

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE BRETAGNE SUD
COMUE UNIVERSITÉ BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : « *Génie Civil* »

Par

Théo VINCESLAS

Caractérisation d'éco-matériaux Terre-Chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement

Thèse présentée et soutenue à Lorient, le 26 Novembre 2019

Unité de recherche : UMR CNRS 6027, IRDL

Composition du Jury :

Président : Jean-Claude Morel
Rapporteur : Jean-Emmanuel Aubert
Rapporteur : Thierry Langlet

Professeur, Coventry University
Professeur, Université Toulouse 3 Paul Sabatier
Professeur, Université de Picardie Jules Verne

Dir. de thèse : Thibaut Lecompte
Co-encadrant : Thibaut Colinart
Co-encadrante : Hélène Lenormand

Maitre de Conférence, Université Bretagne Sud
Maitre de Conférence, Université Bretagne Sud
Enseignant-chercheur, UniLasalle

Invité(s)

Arthur Hellouin de Ménibus

Chercheur, Eco-Pertica

« We but mirror the world. All the tendencies present in the outer world are to be found in the world of our body. If we could change ourselves, the tendencies in the world would also change. As a man changes his own nature, so does the attitude of the world change towards him. This is the divine mystery supreme. A wonderful thing it is and the source of our happiness. We need not wait to see what others do » - Mahatma Gandhi

« [...] soudainement, l'utopie a changé de camp : est aujourd'hui utopiste celui qui croit que tout peut continuer comme avant. »

« [...] Et si les amphétamines et les antidépresseurs ont été les pilules du monde productiviste, la résilience, la sobriété et les low tech seront les aspirines de cette génération gueule de bois. » - Pablo Servigne

« Habiter n'est pas loger. [...] C'est un entrelacement de liens. C'est appartenir aux lieux autant qu'ils nous appartiennent. Ce n'est pas être indifférent(e) aux choses qui nous entourent, c'est être attaché(e) : aux gens, aux ambiances, aux champs, aux haies, aux bois, aux maisons. À telle plante qui repousse au même endroit, à telle bête qu'on prend l'habitude de voir là. C'est être en prise, en puissance sur nos espaces... » - Camille x

À mon grand-père, Papy Berthé, pour avoir cru en moi.

REMERCIEMENTS

Ces trois années de thèse ont été une expérience intense, durant laquelle je n'ai cessé d'apprendre, de rencontrer, de découvrir... J'aimerais premièrement ici, exprimer ma très sincère reconnaissance envers l'ensemble de mes encadrants de thèse. Je pense avoir eu une chance immense d'avoir à la fois un sujet de recherche qui me tenait à cœur, et un encadrement pleinement humain, bienveillant, amical et débordant de curiosité scientifique. J'ai découvert avec chacun d'entre eux une manière différente de faire la recherche, de mener à bien un projet.

Je remercie alors tout d'abord mon directeur de thèse, Thibaut Lecompte, avec qui j'ai pu partager un quotidien plus qu'enrichissant. Grâce à son encadrement, plaçant le bien-être du thésard en avant, j'ai eu le temps et l'espace pour mener cette thèse selon mes choix, tout en assurant une rigueur scientifique. Je suis aussi très heureux qu'il m'ait donné la possibilité de construire mon propre cours sur le matériau de construction qui me passionne.

J'ai eu la chance d'avoir un encadrement très complet, composé de quatre autres brillants chercheurs.

Merci à Thibaut Colinart, qui a su me guider dans la caractérisation hygrothermique, et qui surtout a su transcrire mes questionnements scientifiques en une recherche précise et détaillée. Grâce à son accompagnement, j'ai pu comprendre de nombreuses choses en menant mes propres réflexions.

Merci à Erwan Hamard, avec qui j'ai fait mes débuts dans la recherche. Je pense qu'il est aujourd'hui la personne me connaissant le plus professionnellement parlant, et nous partageons une confiance importante l'un envers l'autre. Je le remercie pour toutes les opportunités qu'il m'a offertes, et pour avoir transformé, grâce à ses talents pédagogiques, ma passion pour la terre crue en un travail fourni et rigoureux.

Merci à Hélène Lenormand de m'avoir accompagné dans le monde de la recherche sur le végétal, sujet sur lequel je n'étais pas à mes aises au début de cette thèse. Ses mots rassurants ont su m'encourager et m'aider à proposer une recherche pluridisciplinaire de qualité. Je la remercie également pour nos échanges sur la vie d'un thésard et ses possibilités de poursuite de carrière.

Merci à Arthur Hellouin de Ménibus, sans qui cette thèse n'aurait pas eu lieu. Je n'exprimerais jamais assez ma reconnaissance pour avoir construit un projet de recherche portant haut des valeurs écologiques et humaines, et pour m'avoir fait confiance à travers les travaux de cette thèse. Je tiens à souligner que son implication dans une recherche éthique m'a inspiré et permis de découvrir la recherche comme moyen d'action engagée.

Je souhaite remercier les membres de mon Comité de Suivi Individuel : Christophe Baley et Antonin Fabbri. Leur expertise m'a permis de prendre du recul sur mes travaux. Ils ont été fortement intéressés par notre projet de recherche, ce qui a notamment amené des questions pertinentes.

