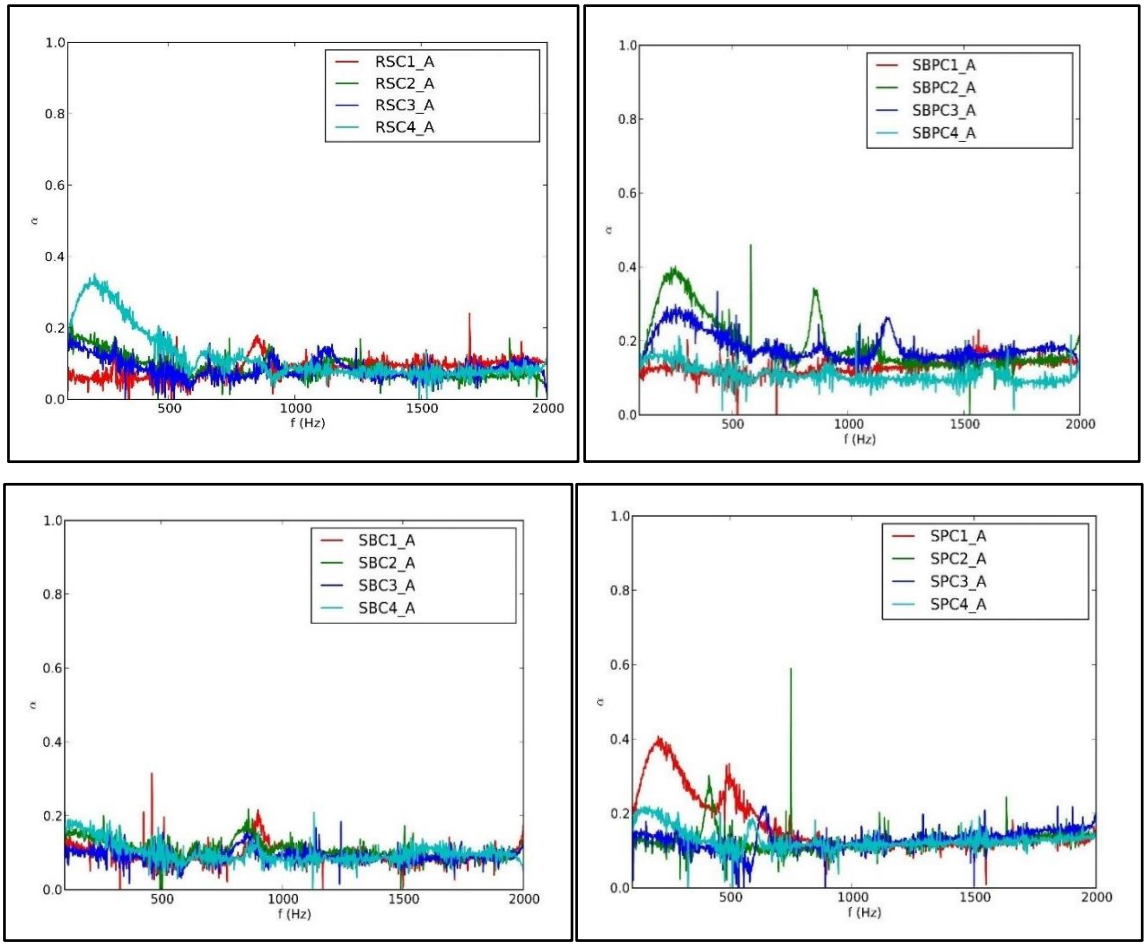


Figure 4-12. Coefficients d'absorption α Sabine des composites avec enduits de finition RSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite)

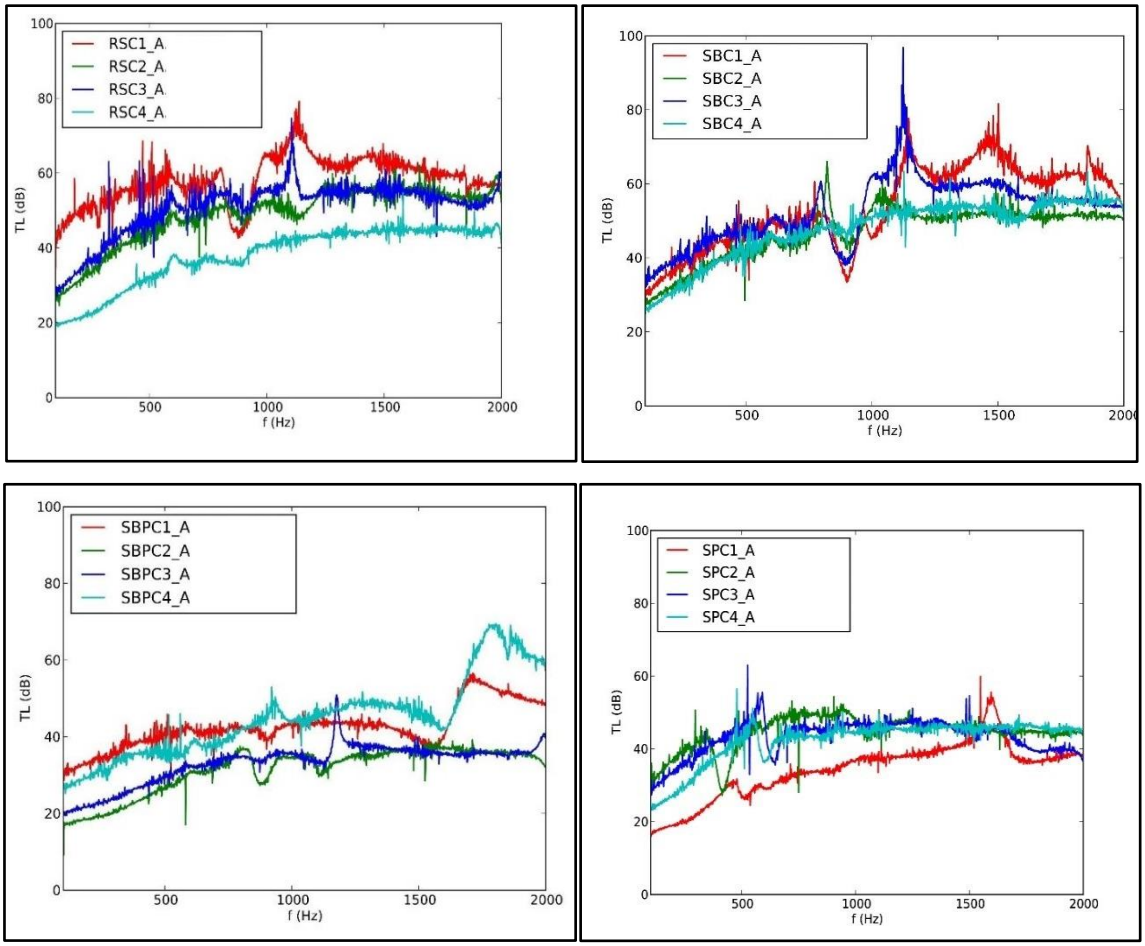


Figure 4-13. Affaiblissement acoustique TL des composites avec enduitsRSD5 (haut à gauche, SBD5 (haut à droite), SBPD5 (Bas à gauche) etSPD2 (bas à droite)

4.4 Evaluation expérimentale et numérique d'une paroi en tuffeau isolée en terre-colza

4.4.1 Caractérisation expérimentale de la résistance thermique de la paroi

4.4.1.1 Préparation de la paroi

La chambre climatique 3R est un système de boite chaude gardée permettant de mesurer le flux de chaleur traversant une paroi disposant d'une fenêtre de mesure de 80x80cm à l'échelle 1. Dans le cadre de cette étude, un montage similaire à celui réalisé par Madrid et al. (Madrid et al. 2018) sur une paroi de blocs en chaux-terre:sciure de bois a été mis en place. Ici, un mur en

pierre de tuffeau de 120x120cm a été monté avec des blocs de 20cm d'épaisseur jointoyés à la chaux par l'artisan partenaire du projet (Figure 4-14). L'enduit isolant testé lors de ce montage correspond au mélange RSD5, c'est-à-dire un volume d'argile pour un volume d'eau et 7 volumes de colza broyé. Les volumes ont été mesurés avec des seaux de 20L, le colza ayant été légèrement vibré et arasé. Afin de se rapprocher du protocole de fabrication utilisé au laboratoire, la terre crue puis l'eau ont été incorporés dans un premier temps dans la bétonnière puis, après 5min, le colza broyé. L'enduit isolant a été appliqué par banchage et compacté à la main. Avant chaque application de l'enduit, un mélange de terre et d'eau de fraction volumique 1 :1 faisant office de gobetis d'accroche a été appliqué sur la hauteur d'une banche. Le comportement fortement capillaire de la pierre de tuffeau impose en effet d'appliquer cette couche d'accroche progressivement pour que le calcaire n'ait pas le temps d'assécher l'argile avant que l'enduit isolant ne soit appliqué. Le mélange terre-colza est versé strate après strate entre la planche de coffrage et le mur et compacté à la main sur une épaisseur de 10cm. Les planches de coffrages ont été retirées 24h après l'application de l'enduit isolant afin de favoriser le séchage, de limiter l'apparition de moisissures, et de répondre à la question des artisans pour la mise en œuvre et l'organisation des travaux lors d'un chantier de rénovation.

Figure 4-14. Paroi de pierres de tuffeau maçonnées à la chaux

Lors du séchage de la paroi, des fissures sont apparues provoquant des strates dans l'enduit isolant. Le compactage engendre une remontée de l'eau contenue dans le mortier isolant à la surface de chaque strate et l'excès d'eau entre 2 strates induit une fissuration lors du séchage. Ces phénomènes de retrait se retrouvent régulièrement après le banchage de bétons végétaux. Un colmatage des fissures fut alors nécessaire pour éviter les déperditions thermiques (Figure 4-15).

Ici, en vue d'observer l'influence de ces fissurations sur nos résultats, deux essais ont été effectués sur la paroi en imposant des conditions aux limites similaires avant et après la réparation des fissures.

La réparation a été réalisée en comblant les fissures par des couches d'isolant de laine de bois qui possède une conductivité thermique proche de celle de l'isolant utilisé (λ laine de bois=0,05 $W/m^{-1}.K^{-1}$).

Figure 4-15. Enduit isolant de composition RSD5 appliqué sur la paroi en tuffeau avant colmatage des fissures à l'aide de laine bois à gauche et après à droite

4.4.1.2 Présentation du dispositif

Cette expérimentation a nécessité l'utilisation d'une chambre climatique de type « thermo3 » présente au laboratoire PRISME de l'université d'Orléans (Figure 4-16). Il s'agit d'un dispositif de mesure des transferts thermiques à l'échelle 1, au travers d'une paroi plane verticale. Le principe de l'expérience consiste à disposer un modèle de paroi adapté, entre deux cellules climatiques nommées respectivement chambre chaude et froide (Figure 4-17). Lors de cette expérimentation, la cellule placée en chambre chaude simule l'intérieur d'une pièce de vie contenant un système de chauffage et un générateur d'humidité. L'objectif étant de maintenir les consignes de température et d'humidité relative imposées par l'utilisateur. La deuxième simule l'ambiance extérieure, seule la température peut y être fixée.