J'exprime une importante gratitude envers les membres du jury de soutenance : Jean-Emmanuel Aubert, Jean Claude Morel et Thierry Langlet. Ces personnes se sont intéressées de très près à nos travaux, ont su lire à travers les lignes pour voir mon implication dans le sujet, ont posé des questions menant sur des débats de qualité.

Un grand merci à l'ensemble de mes collègues du laboratoire IRDL : Yann Guével pour son aide en informatique et pour nos discussions oscillant entre abstrait et sujets profonds, Philippe Pilvin pour son aide sur le logiciel Sidolo et l'organisation des séminaires doctorants, Arnaud Perrot pour nos discussions sur l'actualité des recherches sur la terre crue, Sylvie Pimbert pour son engagement dans un enseignement permettant la transmission de valeurs écologiques, Hervé Bellegou pour sa présence très précieuse au laboratoire et son aide dans une majeure partie de la réalisation de mes essais, Anthony Jegat pour son aide et sa patience avec Aramis, Anthony Magueresse pour sa gestion du MEB et du matériel de caractérisation hygrothermique, Séverine Georquin pour son accompagnement empreint de bonne humeur et ses blagues toujours plus « recherchées », William Berckmans pour son aide sur le matériel de caractérisation thermique, Noëlie Di Cesare pour sa cool attitude qui m'a permis d'assumer un peu plus la mienne, Grégory Girault pour nos longues discussions sur l'effondrement ou sujet s'en rapprochant, Julien Troufflard et Thomas Parenteau pour avoir permis avec tous les autres de créer une ambiance bien agréable en salle de pause.

J'aimerai aussi remercier une bonne partie du personnel du laboratoire, à savoir Roseline Le Squere, Pierre-Yves Manach, Axelle Guitton, Noluenn Chauvin, Lysiane Metayer, Sandrine Thuillier et Philippe Le Masson, pour leur aide quotidienne que ce soit dans la gestion administrative ou l'évolution du laboratoire. Je les remercie particulièrement de m'avoir accompagné et fortement soutenu dans l'aventure « Ma thèse en 180 secondes ».

Grâce à ce cadre de travail, j'ai pu réaliser mes travaux dans différents laboratoires. Je remercie ici les collègues du laboratoire GPEM à l'IFSTTAR de Nantes, et particulièrement Annick L'allouret et Frantz Buisson. Leur bonne humeur me manque régulièrement et j'ai de très bons souvenirs de nos voyages à travers la Bretagne et la Normandie pour aller collecter les terres.

Cette thèse n'aurait pas été aussi riche sans le projet de recherche l'entourant, Eco-Terra, et ses collaborateurs. Merci à Philippe Glé pour ses travaux en acoustique du terre-chanvre donnant un autre angle de compréhension du matériau, à Myriam Duc pour son aide plus que précieuse sur les essais de DRX et grâce à qui je m'intéresse aujourd'hui à la minéralogie des argiles, François Streiff pour les terres fournies et ses travaux sur des matériaux similaires, et enfin un grand merci à toute l'équipe Eco-pertica (Antoine, Sébastien, Alex, Mathias, Tristan, Elodie et Philippe) pour leur militantisme pour une construction écologique et accessible. J'ai eu la chance de travailler avec cette belle équipe avant mon arrivée en thèse, et j'en garde des connaissances et des souvenirs qui me suivront toute la vie.

De nombreux essais ont été réalisés dans cette thèse, et nous avons construit une base de données conséquente. Ceci n'aurait pas été possible sans les étudiants ayant participé à mes travaux en tant que stagiaire : Bérengère Moreau, Valentin Rochault, Saï Charan Bolleni.

Enfin, un très grand merci à l'ensemble de mes collègues doctorants, premièrement ceux avec qui j'ai partagé le quotidien du bureau : Florent Faure pour le partage de nos situations tout au long de la thèse, Mathilde Honoré pour sa bonne humeur et ses qualités « Normandes », Monia Grabow pour nos échanges sur les conditions de travail, Benjamin Buisson pour ses qualités de pédagogue, Alice Youssef pour l'inspiration d'avoir mené une thèse dans des conditions difficiles, Adrien Launay pour sa capacité à faire des blagues en étant sérieux. Merci aux doctorants de l'équipe de recherche : Typhanie Craipeau, Yohan Jacquet, Malik Spahic, et particulièrement Adrien Marchandise pour être devenu un véritable ami, sur qui j'ai pu compter, et avec qui j'ai pu échanger sur tout sujet.

Merci à l'ensemble des doctorants croisés au centre de recherche, pour leur présence et leur soutien durant ces années: Erwan Moreac, Dihya Mezi, Gabriel Gallin, Lucile Nuez, Tatiana Thomas, Jouault Albane, Stephen Cadiou, Yohann Rioual, Alexandre Kostenko, Maxime Chassaing, Victor Gager, Victor Popineau, Delphin Pantaloni, Mickaël Kedzierski, Constant Ramard, Antoine Lemartinel, Antoine Monnier, Alessia, Samuel Réquillé, Hugues Wouafo, Flavien Lucas, Delphine Lopez, Bertille Claude, Diane Hérault, Nathan Demazel, Simon Guiheuneuf.

Pour finir, je remercie tout particulièrement ma famille, à savoir mes parents sans qui je n'existerai pas et mes deux frères sans qui je ne serais pas qui je suis aujourd'hui. Un merci à ma belle-famille, pour leur générosité et leur accueil pour la rédaction de cette thèse.

Je garde le mot de la fin pour ma compagne, Clémence, qui a accepté de me suivre dans cette aventure Bretonne. Sans elle, pas de motivation, pas d'envie d'aller au bout, de batailler, de persévérer. Merci de me donner ce bonheur quotidien, cette joie de vivre, de me donner envie d'avancer. Merci d'avoir été là tout durant ces trois années, dans les moments difficiles comme dans les moments heureux.

Titre : Caractérisation d'éco-matériau Terre Chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement.

Mots clés : Terre, Chanvre, Terre-allégée, hygrothermique, Mécanique, Rhéologie

Résumé : Les mélanges chaux-chanvre font partie des éco-matériaux les mieux connus par la communauté scientifique, les professionnels du bâtiment et le grand public. Le constituant le plus impactant sur l'environnement dans ces mélanges est la chaux. Le projet de thèse vise à comprendre le comportement et mesurer les performances d'éco-matériaux isolants thermiques où la chaux aurait été substituée par de la terre crue, en vue de réduire drastiquement l'impact environnemental. Le premier enjeu de cette étude se situe dans la représentativité des résultats, aux regards de la variabilité des constituants. 28 terres, collectées à travers la Bretagne et la Normandie, et trois chanvres, ont été caractérisés. Les paramètres de caractérisation y sont étudiés selon plusieurs méthodes que l'on souhaitera comparer. Parmi ces terres, 6 ont été choisies pour représenter l'ensemble et fabriquer des échantillons.

Ensuite, les barbotines, mélange de terre et d'eau, sont étudiées afin d'établir des liens entre constituants de la terre et comportement rhéologique. La compréhension de ce comportement rhéologique nous permet alors de proposer des tests de chantier. Enfin, les échantillons fabriqués permettent d'étudier l'influence de la variabilité des constituants sur les performances mécaniques en compression et sur les performances hygrothermiques de stockage et de transfert (chaleur/vapeur d'eau) du terre-chanvre. Le projet de thèse s'inscrit dans un projet de recherche plus large, intitulé ECO-TERRA. L'étude des liens entre variabilité des constituants et performances de l'isolant a pour but, à travers ECO-TERRA, de permettre la valorisation des ressources disponibles localement.

Title: Characterization of Earth Hemp eco-building material by taking into account the variability of locally available resources.

Keywords: Earth, Hemp, Light-hemp, Hygrothermal performances, Mechanic, Rheology

Abstract: Lime and hemp mixtures is one of the best known eco-materials among the scientific community, building professionals and the general public. The most environmentally impacting component in these mixtures is lime. The thesis project aims to understand the behaviour and measure the performance of thermal insulating eco-materials where lime has been substituted by raw earth, in order to drastically reduce the environmental impact. The first issue of this study is the representativeness of the results, with regard to the variability of the constituents. 28 earth, collected across Brittany and Normandy, and three hemp shiv, were characterized. The characterization parameters are studied using several methods that will be compared. From these earth, 6 were chosen to represent the whole

and produce samples. Then, the slip, a mixture of earth and water, is studied in order to establish links between the earth constituents and its rheological behaviour. Understanding this rheological behaviour allows us to propose on-site tests. Finally, the manufactured samples allow to study the influence of material variability on the mechanical performances in compression and on the hygrothermal storage and transfer (heat/water vapour) performances of the earth-hemp. The thesis project is part of a larger research project entitled ECO-TERRA. The study of the links between material variability and performances of the insulation is intended, through ECO-TERRA, to enable the development of locally available resources.

SOMMAIRE

Table des figures	12
Nomenclature	17
Introduction	19
Contexte général et perception du changement climatique	20
Perception	20
Scepticisme	20
Solastalgie	20
Écologie, Perspectives d'effondrement et complexité des solutions	20
Bâtiment et développement durable.....	22
De la terre à la terre allégée.....	27
Problématique de la thèse	30
Le projet de recherche ECO-TERRA, cadre de la thèse	31
Plan de la thèse	32
1 Chapitre 1 : Caractérisation des terres brutes pour la fabrication de barbotines	33
1.1 Qu'est-ce que la terre ?	33
1.1.1 Définitions générales.....	33
1.1.2 Définition d'une argile.....	35
1.2 choix des méthodes d'analyses	41
1.2.1 Méthode générale de reconnaissance des terres	41
1.2.2 Analyse granulométrique	41
1.2.3 Caractérisation des argiles	42
1.2.4 Potentiel Hydroxyde.....	45
1.2.5 Masse volumique particulière	45
1.2.6 Consistance et rhéologie en fonction de la teneur en eau	45
1.2.7 Comportement hydrique.....	46
1.3 Choix et Caractéristiques des terres.....	48
1.3.1 Méthode de choix et d'observation des matériaux terres.....	48
1.3.2 Résultats de caractérisation	51
1.4 Analyse approfondie des terres choisies	55
1.4.1 Choix de terres pour la fabrication d'échantillon terre-chanvre.....	55
1.4.2 Caractéristiques des terres sélectionnées.....	56
1.4.3 Conclusion	59
2 Chapitre 2 : Caractérisation des chènevottes	60
2.1 Généralités et caractérisation du chanvre	61
2.1.1 Généralités	61