Ce dispositif expérimental permet : à la fois d'évaluer la température et l'humidité relative au cours du temps et également de caractériser le comportement hygrothermique de la paroi étudiée en fonction des conditions imposées par l'opérateur pour simuler des conditions extérieures et intérieures différentes.

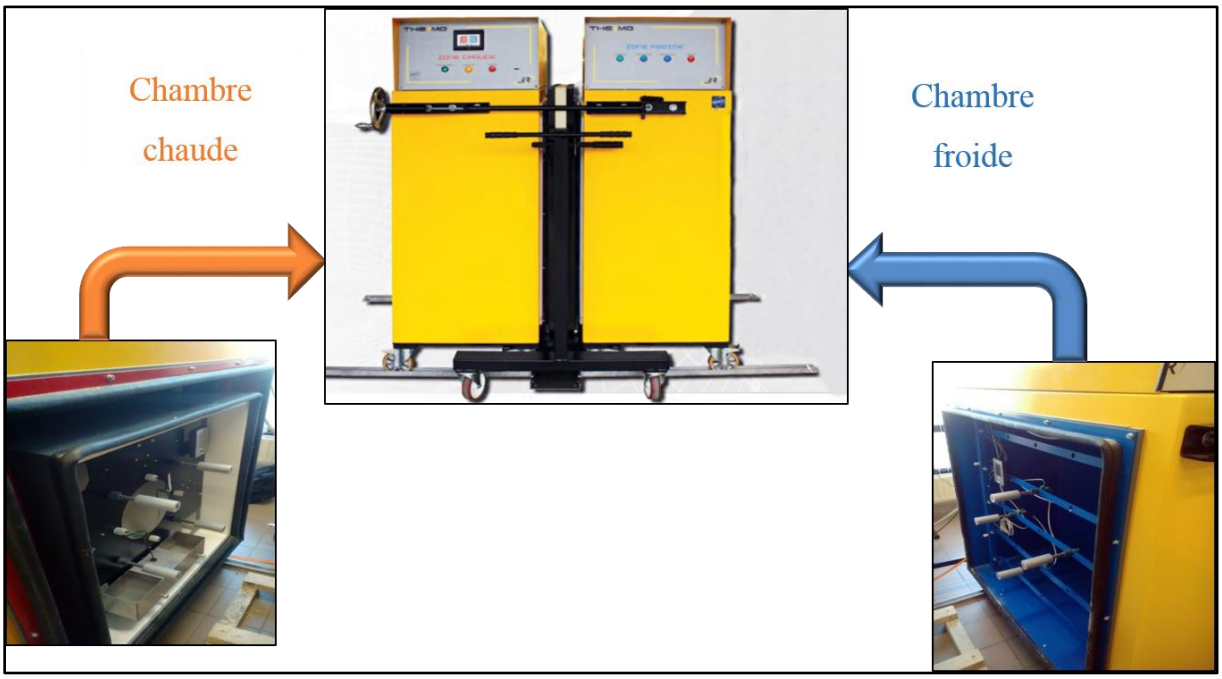


Figure 4-16. Chambre climatique thermo3

Figure 4-17. Paroi disposée dans la chambre climatique

4.4.2 Approche numérique du comportement hygrothermique de la paroi

4.4.2.1 Transfert hygrothermique dans un matériau poreux

Les transferts d'humidité et de chaleur dans le logiciel WUFI 2D utilisé pour les simulations numériques est basé sur les équations de conservations d'humidité et de chaleur. Künzel (Künzel 1995) a développé un modèle permettant de prendre en compte les transports couplés de chaleur et de masse en partant des équations 5 et 6 permettant de relier les paramètres thermo-hydrique:

- **Conservation de la masse :**

$$\underbrace{\frac{\partial w}{\partial HR}\frac{\partial HR}{\partial t}}_{\text{Inertie Hydrique}} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\underbrace{D\varphi\,.\frac{\partial HR}{\partial x}}_{\text{Diffusion liquide}} + \underbrace{\delta p.\frac{\partial}{\partial x}(HR.Psat)}_{\text{Diffusion vapeur}}\right) \quad (5)$$

- **Conservation de la chaleur :**

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}.c.\rho 0}_{\text{Inertie thermique}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda.\frac{\partial T}{\partial x}\right)}_{\text{Conduction thermique}} + \underbrace{Lv.\frac{\partial}{\partial x}\left(\delta p\,.\frac{\partial}{\partial x}(HR.psat)\right)}_{\text{Convection liquide et convection vapeur}} \quad (6)$$

Avec :

HR : humidité relative [-], t : temps [s]

Psat : pression de vapeur saturante [Pa]

ρ0 : masse volumique apparente sèche [kg.m-3]

w : teneur en eau du matériau [kg.m-3]

c: chaleur massique du matériau [J.kg-1.K]

Dφ : conductivité liquide [kg.m-1.s-1]

λ: conductivité thermique du matériau [W.m-1.K-1]

δp : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau

Lv : chaleur latente de changement de phase [kg.m-1.s-1.Pa-1]

Les différents paramètres varient avec l'humidité relative et donc la teneur en eau du matériau, le flux de vapeur d'eau est également responsable d'un flux additionnel d'énergie engendré par le flux de chaleur latente h_v issu des changements de phase de l'eau. Cette approche permet de

constater que les deux équations et par conséquent les flux de masse d'eau et de chaleur sont fortement couplés.

4.4.2.2 Outil de simulation numérique : WUFI

Les dernières décennies ont connues l'émergence de nombreux modèles HAM (Heat, Air and Moisture). L'essor continu de l'outil informatique a permis le développement de modèles de plus en plus complexes, fiables et rapides. De nombreux supports différents sont ainsi utilisés (WUFI, Comsol Multiphysics, TRNSYS, Fortran, Energy Plus, Matlab/Simulink...) (Oumeziane 2014). "WUFI 2D" est un logiciel d'analyse éléments finis développé par Künzel (Künzel 1995), il permet de simuler les transferts de chaleur, et d'eau sous forme liquide et de vapeur (Eq.5 et 6) autorisant la prédiction des données liées à la température et l'humidité des parois multicouches d'une construction soumises à un régime climatique dynamique. L'influence de l'un et l'autre de ces paramètres ainsi que leurs interactions réciproques sont prises en compte lors de l'évaluation des performances des parois

Les caractéristiques des matériaux et les conditions climatiques peuvent être sélectionnées parmi ceux présents dans le logiciel ou être insérées dans la base de données de WUFI pour la compléter à partir des conditions climatiques réelles et des mesures in situ. Les données intégrées dans le logiciel WUFI ont été reprises des différentes caractérisations effectuées lors de ce projet. D'autres données telles que la conductivité thermique λ, la chaleur spécifique Cp et la résistance à la diffusion μ de RSD5 ont été déterminées lors des simulations WUFI suivantes en comparant les résultats numériques et expérimentaux.

4.4.2.3 Géométrie et condition aux limites

La paroi étudiée est une paroi multicouche constituée de trois différentes couches (Figure 4-18):

- Une couche de tuffeau
- Une couche d'isolant biosourcé (RSD5)
- Une couche d'enduit de finition à base d'argile

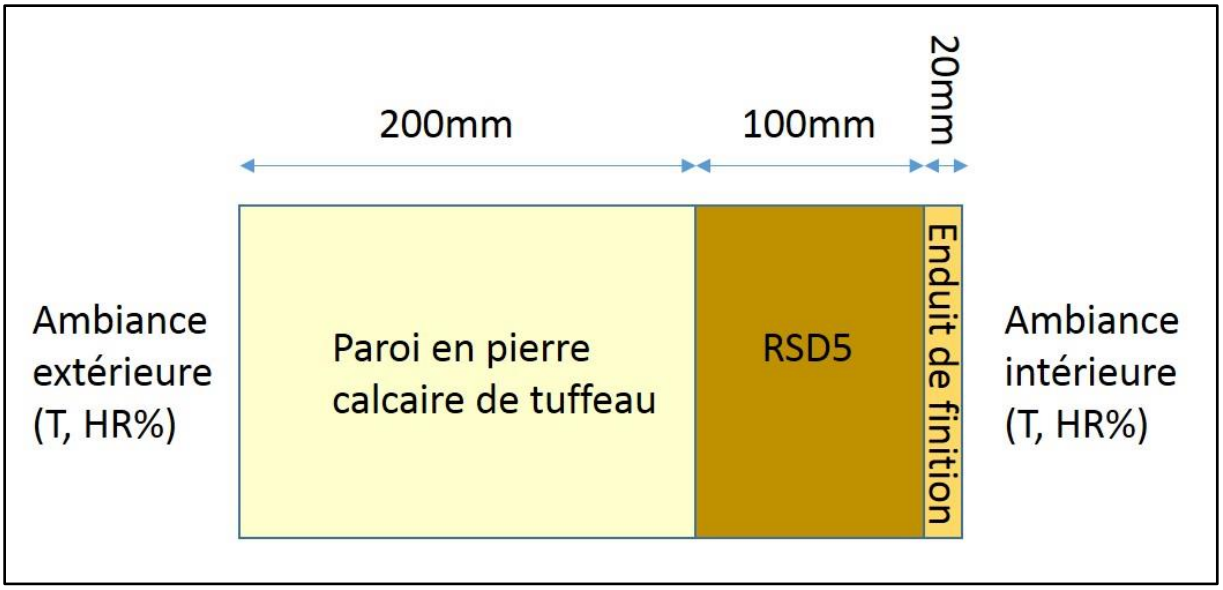


Figure 4-18. Paroi multicouche modélisée et conditions aux limites

Afin d'étudier l'influence de l'enduit de finition sur le séchage de l'isolant biocomposite, deux modèles de paroi ont été considérés:

- Paroi avec enduit : Mur en tuffeau | isolant RSD5 | enduit de finition
- Paroi sans enduit : Mur en tuffeau | isolant RSD5

Afin de déterminer la conductivité thermique λ à l'état humide, la chaleur spécifique Cp et le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur μ, des simulations numériques ont été effectuées sur la paroi sans enduit de finition, les résultats expérimentaux du flux de chaleur obtenus via la chambre climatique étant utilisés comme référence. Pour réaliser ces simulations, les données de température et d'humidité relative mesurées dans les deux chambres, chaude et froide ont été insérées dans un fichier climat servant de référence de paroi dans le logiciel WUFI.