2.1.2	Microstructure et origine du pouvoir isolant thermique	64
2.1.3	Applications.....	66
2.1.4	Description du matériau utilisé	66
2.2	Définitions et méthodes de caractérisation	67
2.2.1	Granulométrie	68
2.2.2	Taux de fibres et taux de poussières.....	68
2.2.3	Masses volumiques	68
2.2.4	Composition chimique	70
2.2.5	Absorption d'eau.....	70
2.3	Résultats	71
2.3.1	Granulométrie	71
2.3.2	Taux de fibres	73
2.3.3	Taux de poussières	74
2.3.4	Masses volumiques	74
2.3.5	Composition chimique	76
2.3.6	Absorption d'eau.....	77
2.4	Conclusion	78
3	Chapitre 3 : Méthode de fabrication d'échantillons terre-chanvre	79
3.1	Introduction.....	80
3.2	Paramètres de représentativité.....	80
3.2.1	Applications.....	80
3.2.2	Mélange des constituants	81
3.2.3	Énergie de compactage	82
3.2.4	Caractéristiques géométriques	82
3.2.5	Teneur en eau finale	83
3.2.6	Masse volumique apparente.....	83
3.3	Cadre d'étude et méthode de fabrication	83
3.3.1	Fabrication de la barbotine	83
3.3.2	Méthode d'estimation de la teneur en eau	85
3.3.3	Fabrication du mélange terre-chanvre.....	87
3.3.4	Fabrication des échantillons moulés.....	88
3.3.5	Fabrication des échantillons projetés	89
3.4	Formulations.....	89
3.4.1	Variabilité de la terre.....	90
3.4.2	Influence de la teneur en eau	91
3.4.3	Variabilité du chanvre	91
3.4.4	Teneur en chanvre	91

3.4.5	Méthode de mis en œuvre	91
3.5	Caractérisation physique	93
3.5.1	séchage.....	93
3.5.2	Aspect.....	93
3.5.3	Masse volumique, fractions volumiques solides et porosité	93
4	Chapitre 4. Influence de la variabilité des terres sur le comportement rhéologique des barbotines	96
4.1	Introduction.....	97
4.2	Comportement rhéologique des barbotines	99
4.2.1	Définitions et principes rhéologiques	99
4.2.2	Paramètres géotechniques influençant la rhéologie	100
4.3	Matériaux	102
4.3.1	Échantillons à l'étude	102
4.4	Comportement rhéologique des barbotines en fonction de leur composition.....	103
4.4.1	Mesures au rhéomètre.....	103
4.4.2	Résultats et analyse des comportements rhéologiques des différentes terres	104
4.4.3	Vers une modélisation du seuil de cisaillement	104
4.5	Proposition de méthodes de mesure du seuil de cisaillement sur site	109
4.5.1	Méthodes existantes et développement de méthodes de mesure du seuil de cisaillement applicables sur chantier	109
4.5.2	Analyse des méthodes alternatives de mesure du seuil de cisaillement	116
4.6	Discussion	121
4.6.1	Comparaison des méthodes de mesure du seuil de cisaillement	121
4.6.2	Analyse du test du gant.....	122
4.7	Conclusion	124
5	Chapitre 5 : Caractérisation hygrothermique de composite terre-chanvre.....	125
5.1	Introduction.....	126
5.2	Matériaux	128
5.3	Méthodes	129
5.3.1	Remarques préliminaires sur l'état sec	129
5.4	Propriétés de stockage	130
5.4.1	Isotherme de sorption.....	130
5.4.2	Capacité calorifique.....	130
5.5	Propriétés de transfert	131
5.5.1	Conductivité thermique	131
5.5.2	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	131
5.5.3	Coefficient d'absorption capillaire	132
5.6	Résultats et discussion sur les propriétés de stockage.....	133

5.6.1	Répétabilité et influence de la méthode de mesure	133
5.6.2	Influence du conditionnement initial sur les matériaux constitutifs	134
5.6.3	Variabilité et validité de la loi de mélange pour les matériaux de construction en terre allégée	138
5.7	Résultats et discussion sur les propriétés de transfert	140
5.7.1	Incertitudes et répétabilité	140
5.7.2	Propriété de transfert de chaleur.....	141
5.7.3	Propriétés de transfert hydrique.....	142
5.8	Conclusions.....	144
6	Chapitre 6 : Caractérisation mécanique des composites terre-chanvre.....	145
6.1	Introduction.....	146
6.2	Comportement mécanique des matériaux de construction contenant des granulats bio-sourcés ..	147
6.3	Matériaux et Méthodes.....	152
6.3.1	Échantillons à l'étude	152
6.3.2	Compression simple	152
6.4	Résultats et discussion.....	157
6.4.1	Comportement mécanique du terre chanvre	157
6.4.2	Influence de la géométrie de l'échantillon et de la méthode d'acquisition.....	160
6.4.3	Paramètres d'influence sur le comportement mécanique	162
6.4.4	Caractérisation du comportement anisotrope des blocs de terre allégée	172
6.5	Conclusion	175
7	Conclusion	177
7.1	Résumé et principales contributions.....	178
7.2	Perspectives scientifiques et travaux prospectifs.....	182
7.3	Questions pratiques	184
	Bibliographie	186
	Annexes.....	197
1.1	Méthode de caractérisation des terres	197
1.1.1	Granulométrie laser VS Pipette	197
1.1.2	Comparaison CEC – VBS	198
1.1.3	Protocole de quantification DRX	199
1.1.4	Courbes types DRX, ATG et analyses ICP.....	200
1.2	Paramètres de modélisation du comportement rhéologique.....	202
1.3	Courbes de sorption des matériaux	203
1.3.1	Variabilité des terres et des chanvres	203
1.3.2	Influence du conditionnement.....	204
1.3.3	Loi de mélange	205
1.4	Ensemble de résultats de comportement mécanique	206

TABLE DES FIGURES

Figure 0-1: Niveau de complexité et bénéfices, "the collapse of complex societies" [11]. Au point C1, les bénéfices (B1) ne sont plus (linéairement) proportionnels au niveau de complexité ; En C2, la courbe atteint un maximum, les bénéfices associés au niveau de complexité ne peuvent pas être plus importants, puis ces bénéfices décroissent avec le niveau de complexité ; Au point C3, le haut de niveau de complexité apporte autant de bénéfices qu'en C1.	21
Figure 0-2 : Comparaison de l'influence de 3 méthodes constructives sur l'intensité sociale [31]	25
Figure 0-3: Principaux types de déchets du bâtiment [36]	26
Figure 0-4: De gauche à droite et de haut en bas: détail de la partie en terre de la muraille de Chine; habitats Chuxi Tulou; Ziggurat d'Ur; mosquée de Djenné en rénovation [40–42].	27
Figure 0-5: De gauche à droite et de haut en bas: chantier de bauge en Angleterre (2011); habitat vernaculaire de la Manche en bauge; bâtiments pans de bois et torchis à Rouen [43–45].	28
Figure 0-6: À gauche, fabrication de barbotine; à droite, chènevotte.....	29
Figure 0-7: Exemple de chantier de terre chanvre. Gauche, banchage ; droite, projection. (Crédits_ A. Hellouin de Menibus)	29
Figure 0-10: Acteurs du projet ECO-TERRA.	31
Figure 1-1 : Vue en coupe verticale de matériaux altérés depuis la surface jusqu'à la roche non altérée, selon les définitions de différentes disciplines [60]	34
Figure 1-2: a) Représentation d'une structure de sol naturel. b) Diagramme trois phases.....	35
Figure 1-3: Kaolinite (gauche) et illite (droite), images réalisées au microscope à balayage électronique [17]... ..	36
Figure 1-4: Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite [70]	36
Figure 1-5: Exemple de morphologie des cristaux argileux [72]	37
Figure 1-6: Principaux types de particules et d'agrégats des minéraux argileux [19].	37
Figure 1-7: Configuration géométrique d'un doublet capillaire. a) Description générale ; b) Détails du pont capillaire [77].	39
Figure 1-8 : Évolution de la force de cohésion capillaire (F_A) entre deux sphères rugueuses, en fonction du volume de liquide dans la contact. I : régime d'aspérité, II : régime de rugosité, III : régime sphérique [70].	39
Figure 1-9: Structure ionique d'un assemblage de feuillet d'argile. Schéma simplifié d'alternance entre couche négative des surfaces minérales et couche positive des cations en solution [75].	40
Figure 1-10 : a) Représentation schématique de la molécule de bleu de méthylène. B) représentation schématique de la molécule de cobaltihexamine. c) Représentation dans l'espace des deux molécules de bleu de méthylène, à gauche, et de cobaltihexamine, à droite.	43
Figure 1-11: À gauche, observation théorique du résultat de l'essai au bleu de méthylène. À droite, l'observation réelle d'un résultat, moins évidente.	43
Figure 1-12: Définition des limites d'Atterberg, w étant la teneur en eau d'un sol à l'étude.....	46
Figure 1-13: Carte de collecte des terres.	49
Figure 1-14: Exemple de Carazas [98].	49
Figure 1-15: a) Matrice de consistance. Les comportements observés sur la matrice sont : b) tas effondré ; c) cylindre stable ; d) boue ; e) étalement ; f) ségrégation.	50
Figure 1-16: Classification GEPPA des terres collectées (triangles bleus et points rouges) comparées aux terres de Bretagne (zone délimitée par les pointillés verts). Les points rouges correspondent aux terres sélectionnées pour l'ensemble des études de la thèse	52
Figure 1-17: Représentation graphique des données de caractérisation des 28 terres.	54
Figure 1-18: courbes granulométriques des terres sélectionnées.	56
Figure 1-19: Image MEB des six terres à l'étude.	58
Figure 2-1: Présentation des différentes parties d'une plante de chanvre: feuille, fleurs, tige et graine [4].	62
Figure 2-2: Section d'une tige de chanvre [8].	63