Chaque matériau est défini par des paramètres intrinsèques :

- Masse volumique ρ [kg/m^3]
- Conductivité thermique λ [W/(m.K)]
- Porosité n [%]
- Coefficient de résistance à la diffusion Rd [-]
- Chaleur spécifique Cp [J/(kg.K)]

4.4.2.4 Evaluation des paramètres de l'isolant

La mise en œuvre de l'isolant par banchage a modifié ses propriétés mesurées sur les éprouvettes élaborées au laboratoire. En effet l'utilisation des propriétés déterminées expérimentalement pour la simulation numérique a montré un écart entre le flux mesuré et le flux calculé. Ainsi pour utiliser des paramètres se rapprochant du matériau banché pour étudier l'effet de l'enduit de finition, nous avons réalisé des simulations numériques des essais expérimentaux dans la cellule climatique avec les mêmes conditions de température et d'humidité en changeant les paramètres (conductivité thermique, chaleur spécifique, et résistance de diffusion à la vapeur). Une comparaison a été réalisée ensuite entre le flux de chaleur résultant de la simulation numérique et expérimentale avec une différence de température de 25°C entre les façades de la paroi et une humidité relative imposée dans la chambre chaude égale respectivement à 66% et 68% pour le premier et deuxième essai. La simulation avec le logiciel WUFI a été réalisée en faisant uniquement varier les conditions initiales: Température initiale T_{init} et humidité relative initiale HR_{init}. . L'étude paramétrique a été réalisée pour chaque paramètre seul et après pour les trois pour pouvoir finalement trouver un jeu de paramètres à utiliser pour la suite des simulations numériques.

Matériau	Densité [kg/m^3]	Porosité [%]	Cp(J/(kg.K))	λ (W/(m.K))	Rd[-]	Epaisseur [mm]
Tuffeau	1310	48	650	0,48	20	200
RSD5	300	77	1300	0,1	4,5	100
Enduit de finition à base d'argile	1600	67	850	0,85	7	20

Tableau 4-3. Paramètres insérés dans la base de données de WUFI

Cas 1 : HR=66% et ΔT=25 °C

Les conditions initiales de température ont été mesurées dans la cellule climatique à 21°C dans la chambre chaude et au sein même du composite RSD5 via une sonde additionnelle (Figure 4-19) introduite au milieu de la couche de l'isolant indiquant une humidité relative stabilisée au début des essais à 85%. Les deux courbes des flux de chaleur déterminées expérimentalement et numériquement, sont présentées dans les Figure 4-20 et 4-21, les oscillations observées sur la courbe expérimentales étant provoquées par la régulation du thermostat de la chambre climatique:

Figure 4-19. Sonde de mesure de température et humidité relative interne à l'isolant RSD5

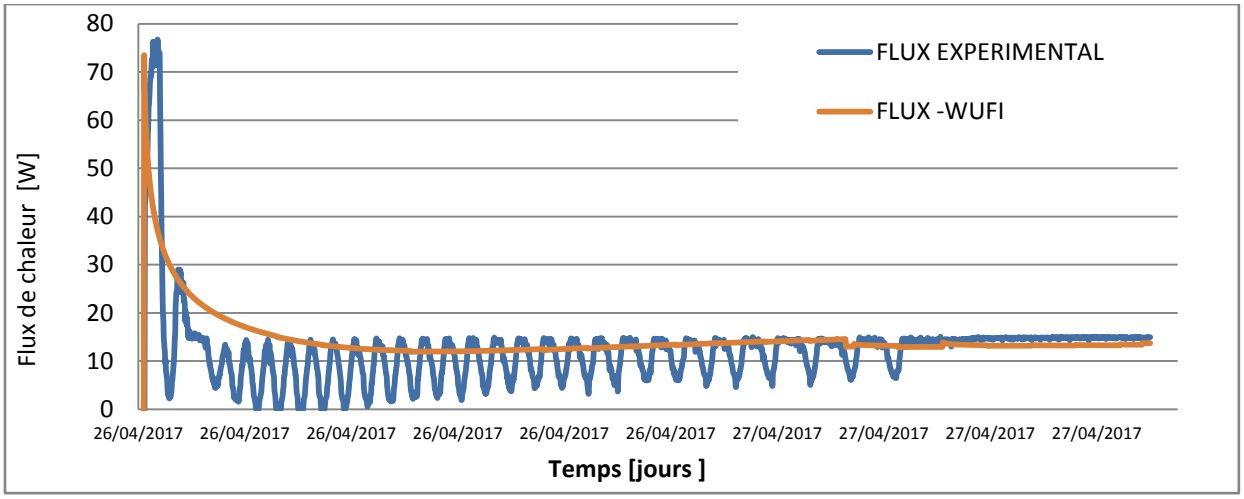


Figure 4-20. Essai avec ΔT=25°C--HR=66%

Cas 2 : HR=68% et ΔT=25 C

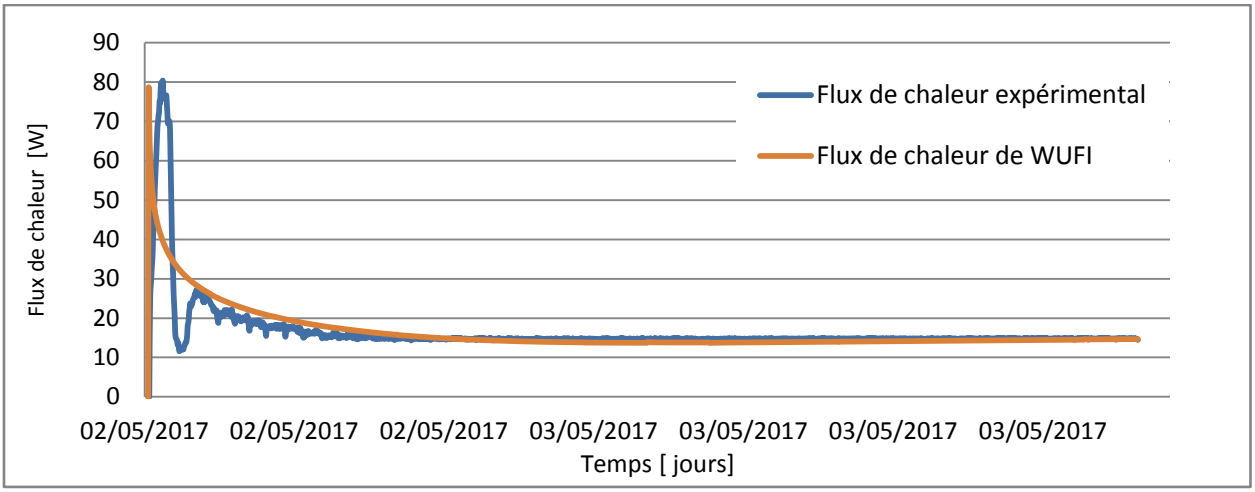


Figure 4-21. Essai avec ΔT=25°C-HR=68%

Les courbes du flux de chaleur expérimentales et numériques présentées sur les figures (4-20 et 4-21) correspondent aux résultats selon une concordance satisfaisante. Ces paramètres (Tableau 4-3) ont été donc conservés pour la suite des simulations numériques.

4.4.3 Etude numérique de l'influence de l'enduit sur la durée de séchage de l'isolant biocomposite

Pour des raisons esthétiques autant que pour prévenir les dégradations de l'isolant, une couche d'enduit de finition est généralement appliquée en tant que parement intérieur sur les murs recouverts d'isolants à base de bétons biosourcés. Toutefois, étant généralement appliquée après séchage dans le cas des matériaux à base de végétaux mis en place par banchage, la date de clôture d'un chantier employant les isolants terre:végétaux est d'autant retardée. En vue de récolter des données sur l'impact de l'application d'un enduit de finition sur la durée de séchage de l'isolant RSD5, l'influence de 4 types d'enduits différents sur la durée de séchage a été étudiée: enduit à base d'argile (correspondant à l'enduit utilisé réellement sur les chantiers), enduit à la chaux, enduit « bâtard » (chaux-ciment), enduit au ciment et enfin sans enduit de finition. Pour le calcul numérique, une exposition de la paroi à un climat pluvieux a été modélisé par une faible température (T_{ext}=5°C) et une grande humidité relative (HR=95%) suivi d'un climat ensoleillé modélisé par une forte température (T_{ext}=30°C) et une faible humidité relative (HR=60%) (Figure 4-22).

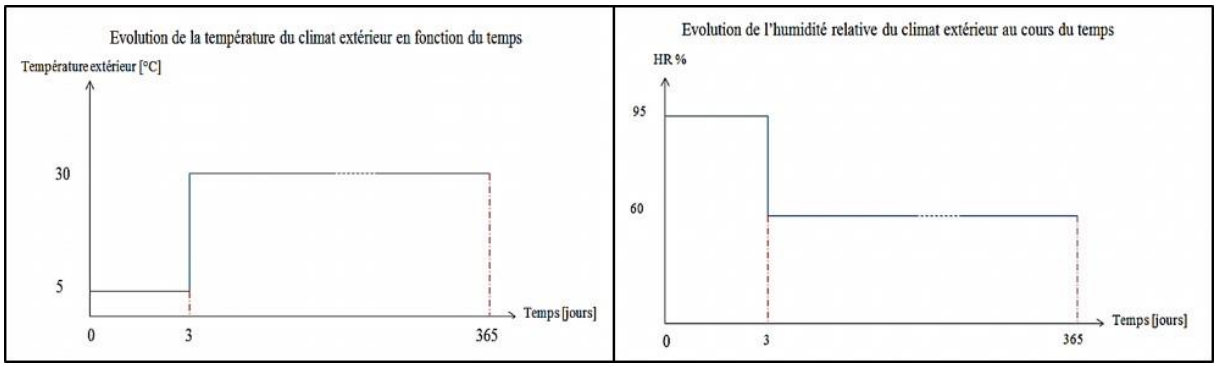


Figure 4-22. Variation de la température et l'humidité relative du climat extérieur en fonction du temps

Le calcul de la durée de séchage du biocomposite RSD5 étudié est basé sur la mesure de l'humidité au sein du matériau à l'aide d'une sonde mesurant la teneur en eau (voir figure 4-18) ainsi que sur la courbe de sorption-désorption du matériau, celle-ci permettant d'aboutir à la teneur en eau de RSD5 selon le taux d'humidité relative auquel il est exposé. À partir de la teneur en eau calculée au niveau de l'isolant en fonction du temps, le temps de séchage est pris égal à la durée prise pour passer de : 65% ou 56% à 44%HR (selon le cas étudié). L'humidité relative 65%, est récupérée à partir des mesures d'humidité relevées au cœur de l'échantillon (Figure 4-23). En effet, l'humidité au cœur de l'isolant passe d'une valeur moyenne de 90 % après le banchage à une valeur de 65 % après environ deux mois dans la salle d'essai entre avril et juin 2017. La teneur en eau (prise comme valeur du début de séchage) est ensuite déterminée à partir de la courbe de désorption de RSD5 (Figure 4-24), ainsi, la teneur en eau du composite RSD5 placée dans une atmosphère de 65% d'humidité relative est de 73.81 kg/m^3.

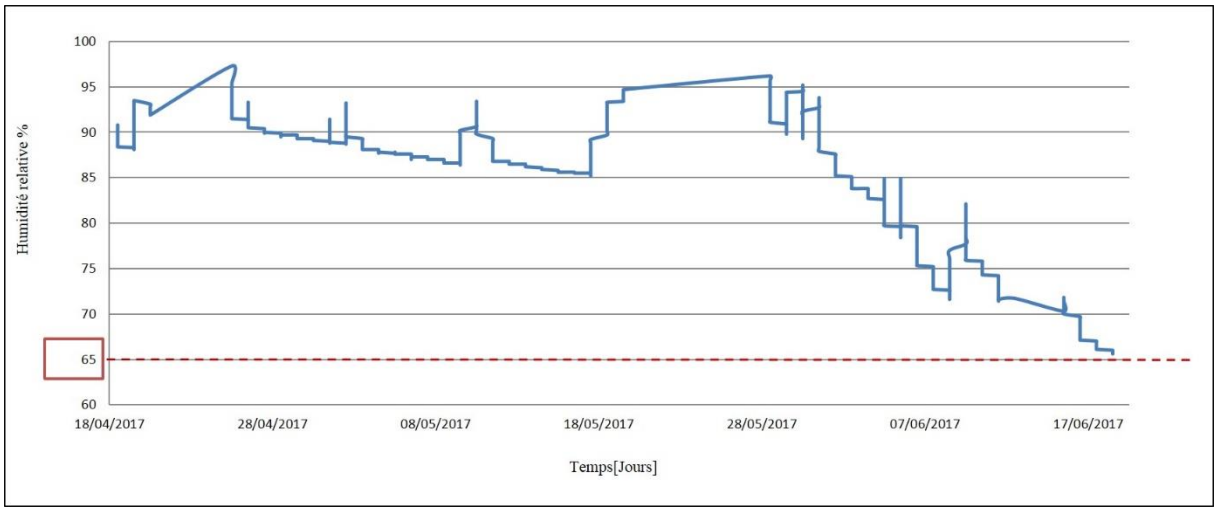


Figure 4-23. Evolution de l'humidité relative au milieu de l'isolant argile+ colza en fonction du temps

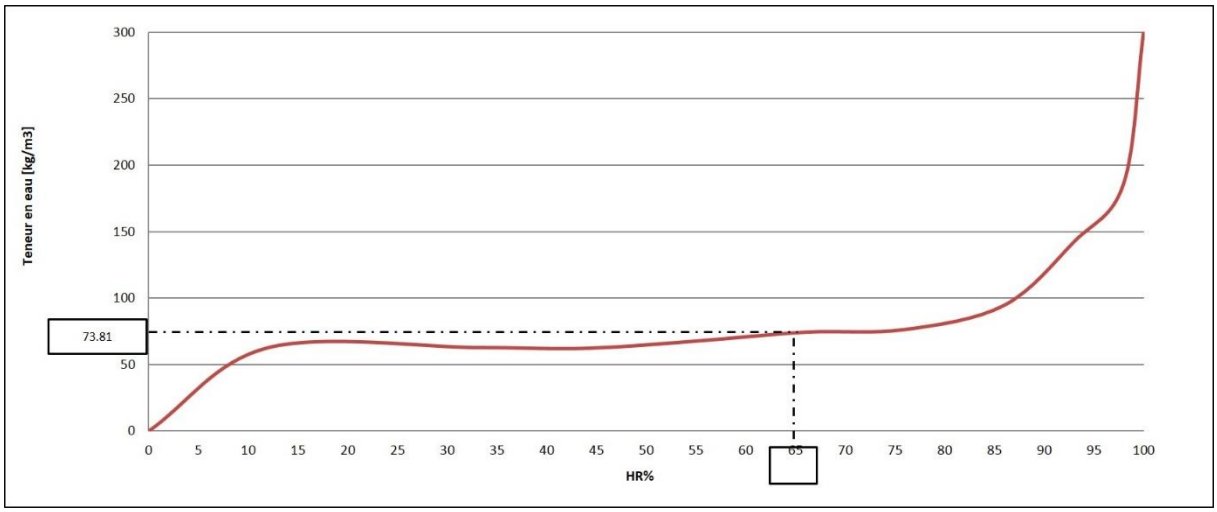


Figure 4-24. Courbe de sorption de l'isolant RSD5

Le choix de l'enduit de finition a une influence directe sur l'évolution de la teneur en eau dans l'isolant. Par conséquent, la durée de séchage de ce dernier fraichement mis en œuvre (correspondant à la durée ou il atteint la teneur en eau cible de 73 kg/m^3) sera influencée par le choix de l'enduit. Pour mettre en évidence cette influence, la durée de séchage de l'enduit isolant RSD5 a été calculée pour chaque enduit utilisé. Les durées de séchage sont présentées dans le Tableau ci-dessous :

	Sans enduit	Enduit à la chaux	Enduit à base d'argile	Enduit chaux:ciment	Enduit ciment

Durée de séchage [jours] HR 65%	46.5	81	109	136	210
Durée de séchage [jours] HR 56%	75,5	132	181	232,5	353

Tableau 4-4. Durée de séchage de la couche d'isolant selon la composition de l'enduit de finition utilisé

Comme indiqué sur la Figure 4-25, la valeur d'humidité relative de 44% n'est pas atteinte après une année de séchage. La variation des durées de séchage est engendrée par le facteur de résistance à la diffusion de vapeur de chaque enduit utilisé (Figure 4-26). En effet, plus l'enduit admet une diffusion de vapeur importante plus l'évacuation de l'eau présente dans l'isolant sera aisée et donc la durée de séchage sera faible.

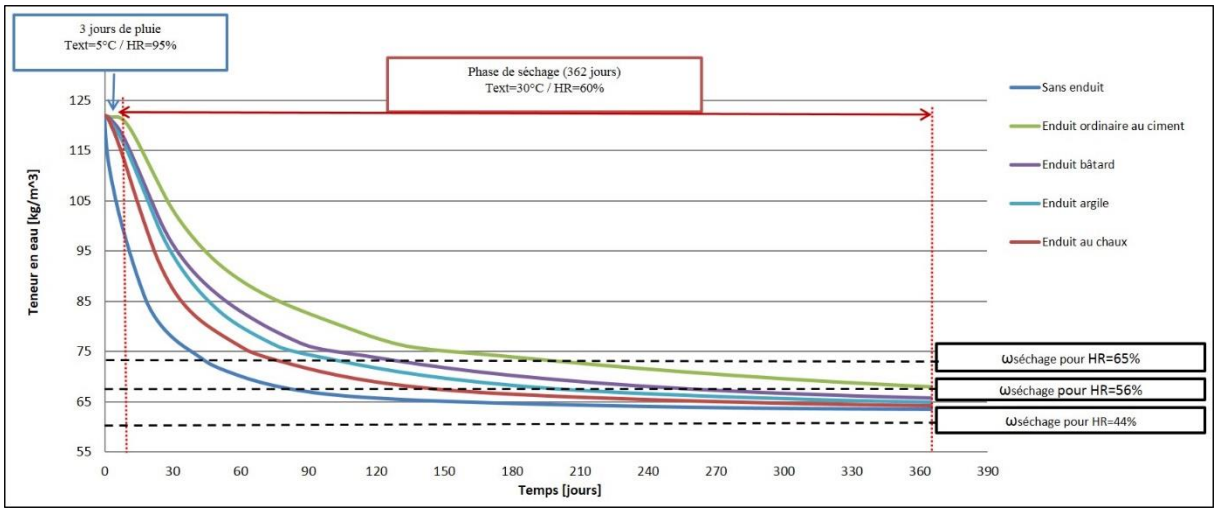


Figure 4-25. Variation de la teneur en eau à l'intérieur de l'isolant biocomposite en fonction du temps

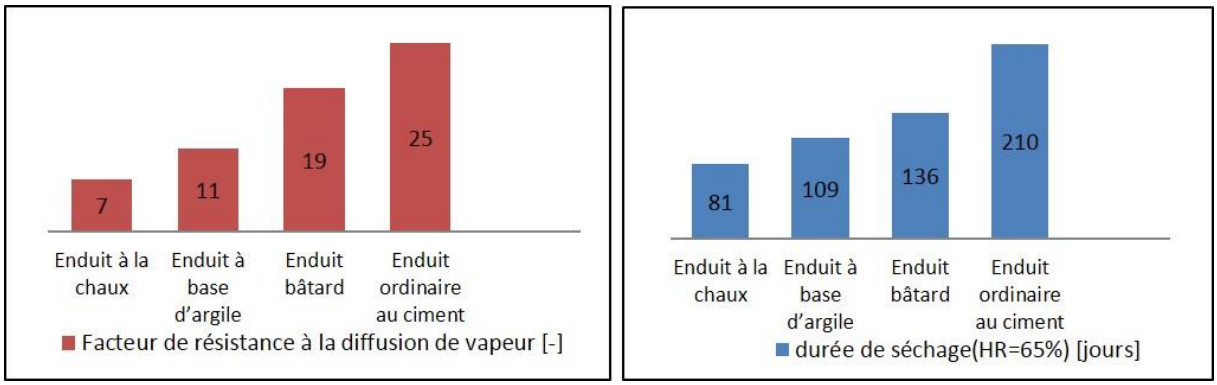


Figure 4-26. Facteur de résistance à la diffusion et durée de séchage de différents enduits de finition

Cette étude comparative établie la pertinence de l'utilisation d'enduits de finition en terre-crue en terme de régulation de l'humidité et donc de séchage d'un isolant en terre-végétaux par rapport à d'autres enduits à base de chaux et ciment. De même, l'enduit de finition à base de chaux permettant d'aboutir à une évacuation plus rapide de l'humidité de la paroi sera à privilégier par rapport aux enduits contenant une proportion de ciment Portland. Ces simulations permettent également de mettre en avant que la durée de séchage de l'isolant biocomposite recouvert d'un enduit de finition à base d'argile est deux fois et demie plus importante que celle sans enduit. Toutefois, il a été constaté par Jay et al. (Jay et al. 2017) que la mise en place ou non d'un enduit de finition sur des blocs de chaux-chanvre non secs a un impact moindre sur la durée de séchage. La diminution de la période de séchage étant un facteur essentiel pour éviter l'apparition de moisissures dans l'isolant bio composite, une attention particulière doit être apportée sur le type d'enduit de finition à utiliser (ou son absence) au moment de la mise en œuvre. Les retours d'expériences de l'artisan participant au projet suggèrent que les mélanges chaux:végétaux parviennent plus rapidement à évacuer leur humidité que les mélanges terre:végétaux dans des conditions de mise en œuvre similaires.