Figure 2-3: Gauche, Moisson du chanvre (crédits Philippe Lambert); Droite, ensilage du chanvre (crédits Laure Chazelas)	63
Figure 2-4: Présentation des produits issus du chanvre et de leur domaine de valorisation.	64
Figure 2-5: Vues à différents grossissements d'une coupe transversale de particule de chènevotte. Les conditions d'imageries sont présentées sous chaque image.	65
Figure 2-6: Conductivité thermique versus masse volumique de nombreux matériaux de construction. Données issues de « l'isolation thermique écologique » [109]......	66
Figure 2-7: Photos des chènevottes en vrac.	67
Figure 2-8: Exemple de binarisation pour analyse d'image et mesure des longueurs et largeurs de chènevottes.	68
Figure 2-9: Représentation des différents types de fractions volumiques de chènevottes en vrac, comprenant les porosités inter et intra particulaires, ouvertes ou fermées [18]......	69
Figure 2-10: Technique d'extraction des composants biochimiques de matière organique, selon [123]	70
Figure 2-11 : Longueur et Largeur des chènevottes C1, C2 et C3 par analyse d'image.	71
Figure 2-12: Longueur et largeur moyennes des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont encadrées en rouge, leurs zones de représentativité de leur variabilité sont en traits pointillés.	72
Figure 2-13: Élongation moyenne des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité de leur variabilité est en traits pointillés.....	72
Figure 2-14: Taux de fibres des chènevottes à l'étude, incluant la répartition entre fibres longues et fibres courtes.	73
Figure 2-15: Taux de poussières des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.....	74
Figure 2-16: Masse volumique apparente des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.	75
Figure 2-17: Masse volumique des parois des chènevottes à l'étude, présentés avec deux niveaux de broyage différents. Comparaison avec trois autres matériaux végétaux disponibles.	75
Figure 2-18: Pourcentages massiques des différents composés chimiques des chènevottes, dosés avec la méthode de Van Soest.	76
Figure 2-19: Cinétiques d'absorption des chènevottes.....	77
Figure 2-20: Absorption d'eau des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.....	78
Figure 3-1 : Remplissage par banchage. Schéma en coupe en situation de construction neuve et rénovation [50].	81
Figure 3-2: Principales techniques de projection de terre-chanvre. A) doublage inférieur à 6mm, B) doublage supérieur à 6mm [2]......	81
Figure 3-3: a) Mélange de la terre brute et de l'eau, b) tamisage, c) Refus du tamis de 6mm, d) Refus du tamis de 2mm.	84
Figure 3-4: Abaque de détermination de la teneur en eau par masse volumique. Est utilisée la masse volumique particulaire moyenne.	86
Figure 3-5: Abaque de détermination de la teneur en eau par masse volumique (Masse volumique particulaire de la terre connue). Les points expérimentaux des barbotines à l'étude sont représentés.....	87
Figure 3-6: mélange de chènevotte et de barbotine.	88
Figure 3-7: Fabrication d'échantillon de terre-chanvre par projection.....	89
Figure 3-8: impact des ajouts de sable sur la granulométrie des terres utilisées en barbotine. S0 correspond à la granulométrie de la terre brute après tamisage à 2mm.....	90
Figure 3-9: Représentation graphique des formulations terre-chanvre réalisées. a) influence du taux de sable. b) influence du type de terre à teneur en eau équivalente ou seuil de cisaillement estimé équivalent, c) influence du type de chanvre, d) influence du taux de chanvre et de la méthode de mise en œuvre.	92
Figure 3-10: Plage de masses volumiques de différents matériaux de construction, dont la présente étude.....	93
Figure 3-11: Aspect visuel de cubes des différentes formulations réalisées.	94