4.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de corroborer les excellentes propriétés de régulation hydrique des composites terre:végétaux en régime dynamique, la synergie entre la terre-crue et les granulats végétaux (B. Mazhoud et al. 2017) permettant d'obtenir des valeurs de capacité de tampon hydrique plus élevées pour nos biocomposites (lorsqu'ils ne sont pas recouverts d'un enduit de finition) que nombre de bétons végétaux connues pour être d'excellent régulateurs. La pertinence de l'utilisation de matériaux biosourcés non recouvert de parements qui

annihileraient fortement leurs performances de régulation hydriques a déjà été soulevée par Palumbo et al. (Palumbo, Lacasta, et al. 2016). De même, les performances acoustiques en absorption permettent à ces matériaux non enduits de participer grandement à la sensation de confort intérieur, des différences de propriétés acoustique apparaissent selon les biocomposites, elles sont liées à la masse volumique et au ratio volumique liant:granulats des matériaux. Toutefois, la présence d'un élément de plus forte masse volumique au sein d'une paroi va augmenter l'affaiblissement des sons extérieurs. Afin d'optimiser les performances du mur, la mise en place d'une couche de biocomposites offrant un état de surface rugueux sur un mur extérieur de forte densité semble un excellent compromis. Il convient de considérer toutefois que la présence d'aspérités va favoriser la présence de poussière qui est un des facteurs de dégradation de la qualité de l'air intérieur (Verdier et al. 2014).

Le logiciel de simulation hygrothermique des parois WUFI basé sur le modèle développé par Künzel représente une prédiction satisfaisante du comportement de parois soumises à des variations climatiques. Cependant la complexité des phénomènes des transferts d'énergie et de masses d'eau ayant lieu dans les matériaux en terre crue notamment est insuffisamment prise en compte dans le modèle de Künzel selon certains auteurs comme Soudani et al. (Soudani et al. 2016) qui propose une évolution du modèle pour décrire les phénomènes hygrothermique dans les murs en pisé par exemple.

Conclusion Générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet région Centre-Val de Loire BIOCOMP dont l'objectif est de proposer des matériaux destinés particulièrement à l'isolation thermique adaptés au patrimoine en pierre calcaire du territoire du Sud Touraine ou, de manière plus générale, à la rénovation thermique des bâtiments et ce, en alliant une démarche scientifique d'optimisation à une démarche d'application artisanale afin de répondre à des besoins de diminution de consommations d'énergie et d'impact environnemental.

Les travaux menés dans ce cadre s'inscrivent comme une déclinaison locale des initiatives décrites au niveau de l'état français dans la loi de transition énergétique pour une croissance verte vers un modèle de société plus sobre à l'horizon 2020. La déclinaison de cette loi pour la période 2015-2020 est détaillée dans la stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable (MEDDE 2014) selon plusieurs axes de travail. Le projet BIOCOMP prétend apporter des réponses plus particulièrement aux axes 1,2 5 et 6 :

- Axe 1 - Développer des territoires durables et résilients
- Axe 2 - S'engager dans l'économie circulaire et sobre en carbone
- Axe 5 - Accompagner la mutation écologique des activités économiques
- Axe 6 - Orienter la production de connaissances, la recherche et l'innovation vers la transition écologique

Le travail de thèse représente l'élément essentiel pour assurer ce lien entre une démarche scientifique, d'augmentation de connaissances et une finalité d'application bien fondée.

Dans le premier chapitre, il nous est apparu pertinent de situer les éléments de contexte permettant d'appréhender les notions mentionnées dans les axes 1, 2, 5 plus particulièrement dans le cas de territoires résilients et d'économie circulaire en les reliant avec la mise en place d'une filière locale de production d'agromatériaux pour l'isolation des habitations. Ce fut également l'occasion de préciser la pertinence environnementale de l'utilisation de matériaux locaux adaptés à l'habitat vernaculaire. Enfin, nous avons relié les paramètres de microstructure et de porosité des matériaux à leurs performances hygrothermiques et acoustiques tout en permettant d'apporter des réponses d'un point de vue sanitaire à la qualité de l'air à l'intérieur des lieux de vie.

L'objectif du deuxième chapitre était dans un premier temps d'analyser les matières premières à disposition sur le territoire du Sud Touraine depuis leur production jusqu'à leurs propriétés intrinsèques. Les matériaux de base ainsi retenus étant les tiges de colza et de tournesol broyées servant de granulats végétaux et une terre-crue à forte proportion d'argile kaolinitique qui servira de liant pour agglomérer les granulats entre eux. Nous avons pu alors constater une forte

diversité de masse volumique selon les granulats incitant à séparer la partie interne de la tige de tournesol, la moelle de sa partie externe l'écorce. Il s'agissait également de partir du savoir-faire artisanal présent sur ce territoire pour aboutir à la formulation et à la description d'un protocole de mise en œuvre de différents biocomposites tels qu'ils pourraient être appliqués sur un chantier avec la technique du banchage.

Les biocomposites réalisés ayant pour vocation d'améliorer l'isolation des bâtiments, les caractéristiques thermiques et mécaniques de ceux-ci ont tout d'abord été déterminées. Ce fut l'occasion de confirmer que la masse volumique des mélanges terre-végétaux est le critère qui aura la plus forte influence sur les performances. Celles-ci se situant dans une gamme de tenue mécanique permettant leur utilisation non structurelle en tant qu'isolant. Concernant les performances thermiques quoique supérieures aux prérequis permettant de qualifier ces matériaux comme isolants thermiques − à l'exception notable d'un mélange terre-crue:moelle de tournesol (SPD2) − sont comparables à celles d'autres bétons végétaux et permettent d'envisager une prescription similaire.

Les bétons végétaux sont souvent prescrits pour leurs qualités de régulation hydrique, les isothermes de sorption-désorption permettent de caractériser les capacités de stockage de l'humidité dans les matériaux selon les humidités relatives ambiantes. La connaissance de cette isotherme est également utile dans l'optique de simulations numériques des propriétés hygrothermiques des matériaux. Nous avons pu constater des profils et des capacités similaires selon les différents biocomposites.

L'un des principaux inconvénients freinant l'utilisation de la terre-crue tient à sa fragilité face au contact avec l'eau sous forme liquide. Des essais de capillarité ont mis en exergue cette fragilité accentuée par les phénomènes de gonflement des granulats végétaux imbibés.

Un deuxième frein à l'utilisation massive de la terre-crue tient à sa faible résistance mécanique vis-à-vis d'autres liant minéraux, cette faiblesse étant également fortement exacerbée par l'ajout de granulats végétaux. Comme propositions d'amélioration de ces deux faiblesses nous avons proposé une adjuvantation de la terre-crue par un faible pourcentage de chaux aérienne dont l'effet tant d'un point de vue mécanique que de la capillarité fut contre-productif engendrant une détérioration des performances. La raison principale invoquée étant l'inhibition de l'hydratation de la chaux engendrée par les lixiviats des granulats végétaux composés de polysaccharides. Une autre approche, basée sur les travaux d'Ann Bourgès concernant l'application de silicate d'éthyle comme protection d'enduits en terre crue pour la préservation

du patrimoine a été étudiée. Le gel de silice engendré apporte cette fois-ci un gain substantiel en termes de résistance à la compression et de diminution des remontées capillaires. La fin du 3ème chapitre nous a donné l'occasion de nous questionner quant à la pertinence de la stabilisation des ouvrages en terre-crue par des liants minéraux tels que la chaux et le ciment. L'étude menée par Van Damme et Houben pointe en effet une forte dégradation du bilan environnemental de la terre-crue pour un gain de résistance mécanique modéré rejoignant de ce point de vue nos résultats rencontrés avec l'ajout de la chaux.

Afin de ne pas s'éloigner des pratiques professionnelles observées pour la rénovation des habitations vernaculaires sur le territoire du Sud Touraine, une paroi en pierre de tuffeau locale de 120x120cm isolée avec un biocomposite a été placée à l'intérieur d'une chambre climatique afin d'évaluer le comportement du flux de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un mur ainsi isolé. Nous avons voulu également dans le but de se confronter aux performances des matériaux tels qu'ils sont mis en œuvre, par la mise en place des essais pour déterminer l'influence de l'enduit de finition sur les propriétés acoustiques des biocomposites ainsi que sur la régulation dynamique de l'humidité et une simulation numérique via le logiciel WUFI pour évaluer l'influence de cet enduit de finition terre-sable sur la période de séchage du biocomposite à l'état frais.

L'enduit de finition permet l'absorption et la restitution d'une quantité moindre de l'humidité contenue dans une pièce soumise à une variation dynamique de 8h à 75%HR et 16h à 33%HR, de même, la pose d'une couche d'enduit de finition sur les biocomposites engendre une augmentation de la réverbération acoustique des parois au détriment de l'absorption diminuant ainsi le confort acoustique. En revanche l'ajout supplémentaire d'un matériau de forte masse volumique tel qu'un enduit terre-sable va permettre d'augmenter l'affaiblissement acoustique améliorant l'isolation contre les bruits extérieurs.

A la vue de ces résultats, il serait tentant d'inciter à l'absence de prescription de parement de finition sur les bétons végétaux toutefois, les considérations d'ordre esthétique, de protection de l'isolant ainsi que la prévention des poussières prennent le pas à l'heure actuelle et rares sont les maitres d'ouvrages souhaitant conserver une couche d'isolant à base de composites biosourcés sans parement intérieur.

Le logiciel de simulation de transferts hygrothermiques dans les parois WUFI 2D, une fois les paramètres des différents matériaux entrés, a permis d'obtenir une bonne corrélation des résultats avec ceux obtenus expérimentalement via la chambre climatique thermo3. Les

simulations ont permis de répondre à la problématique du séchage en impliquant une mise en place d'un enduit de finition juste après la mise en œuvre des isolants pour apporter une réponse aux difficultés rencontrées sur les chantiers de rénovation dues aux temps très long induits par les temps de séchage d'isolant. Cependant les différents mécanismes d'échanges en lien avec les transferts thermo-hydriques dans les parois étant complexes lorsque des matériaux tels que la terre-crue sont impliqués, des équipes de recherche telle que celle Soudani à l'ENTPE de Lyon développent de nouveaux modèles plus adaptés à ce type de matériau.

Perspectives

La principale réticence des artisans qui emploient les matériaux terre-crue:granulats végétaux tient à leur durée de séchage et à ses conséquence : délai de chantier et développement de moisissures. La réduction de la durée de séchage est donc perçue comme prioritaire, celle-ci nécessite une réduction de la quantité d'eau pouvant être obtenue de façons diverses :

- Utilisation d'agents dispersants
- Utilisation de projeteuse/cardeuse avec enrobage des granulats en sortie de buse
- Utilisation de produits fongicide pour prévenir l'apparition de moisissures

Compléter la caractérisation de ces mélanges terre-crue:végétaux, pourra permettre de les comparer de manière plus précise avec d'autres bétons végétaux, de même certains paramètres tels que la chaleur spécifique et la perméabilité à la vapeur d'eau seront nécessaire pour pouvoir tester des modèles de simulations thermiques ou hygrothermiques. D'autres paramètres tels que la résistance à l'arrachement de l'enduit de finition par rapport au biocomposite et du biocomposite par rapport à la paroi auront une utilité concrète et font partie des prérequis des règles professionnelles des enduits sur supports composés de terre-crue. Le succès de la stabilisation de la terre-crue avec du silicate d'éthyle incite à investiguer davantage son impact vis-à-vis des caractéristiques hydriques des biocomposites (sorption/désorption, perméabilité, capacité de tampon hydrique). L'influence de l'utilisation de terres-crues disposants de caractéristiques minéralogiques différentes de celles de La Rouchouze sur les propriétés mécaniques et hydriques sera également intéressante à connaitre dans le but de diversifier les sources d'approvisionnement. La diversification des sources d'approvisionnement peut s'appliquer également aux ressources en granulats disponibles sur le territoire de la région Centre-Val de Loire :

- Roseau, miscanthus
- Mycélium (ecovative design)

- Balle d'épeautre
- Pulpe de betterave déshydratée
- Moelle de maïs (épi/tige)

Dans le cadre de l'optimisation du bilan déjà très positif de l'analyse environnementale des mélanges terre-végétaux, les aspects de recyclabilité et de réemplois de ces matériaux restent à investiguer. En effet, si une fin de vie de ces matériaux en tant qu'amendement pour les sols cultivés peut être aisément envisagée selon les adjuvants incorporés aux biocomposites, un réemploi après réhydratation des mélanges terre-végétaux est également envisageable et même souhaitable pour en optimiser le cycle de vie et intégrer la déconstruction dans des dynamiques d'économie circulaire. Cette pratique est déjà utilisée par l'artisan partenaire du projet Éric Julien concernant le réemploi de torchis ancien pour réparation. Toutefois, la moelle de tournesol va subir une dégradation de sa structure poreuse après avoir subi un cycle d'hydratation-séchage. Une fois le retrait dû au séchage de la moelle ayant eu lieu, le gonflement après réhydratation sera moindre engendrant une plus forte masse volumique. De plus, la perte d'une partie des polysaccharides lors de la première lixiviation engendre la diminution du pouvoir cohésif des biocomposites à base de moelle. Ces possibilités de réemploi des matériaux qui sont de plus en plus étudiées seront certainement différentes selon les granulats utilisés et les résultats attendus.

Outre les aspects liés aux caractéristiques des bétons végétaux, le frein qui empêche le développement de l'utilisation de ces matériaux tient à leur absence de certification, empêchant les entreprises du bâtiment de bénéficier de leur garantie décennale entrainant également l'absence d'accès aux aides de l'état pour les travaux de rénovation énergétiques. Les matériaux biosourcés et géosourcés issus de filières locales auront en effet difficilement pour vocation à entrer dans un processus de normalisation ou de certification type ACERMI pour diverses raisons :

La variabilité des granulats végétaux dues à :

- L'espèce végétale et la variété
- Le terroir
- Les conditions climatiques
- Les conditions de récolte
- Les conditions de stockage

La forte variabilité des terres crues :

- Minéralogique
- Granulométrique
- La variabilité de la mise en œuvre selon l'artisan, le type de support, les conditions climatiques,…
- Le coût d'un processus de certification

Cette absence de normalisation entraine la réticence des acteurs de la construction à prescrire ou utiliser ces matériaux rarement assurables. Une utilisation massive de ces matériaux est dans le cadre réglementaire actuel par conséquent difficilement envisageable. Afin de proposer un cadre permettant l'emploi de matériaux et de techniques non industriels tels que ceux présentés ici, une proposition, le projet ASCNI Analyse des caractéristiques des Systèmes Constructifs Non Industrialisés (CAPEB et al. 2011), est à l'étude. L'objectif étant de garantir que l'artisan qui mettra en œuvre un matériau non industrialisé possède le savoir-faire nécessaire reconnu par son assurance pour s'adapter au matériau local. Ce principe permettrait de passer l'écueil de l'assurabilité et de diffuser plus largement l'emploi de matériaux locaux ne disposant pas de certification. La connaissance des caractéristiques des matériaux reste bien entendu nécessaire afin de garantir l'adéquation des performances avec le cadre réglementaire selon les conditions d'utilisation. Etant même complémentaire d'une telle démarche.

Cette étude permet, pour une gamme de granulats végétaux aux caractéristiques différentes de présenter une fourchette de performances dans laquelle nombre de biocomposites terre:végétaux pourront prétendre pour une même proportion de liant en terre-crue. En multipliant ces programmes de recherche telles que ceux réalisées avec les mélanges terre-chanvre − projet éco-terra − ou avec les fines de lavage des carrières du Boulonnais, une base de donnée bornant les performances des mélanges terre:végétaux en fonction de leur masse volumique permettra d'apporter des éléments nécessaires à la généralisation de la mise en place de filières locales de matériaux biosourcés au niveau national et international.

Bibliographie

Adamczyk, J. & Dylewski, R., 2017. The impact of thermal insulation investments on sustainability in the construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), pp.421–429. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.173.

Airaksinen, S., 2005. Role of Excipients in Moisture Sorption and Physical Stability of Solid Pharmaceutical Formulations. *Academic dissertation, Helsinki*, (September).

Arnaud, L. & Gourlay, E., 2012. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp.50–56. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.

Association Construire en Chanvre, 2012. *Label Granulat Chanvre Bâtiment*,

Association MEDISTONE, 2010. Guide « Techniques de conservation de la pierre ». *http:asso-medistone.org*.

Barnes, G.E., 2018. Workability of clay mixtures. *Applied Clay Science*, 153(September 2017), pp.107–112. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.006.

Belayachi, N. et al., 2015. Etude comparative du comportement hygrothermique des matériaux à base de fibres végétales. In *33ème rencontres de l'AUGC*.

Belayachi, N. et al., 2013. Thermo-Mechanical Behaviour of an Innovant Straw Lime Composite for Thermal Insulation Applications. *Applied Mechanics and Materials*, 390, pp.542–546. Available at: http://www.scientific.net/AMM.390.542.

Belayachi, N., Hoxha, D. & Slaimia, M., 2016. Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 125, pp.912–918. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.120.

Bouguerra, A. et al., 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(8), pp.1179–1190.

Bromblet, P. et al., 2002. Consolidation et hydrofugation de la pierre. *Revue scientifique et technique des monuments historiques*, pp.201–243.

CAPEB et al., 2011. *Analyse des caractéristiques des systèmes constructifs non industrialisés*,

Cerezo, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. *Thèse doctorale, ENTPE Lyon*, p.248.

Chabannes, M. et al., 2015. Studying the hardening and mechanical performances of rice husk and hemp-based building materials cured under natural and accelerated carbonation. *Construction and Building Materials*, 94(October 2017), pp.105–115. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.032.

Chabannes, M., 2012. Valorisation de granulats de tournesol pour la formulation de matériaux de construction. *Mémoire Master 2 recherche, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand*, (0), p.112.

Chabannes, M., Nozahic, V. & Amziane, S., 2014. Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders. *Materials and Structures*, 48(6), pp.1815–1829. Available at: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84929061642&partnerID=tZOtx3y1.

Chabriac, P.. et al., 2015. Agricultural by-products for building insulation: acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112, pp.158–167. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162.

Chabriac, P.A. et al., 2016. Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials*, 112, pp.158–167. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816302215.

Clarke, D.R., 2003. Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, pp.67–74.

Claude, S. et al., 2017. The Living Lab methodology for complex environments: Insights from the thermal refurbishment of a historical district in the city of Cahors, France. *Chemical Physics Letters*, pp.1–10. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2017.01.018.

Colinart, T., Lelievre, D. & Glouannec, P., 2016. Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall. *Energy & Buildings*, 112, pp.1–11. Available at: http://ac.els-cdn.com/S0378778815303960/1-s2.0-S0378778815303960-main.pdf?_tid=d5a9aaa4-b878-11e5-8f1f-00000aacb35e&acdnat=1452526662_e29d052b78e1fd8cdc8da6f3a90f1b00.

Collet, F., 2004. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faible impacts environnmentaux. *Thèse doctorale, INSA Rennes*, p.179.

Collet, F., 2015. Comparing hemp composites made with mineral or organic binder on thermal , hygric and mechanical point of view. In *ICBBM, Clermont-Ferrand 2015*. pp. 227–234.

Collet, F. et al., 2016. Hemp-straw composites: thermal and hygric performances. In *International conference on materials and energy, La Rochelle 2016*. pp. 663–668.

Collet, F. & Pretot, S., 2014. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 65, pp.612–619.

Collet, F., Pretot, S. & Lanos, C., 2013. Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques. In *31ème Rencontres AUGC ENS Cachan 2013*. pp. 1–10.

Corrado, C., Serra, V. & Dutto, M., 2016. An integrated design approach to development of a vegetal based thermal plaster for buildings energy retrofit. *Energy & Buildings*, 124, pp.46–59. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.063.

Daian, J., 1986. Processus de condensation et de transfert d 'eau dans un matériau méso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment. *Thèse doctorale, Université de Grenoble*, p.335.

Degrave-lemeurs, M. et al., 2018. Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation : Application to clay and lime binders. *Construction and Building Materials*, 160, pp.462–474. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064.

Delannoy, G., 2017. Propriétés fonctionnelles et microscopiques des bétons de chanvre. In *AUGC 2017, Nantes*.

Dinh The, M., 2014. Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant. *Thèse doctorale, Université Paula Sabatier Toulouse*, p.210.

EUROPEAN COMMISSION, 2015. Communication from the commission to the european parliament, the council,the european economic and social committee and the committee of the regions. Closing the loop—An EU action plan for the Circular Economy. *Brussel COM(2015) 624 Final*.

El Fgaier, F. et al., 2016. Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 6, pp.86–92. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710216300201.

Flament, C., 2012. Valorisation des fines de lavage de granulats: application a la construction

en terre-crue. *Thèse doctorale, Université d'Artois*, p.238.

Florbela, C. & Silva, F.P., 2016. Influence of eco-materials on indoor air quality. *Green Materials*, 4(GMAT2), pp.72–80.

Garzón, E. et al., 2016. Effect of lime on stabilization of phyllite clays. *Applied Clay Science*, 123, pp.329–334. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.042.

Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy : the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp.11–32. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007.

Giesekam, J. et al., 2016. Construction sector views on low carbon building materials Construction sector views on low carbon building materials. *Building Research & Information*, 44(September 2017), pp.423–444.

Glé, P., 2014. Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation. *Thèse doctorale, ENTPE Lyon*, p.234.

Glé, P., Gourdon, E. & Arnaud, L., 2011. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. *Applied Acoustics*, 72(5), pp.249–259.