Figure 4-1: Le test du "gant" réalisé sur chantier. a) la barbotine est trop fluide, la main transparait clairement à travers ; b) la formulation de la barbotine est correcte lorsqu'elle forme un gant parfait sur la main, sans transparence de celle-ci ; c) la barbotine est trop grasse lorsque les doigts sont palmés et le gant trop épais. .	98
Figure 4-2: Rhéogrammes types de différents comportements rhéologiques observables [175].	99
Figure 4-3: Courbe type contrainte déformation d'un essai au rhéomètre à bas régime, soit 0,01 s-1. [165]...	100
Figure 4-4: Seuil de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide de différentes suspensions de terre [177].	101
Figure 4-5: Rapport seuil de cisaillement et viscosité en fonction de la taille moyenne des particules. G1 indique une argile à faible activité ; G2, argile à haute activité. G3, terres limoneuses ; G4, terres sableuses ; G5, terres graveleuses [184].	101
Figure 4-6: Représentation schématique des propriétés rhéologiques en fonction de l'association des particules d'argiles en suspension [187–190].	102
Figure 4-7: Courbes brutes d'essais réalisés sur une barbotine de terre (T1).	104
Figure 4-8: Gauche, Points expérimentaux et modélisation (en tirets) selon une exponentielle des courbes seuil de cisaillement vs teneur en eau des barbotines. Droite, textures des terres utilisées.	105
Figure 4-9: Points expérimentaux et modélisation (en tirets) selon le YODEL des courbes seuil de cisaillement vs fraction volumique solide des barbotines.	107
Figure 4-10: Corrélations entre paramètres du YODEL et caractéristiques géotechniques : a) Fraction volumique solide maximale des fines vs fraction argileuse des fines ; paramètre m1 vs taille moyenne des fines ; Indice de plasticité vs fraction volumique maximale des fines.	108
Figure 4-11: Formes initiales pour l'essai d'affaissement/d'étalement.	109
Figure 4-12 I) Le test d'immersion : a/ état initial ; b/ dispositif partiellement sorti ; c/appareil totalement sorti. II) Le dispositif expérimental développé pour l'essai.	111
Figure 4-13 Résultats typiques des mesures sur plaque immergée (a) : données brutes, (b) : estimation du seuil de cisaillement	113
Figure 4-14: Gauche, Paramètres de géométrie du cône ; Droite, Barbotine restant sur la surface interne du cône après essai	114
Figure 4-15: géométrie du cône de Marsch.	115
Figure 4-16 a) Seuil de cisaillement d'une barbotine mesurée à l'essai d'étalement sur du papier de verre (Sp) ou une surface mélaminée, avec deux récipient de forme et de volume différents : cône ou cylindre (Cyl) ; b) Seuil de cisaillement des six différentes barbotines déduites de l'essai d'étalement : comparaison des résultats avec la formule de Pierre et al (équation 4-10) et de Roussel et al (équation 4-11).	117
Figure 4-17 Volume du réservoir pour l'essai d'étalement selon une hauteur minimale à la fin de l'essai.	118
Figure 4-18 Seuils de cisaillement des six barbotines différentes mesurées à l'aide de l'essai au cylindre immergé, à partir de la 1ère et de la 3ème phase de l'essai Comparés aux mesures au rhéomètre. Les résultats de la 3ème phase sont comparés au modèle d'enduction par trempage de Maillard et al [28].	120
Figure 4-19 : Influence de la conception de l'essai sur la mesure du seuil de cisaillement du cône comparé au rhéomètre. Les six terres ont été testées sur le cône $\beta=60^\circ$, tandis que seul la barbotine T1 a été testé sur le cône $\beta=85^\circ$ et le cône sans extension.	121
Figure 4-20: Comparaison des résultats qualitatifs du test du gant aux résultats de seuils de cisaillement au rhéomètre sur les 6 barbotines.	123
Figure 5-1: Plaque chaude gardée	131
Figure 5-2 : Dispositif d'essai d'absorption capillaire.	132
Figure 5-3 : Gauche, aspect après absorption ; droite, érosion de la surface immergée.	132
Figure 5-4: Courbes type d'absorption d'eau de trois échantillons de la formulation T1C1 (gauche) et T1C2 (droite).	133
Figure 5-5: Corrélation entre CEC et teneur en eau à 80%HR.	135
Figure 5-6: Capacité calorifique sèche (a) et teneur en humidité à 80 ± 2 %HR (b) des barbotines : influence du conditionnement initial.	136

Figure 5-7 : Capacité calorifique spécifique sèche (a) et teneur en humidité à 80 ± 2 %HR (b) des chènevottes : influence du conditionnement initial.	137
Figure 5-8: Conductivité thermique des matériaux de construction en terre allégée mesurée après différents conditionnements en fonction de la masse volumique.	141
Figure 6-1 : Recommandations de construire en chanvre sur les performances mécaniques des formulations de chaux-chanvre en fonction des applications [128].	146
Figure 6-2: Différents comportements mécaniques de matériaux de construction. Exemple de transition du comportement du béton de fragile à ductile [261].	147
Figure 6-3: Comportements mécaniques d'un terre allégée stabilisé en fonction du dosage en liant. à gauche, fort dosage, à droite, faible dosage en liant [126].	148
Figure 6-4: À gauche, terre tournesol (moelle et écorce), après rupture. à droite, terre colza, densification sans rupture [137].	148
Figure 6-5: À gauche, Effet tonneau [264]. à droite, déformation des mousses d'aluminium à la porosité ouverte [265].	149
Figure 6-6: Comportement mécanique en compression d'un chaux chanvre à 28 jours de cure. effet d'un chargement cyclique [259].	149
Figure 6-7: Relation entre compacité et limite d'élasticité/module d'élasticité de matériaux chaux-chanvre [141].	150
Figure 6-8: Limite d'élasticité en fonction du dosage en chènevotte dans les mélanges chaux-chanvre. Valeurs expérimentales et modèle [141].	151
Figure 6-9: À gauche, dispositif d'acquisition de données de déformation lors d'essais de compression sur éprouvette cylindrique (extensomètres). À droite, même installation sans extensomètres.	152
Figure 6-10: Dispositif d'acquisition pour essai de compression sur éprouvette cubique.	154
Figure 6-11: Gauche, vue caméra ARAMIS. Droite, modélisation de la surface avec trois extensomètres virtuels	154
Figure 6-12: Direction d'application de la force pour caractérisation de l'anisotropie de comportement.	155
Figure 6-13: Définitions des différents modules d'élasticité en compression	156
Figure 6-14: résumé des méthodes de mesure et de traitement des données pour le calcul du module d'élasticité	157
Figure 6-15: Courbes types contrainte-déformation des essais en compression simple.	158
Figure 6-16: Images associés aux courbes types, illustrant les différents comportements mécaniques observés. Pour chaque échantillon : début, milieu et fin d'essai.	160
Figure 6-17: A) Influence de la méthode d'analyse des résultats de module d'élasticité des cylindres ; b) Influence de la méthode d'acquisition des déplacements lors d'essais de compression simple sur cube ou cylindre- Module d'élasticité sécant.	160
Figure 6-18: Influence de la géométrie sur les propriétés mécaniques en compression. à gauche, limites d'élasticité ; à droite, modules d'élasticité avec valeurs expérimentales et valeurs recalculées des cubes selon les résultats ARAMIS.	162
Figure 6-19: Images MEB de l'interface terre (REF) et chanvre (C1).	163
Figure 6-20: Retrait moyen calculé sur la hauteur des cylindres de l'ensemble des formulations.	164
Figure 6-21: Résultats de comportement mécanique, toutes formulations confondues. A) Coefficient de poisson vs compacité ; B) limite D'élasticité vs module d'élasticité sécant.	165
Figure 6-22: Relation entre limite d'élasticité et fraction volumique d'argile.	168
Figure 6-23: Analyse du paramètre k, en fonction de la granulométrie des terres.	169
Figure 6-24: Effet de la teneur en eau de la barbotine sur la limite d'élasticité du composite terre-chanvre (A) et sur son module d'élasticité sécant (B).	170
Figure 6-25: Influence du type de chènevotte sur le comportement mécanique global.	171
Figure 6-26: Influence de la granulométrie des chènevottes sur les propriétés mécaniques : A) limite d'élasticité ; B) Module d'élasticité sécant.	171
Figure 6-27: Comparaison entre limite d'élasticité maximale et limite d'élasticité à l'intersection.	173