Glé, P., Gourdon, E. & Arnaud, L., 2012. Modelling of the acoustical properties of hemp particles. *Construction and Building Materials*, 37, pp.801–811.

Gourlay, E., 2013. *Propriétés hygroscopiques et comportement hygrothermique du béton de chanvre Rapport bibliographique*,

Guettala, A. et al., 2002. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, 2, pp.61–66.

Heathcote, K.A., 1995. Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), pp.185–189.

Idalia Gomes, M., Diaz Gonçalves, T. & Faria, P., 2016. Hydric behavior of earth materials and the effects of their stabilization with cement or lime: study on repair mortars for historical rammed earth structures. *Journal of Materials in Civil Engineering, volume 28 issue 7*.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013. *Transition to Sustainable Buildings*,

Jay, A., Laetitia, B. & Wurtz, E., 2017. Study of a hempcrete wall exposed to outdoor climate : Effects of the coating. *Construction and Building Materials*, (January), pp.0–11. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.143.

Kashtanjeva, A., Sonebi, M. & Amziane, S., 2015. Investigation of the mechanical performance and drying shrinkage of hemp concrete. In *ICBBM 2015, Clermont-Ferrand*. pp. 309–315.

Khay, I., 2012. Etude physico-chimique des interfaces chaux/chanvre/argile : Impact sur la rhéologie des mortiers et sur les propriétés mécaniques, thermiques et hydriques du matériau composite. *Thèse doctorale, Université de Limoge*, p.144.

Klinge, A., Roswag-Klinge, E., et al., 2016. Hygroscopic Materials versus Mechanical Ventilation. In *Terra Lyon 2016*.

Klinge, A., Architekten, R., et al., 2016. Naturally ventilated earth timber constructions. In *SBE Regional Conference Zurich*.

Klinge, A., Fontana, P., et al., 2016. Reducing the need for mechanical ventilation through the use of climate-responsive natural building materials. In *LEHM 2016*.

Künzel, H., 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One - and two-dimensional calculation using simple parameters* .,

Labat, M. et al., 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, pp.69–81. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004.

Laborel-Préneron, A. et al., 2016. Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, pp.719–734. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816301805.

Landrou, G. et al., 2016. Lime as an anti-plasticizer for self-compacting clay concrete. *Materials, doi:10.3390/ma9050330*, 9(5), p.16.

Lawrence, M., 2015. Reducing the Environmental Impact of Construction by Using Renewable Materials. *Journal of renewable materials*, 2005(4), pp.1–2.

Lelièvre, D., Colinart, T. & Glouannec, P., 2015. Modeling the Moisture Buffering Behavior of a Coated Biobased Building Material by Including Hysteresis. *Energy Procedia*, 78, pp.255–260. Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215023632.

Lenormand, H. et al., 2014. Nouvelles agroressources pour panneaux de particules 100 % biosourcés. In *Matériaux colloque 01 écomatériaux*. pp. 24–28.

Lenormand, H., Glé, P. & Leblanc, N., 2017. Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(1),

pp.149–157.

Leylavergne, E., 2010. La filière terre crue en France : Enjeux, freins et perspectives. , p.154. Available at: http://www.asterre.org/component/attachments/download/98.

Liu, L. et al., 2017. The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(October 2016), pp.912–932. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.140.

Madrid, M. et al., 2018. Thermal performance of sawdust and lime-mud concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, 169, pp.113–123. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.193.

Magniont, C., 2010. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. *Thèse doctorale, Université Paul Sabatier Toulouse*, p.327.

Magniont, C. et al., 2012. Use of plant aggregates in building ecomaterials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(sup1), pp.s17–s33. Available at: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2012.682452\nhttp://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19648189.2012.682452#.UdcpTTs7mFo\nhttp://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19648189.2012.682452.

Maquet, V. et al., 2003. Preparation of macroporous biodegradable poly (L -lactide- co - ⅆ - caprolactone) foams and characterization by mercury intrusion porosimetry , image analysis , and impedance. *Wiley periodical*, pp.199–213.

Marechal, V. & Rigal, L., 1999. Characterization of by-products of sunflower culture - Commercial applications for stalks and heads. *Industrial Crops and Products*, 10(3), pp.185–200.

Mazhoud, B. et al., 2016. Characterization and Comparison of Thermal and Hygric Properties of Hemp-Clay Composite and Hemp-Lime Concrete. In *AUGC La Rochelle*. pp. 693–698.

Mazhoud, B. et al., 2017. Development and hygric and thermal characterization of hemp-clay composite. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (May), pp.1–11.

Mazhoud, B. et al., 2017. Mechanical properties of hemp-clay and hemp stabilized clay composites. *Construction and Building Materials*, 155, pp.1126–1137. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.121.

McGregor, F. et al., 2014. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82(Sept 2016), pp.599–607. Available at:

http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027.

Meadows, D.H.M., 1972. The Limits to Growth. *The Club of Rome*, p.211. Available at: http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.1972.tb05230.x.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2014. La transition écologique vers un développement durable 2015-2020. , p.135. Available at: http://www.ccsenet.org/journal/index.php/ijbm/article/view/20058.

Melià, P. et al., 2014. Environmental impacts of natural and conventional building materials: A case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, pp.179–186.

Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer, Ministère du logement et de l'habitat durable,, 2016. *Construire ensemble la réglementation énergétique et environnementale du bâtiment Dossier de presse*,

Morel, J.C. et al., 2001. Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment*, 36(10), pp.1119–1126.

Nguyen, T.T., 2010. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d éléments de construction en béton de chanvre. *Thèse doctorale, Université Bretagne Sud Lorient*, p.147.

Niyigena, C., 2016. Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne. *Thèse doctorale, Université Blaise Pascal Clermont Ferrand*, p.226.

Niyigena, C. et al., 2016. Variability of the mechanical properties of hemp concrete. *Materials Today Communications*, 7, pp.122–133. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.03.003.

Nozahic, V. et al., 2012. Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), pp.231–241. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.002.

Nozahic, V., 2012. Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal. *Thèse doctorale, Université Blaise Pascal Clermont Ferrand*, p.296.

Nozahic, V. & Amziane, S., 2012. Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), pp.1837–1849. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.011.

Nykjær, K. et al., 2017. The absolute environmental performance of buildings. *Building and Environment*, 119, pp.87–98. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003.

Ollivro, J., 2012. *La nouvelle économie des territoires*, Edition apogée, 190p

Oumeziane, Y.A., 2014. Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre. *Thèse doctorale, INSA Rennes*, p.353.

Palumbo Fernández, M., 2016. Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders : hygrothermal performance, fire reaction and mould growth resistance. *Thèse doctorale, Universitat Politècnica de Catalunya*, (July), p.187 pages.

Palumbo, M., Lacasta, A.M., et al., 2016. Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials. *Construction and Building Materials*, 124, pp.269–275. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106.

Palumbo, M., McGregor, F., et al., 2016. The influence of two crop by-products on the hygrothermal properties of earth plasters. *Building and Environment*, 105, pp.245–252. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316302104.

Peñaloza, D., Erlandsson, M. & Falk, A., 2016. Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings. *Construction and Building Materials*, 125, pp.219–226.

Pennec, F. et al., 2013. A combined finite-discrete element method for calculating the effective thermal conductivity of bio-aggregates based materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60(1), pp.274–283. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.002.

Plan Bâtiment Durable, 2015. Note thématique \# 1 du groupe RBR : « Vers des Bâtiments bas carbone ». , 2050, pp.1–10. Available at: http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/RBR2020_vers_des_batiments_bas_carbone_version_finale-3.pdf.

Pretot, S., Collet, F. & Garnier, C., 2014. Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment*, 72, pp.223–231. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.010.

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A.D., et al., 2016. Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 102, pp.679–687. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021.

Rahim, M. et al., 2015. Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, 88, pp.91–99. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.043.

Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A.D., et al., 2016. Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials. *Construction and Building Materials*, 111, pp.119–127.

Ratiarisoa, R.V. et al., 2016. Assessment of distilled lavender stalks as bioaggregate for building materials: Hygrothermal properties, mechanical performance and chemical interactions with mineral pozzolanic binder. *Construction and Building Materials*, 124, pp.801–815.

Rezaei, N. & Chatzis, I., 2011. Characterization of heterogeneities in porous media using constant rate air injection porosimetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 79(3-4), pp.113–124. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.08.019.

Al Rim, K. et al., 1999. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement and Concrete Composites*, 21(4), pp.269–276.

Rode, C. et al., 2007. Moisture Buffer Value of Materials in Building. *Journal of ASTM International*, 4(5), p.100369.

Sagbansua, L. & Balo, F., 2017. Ecological impact & financial feasibility of Energy Recovery (EIFFER) Model for natural insulation material optimization. *Energy and Buildings*, 148, pp.1–14. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816319636.

Samin, E., 2017. *Résultats des activités portant sur les volets: "Matières et matériaux" Typha et Terre-Typha "Eléments et systèmes constructifs" associés*, CRATERRE 369p

Schiavoni, S. et al., 2016. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, pp.988–1011. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116301551.

Sedan, D., 2007. Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. *Thèse doctorale, Université de Limoge*, p.129.

Sierra-Pérez, J. et al., 2015. Environmental implications of cork as thermal insulation in façade retrofits. *10th Conference on Advanced Building Skins*, 126.

Silva, C.F. et al., 2017. Improvement of indoor air quality by MDF panels containing walnut shells. *Building and Environment*. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.015.

Sing, K.S.W., 2004. Characterization of porous materials: Past, present and future. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241(1-3), pp.3–7.

Sing, K.S.W., 1982. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure & Appl. Chem.*, 54(11), pp.2201–2218.

Soudani, L. et al., 2016. Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modelling of earth based materials. *Energy and Buildings, accepted*, 116, pp.498–511. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025.

Stephan, E., 2014. Méthode d'aide à la décision multicritère des stratégies de réhabilitation des bâtiments anciens en pierre calcaire. *Thèse doctorale, Université de Lyon ENTPE*, p.200.

Théophile, S. & Sacher, J., 2017. *Le colza dans la construction*, CODEM, CD2E

Tiennot, M. et al., 2014. Clays, unbaked earth tablets, and ethyl silicate: towards an understanding of the consolidation mechanisms. *ICOM-CC 17th triennial conference Melbourne 15-19 September 2014*.

Ministère de la transition écologique et solidaire., 2017. 500 maisons rénovées basse consommation - Enseignements opérationnels des programe " Je rénove BBC " en Alsace, CEREMA EDF.

Umurigirwa, B.S. et al., 2014. Etude numérique et expérimentale du comportement hygrothermique d ' un agro-composite à base de fibres de chanvre et d ' amidon de blé . , Conférence IBPSA France-Arras-2014, pp.1–10.

United Nations Environment Programme, 2009. *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*, Available at: http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf. [21 May 2015].

Van Damme, H. & Houben, H., 2017. Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035.

Vandenbossche, V. et al., 2012. New agro-materials with thermal insulation properties. In *18th conference on sunflower, Mar del Plata Argentina*. pp. 949–954.

Verdier, T. et al., 2014. A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods. *Building and Environment*, 80, pp.136–149. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.030.

Vinceslas, T. et al., 2017. Light earth performances for thermal insulation: application to Earth-Hemp. *2nd International Conference on Bio-based Building Materials and 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRAnular and FIbrous materials*, (August), pp.1–7.

Volhard, F., 2016. *Construire en terre allégée* Coédition ., Actes Sud Beaux Arts.

Walker, B. et al., 2006. A Handful of Heuristics and Some Propositions for Understanding Resilience in Social-Ecological Systems. *Ecology and society*, 11(1).

Walker, R. & Pavía, S., 2014. Moisture transfer and thermal properties of hemp – lime concretes. *Construction and Building Materials*, 64, pp.270–276. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081.

Wang, M. et al., 2012. Dynamic characteristics of lime-treated expansive soil under cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(4), pp.352–359. Available at: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S167477551530202X.

Wheeler, G., 2005. Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone. *Journal of the American Institute for Conservation*, 46(2), pp.189–191. Available at: http://www.jstor.org/stable/40025051.

Yan, L., Kasal, B. & Huang, L., 2016. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B*, 92, pp.94–132. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

Yoann BROUARD

CARACTERISATION ET OPTIMISATION D'UN COMPOSITE BIOSOURCE POUR L'HABITAT

Résumé

Le secteur du bâtiment est une source majeure d'émissions de CO_2 dans le monde (à la fois pour la construction et l'exploitation des bâtiments), en raison notamment de la consommation d'énergie (chaleur, ventilation et refroidissement) et de la production de matériaux. Parallèlement à cela, l'épuisement des ressources naturelles tend à devenir un problème critique. Parmi les réponses pouvant être apportées pour faire face à ces défis, l'utilisation de ressources renouvelables et recyclables, à faible énergie grise apparait pertinente. À cet égard, l'utilisation de co-produits agricoles en tant que granulats légers à des fins d'isolation thermique est une solution méritant d'être étudiée. Ces matières premières génèrent une faible énergie grise et peuvent être considérés comme des déchets avec un bilan carbone positif car ils stockent du CO_2. La substitution de la chaux ou du ciment par de la terre crue locale améliore également sensiblement l'empreinte carbone d'un matériau de construction. Le travail présenté ici qui a pour objet de mesurer les performances de ces matériaux respectueux de l'environnement a été réalisé dans le cadre du projet BIOCOMP ayant pour but de développer des biocomposites produits localement ayant pour vocation d'être utilisés en tant que matériaux isolants intérieurs. L'intérêt pour les partenaires du projet est d'offrir des solutions de rénovation pour les bâtiments vernaculaires de Touraine. Dans cette étude, des échantillons ont été préparés en utilisant 4 granulats végétaux différents (paille de colza, écorce de tournesol, moelle de tournesol et mélange de moelle et d'écorce de tournesol) avec une terre crue servant de liant pour un même rapport liant / granulats.

Cette étude a pour objet de comparer les propriétés acoustiques, mécaniques et hygrothermiques de différents biocomposites à base de granulats issus de co-produits végétaux et d'argile. Nous avons d'abord analysé les matières premières afin d'obtenir d'une part la masse volumique et les propriétés thermiques et hydriques des granulats végétaux et les caractéristiques minéralogiques et gravimétriques de la terre crue sélectionnée d'autre part. L'évolution de la conductivité thermique des mélanges terre:granulats végétaux a été étudiée à différents taux d'humidité et différentes masses volumiques. D'un point de vue hydrique, les capacités de sorption/désorption de ces matériaux ont été mesurées en régime statique de même que la capacité de tampon hydrique simulant un régime dynamique. La capillarité des granulats et des biocomposites a également été étudiée. L'étude de ces propriétés hydriques permet d'estimer

l’adéquation de solutions de rénovation basées sur ces matériaux avec le bâti local constitué de pierres calcaires très poreuses possédant une forte capacité de réguler l’humidité. Les conductivités thermiques de mélanges de terre-crue: colza et terre-crue:tournesol (écorce et moelle) doivent être inférieure à 0,065W.m-1.K-1 pour que ces matériaux soient considérés comme isolant thermique de bâtiment selon la norme NF P 75-101. Les enduits chaux:végétaux ou terre-crue-végétaux peuvent difficilement atteindre ces performances, mais l'un de leurs principaux avantages tient à leur capacité de régulation du climat intérieur ainsi que leur compatibilité avec les caractéristiques des bâtiments vernaculaires. Le point faible de ces matériaux réside dans leurs faibles performances mécaniques empêchant toute utilisation structurelle ainsi que leur sensibilité à l'eau liquide. Afin d'améliorer ces deux aspects, l’ajout de silicate d'éthyle semble offrir des garanties intéressantes nécessitant la mise en place d’essais complémentaires. Au contraire, l'ajout d'une faible quantité (5%) de chaux est contre-productif, diminuant à la fois la résistance mécanique et la résistance à la capillarité. Lors de la mise en œuvre de ce type de matériaux isolants, les maçons ajoutent généralement un enduit de finition, il nous est par conséquent apparu pertinent de mesurer l'impact de ce revêtement sur les capacités de tampon hydrique et les performances acoustiques (absorption et affaiblissement) des biocomposites. Cette couche de finition diminue la régulation dynamique hydrique et l'absorption acoustique, mais augmente la perte de transmission. Pour finir, nous avons étudié le comportement du flux thermique à travers une paroi en pierre de tuffeau locale recouverte d'une couche isolante d’argile: colza placée à l’intérieur d’une chambre climatique. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus via une simulation via le logiciel WUFI 2D. Ce logiciel nous a également permis de simuler l’effet de différentes compositions d’enduits de finition sur les capacités de séchage du biocomposite à l’état frais ainsi que les changements dans la cinétique de séchage d'un composite induisant des augmentations de la durée de séchage différentes selon le type d’enduit.

L'un des principaux intérêts de cette étude est de confirmer qu'une large gamme de co-produits végétaux produits à l’échelle locale pourrait être utilisée en tant que granulats pour l’élaboration de bétons végétaux. Malgré ses performances mécaniques plus faibles et sa vulnérabilité à l'eau liquide par rapport aux liants à la chaux ou à la pouzzolane, l'utilisation de la terre-crue comme liant pour les bétons végétaux mérite d’être étudiée plus avant aux vues de sa forte disponibilité, de son bilan environnemental positif et de ses propriétés hygrothermiques. Des filières locales de matériaux biosourcés pourraient donc être mise en place sur de nombreux territoires en

fonction des ressources disponibles localement permettant le développement d'une économie circulaire vertueuse pour l'environnement.

Mots-clés: Co-produits agricoles, terre-crue, matériaux biosourcés, moelle, tournesol, colza, conductivité thermique, capacité de tampon hydrique, sorption/désorption, capillarité, absorption acoustique, affaiblissement acoustique, chambre climatique, WUFI 2D, enduits de finition

Abstract

The building sector (both for the construction and operation) is a major source of CO_2 emissions worldwide, due to the energy consumption (heat, air ventilation and cooling) and materials production involved. Furthermore, the depletion of natural resources is becoming a critical issue; the use of renewable and recyclable resources, with low embodied energy is therefore relevant. In that respect, the use of agricultural by-products as lightweight aggregates for thermal insulation purposes is particularly judicious. They have low embodied energy and can be considered as waste with a positive carbon balance as they store CO_2. Replacing Portland cement by local crude earth improves the material's carbon footprint. The work presented here that claims the use of those ecologically friendly materials is carried out in the frame work of BIOCOMP project which aims to develop locally produced biocomposites to be used as houses interior insulating materials. This, to offer refurbishment solutions for vernacular buildings in Touraine, Center of France. In this study, samples have been prepared using 4 different vegetal aggregates (rape straw, sunflower bark, sunflower pith and a mix of sunflower pith and bark) and a characterized crude earth as binder for a same binder/aggregates ratio.

The purpose of this study was to compare hygrothermal acoustical and mechanical properties of different materials based on vegetal aggregates and clay in order to characterize the performances of different biocomposites with a view to valorizing agricultural waste. We first analyzed the raw materials in order to get the density, thermal and hydric properties of the vegetal aggregates in one hand and the mineralogy and gravimetric data of the selected crude earth in the other hand. Thermal behavior of earth:vegetal aggregates mixes have been investigated at different humidity rates and different density ranges. Additionally, hydric properties have been measured to produce sorption and desorption curves and moisture buffer values (MBV) in one hand and capillarity of both aggregates and biocomposites on the other hand. Studying those hydric properties is relevant as a suitable insulating material for the refurbishment of the locally porous limestone made houses should offer good water vapor regulation. For the first time, we investigate here the thermal properties of mixes of crude earth with rape-straw and sunflower stem (bark and pith). According to the french NF P 75-101 standard, in order to be considered as building thermal insulator, a material should have a thermal conductivity below 0.065W.m-1.K-1. Lime-vegetal or clay-vegetal plasters can hardly

reach those performances, but one of their major advantages is their indoor climate regulation capacity as well as their compatibility with vernacular buildings made with crude earth or limestone. The weaknesses of these materials are their poor mechanical performances avoiding any structural use and also their sensitivity to liquid water. In order to enhance both characteristics, ethyl silicate tends to offer interesting guarantees as an additive that need to be further studied. On the contrary, an addition of a low amount (5%) of lime is counterproductive, decreasing both mechanical and capillarity resistance. Masons use to recover those kind of insulating materials with a finishing plaster, we then found interesting to measure the impact of this coating on the MBV and acoustical (absorption and transmission loss) performances of the biocomposites. It appears that the influence of those coating decrease hydric dynamical regulation and the sound absorption but enhance the transmission loss. Lastly, we investigate the behavior of the thermal flow through a limestone wall covered with a clay:rape-straw plaster in a climatic chamber. We compared the found results with a WUFI 2D software simulation and tried to also simulate the changes in the drying kinetic of a fresh composite covered with different kinds of finishing plasters pointing the important drying delays depending on the coating used.

One of the main interests of this study is to confirm that a wide range of locally produced vegetal byproducts could be used as bioaggregates for concretes. Local biomaterials industries could therefore emerge depending on the locally available resources at country scale. Despite its lower mechanical performances and vulnerability to liquid water compared to lime or pozzolanic binders, the use of crude earth as binder for vegetal concretes deserves further studies. Besides its ecological and hygrothermal performances, clay production is practically ubiquitous, enabling the emergence of very local clay-vegetal aggregate concrete industries to develop a green, carbon-light and circular economy.

Keywords: Agricultural by-products, crude earth, bio-based material, pith, sunflower, rape straw, thermal conductivity, MBV, sorption/desorption, capillarity, sound absorption, transmission loss, climatic chamber, WUFI 2D, finishing plasters