Figure 6-28: Courbes types de compression de cubes de terre chanvre selon deux directions. Définitions des différentes limites d'élasticité mesurées.	173
Figure 6-29: Résultats des essais de compression sur cube selon leur orientation.	174
Figure 6-30: Degré d'anisotropie du module d'élasticité sécant selon le rapport entre masse volumique de chènevotte dans l'échantillon et masse volumique apparente des chènevottes.	175
Figure 7-1: Comparaison des résultats (min et max) de conductivité thermique avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.	180
Figure 7-2: Comparaison des résultats (min et max) de facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.	181
Figure 7-3: Comparaison des résultats (min et max) de comportement mécanique avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.	182
Figure 7-4: Dispositif d'essais de cisaillement de cadres.	183
Figure 7-5: à gauche, exemple de cadre de terre chanvre cisailé; à droite, courbes types de trois échantillons testés.	183
Figure 0-1: Comparaison des passans à 2µm, 20µm et 50µm de l'analyse granulométrique par méthode pipette et Laser.	197
Figure 0-2: Comparaison des résultats de valeur au bleu (MBV) et de Capacité d'échange cationique (CEC) ...	198
Figure 0-3: Principe de recherche de la quantification des minéraux argileux par croisement d'analyse ICP et DRX. Exemple de la terre de référence T1.	199
Figure 0-4: Exemple de courbes DRX. De haut en bas : première partie de courbe sur lame orientée ; seconde partie de la courbe de lame orientée : courbe de poudre dispersée.	200
Figure 0-5: Courbes de sorption des matériaux constitutifs: à gauche, les 6 terres, à droite les 3 chanvres	203
Figure 0-6: Isothermes de sorption de la terre de référence (T1) à gauche, et de chènevotte (c1) à droite, pour différents protocoles.	204
Figure 0-7: Isothermes de sorption de la terre de référence (T1) et de chènevotte (C1) selon les techniques de mesure.	204
Figure 0-8: Comparaison des courbes de sorption isotherme de formulation, T4C1a à gauche et T1C1 à droite, en fonction des valeurs expérimentales ou obtenues avec une loi de mélange.	205

NOMENCLATURE

Va	Volume d'air	As	argile sableuse
Vw	Volume d'eau	Als	argile limono-sableuse
Vs	Volume de sol (solides)	Al	argile limoneuse
Vv	Volume des vides	AS	argilo-sableux
VT	Volume total	S	sableux
Wa	Poids de l'air = 0	SS	sable
Ww	Poids de l'eau	SI	sable limoneux
Ws	Poids des solides	Ls	limon sableux
WT	Poids total	LL	limon pur
MEB	Microscope à Balayage Electronique	PSD	Particules Sizes Distribution / Granulométrie
P	Pression relative de vapeur d'eau	La	limon argileux
P_0	Pression absolue de vapeur d'eau	Sa	sable argileux
C.m-2	Coulombs par mètre carré	LAS	limon argilo-sableux
Δp	Différentiel de pression	Sal	sable argilo-limoneux
p_gaz	Pression dans la phase gazeuse	Lsa	limon sablo-argileux
p_liquide	Pression dans la phase liquide	L	limon
σ	Tension superficielle	RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
x, y, y' et y''	Paramètres géométriques dans le modèle de Laplace-Young	DPI	Dot Per Inch
y_0	Diamètre minimal du pont capillaire	l	Longueur de particule
F_A	Force capillaire	L	Largeur de particule
θ	Angle de mouillage du pont capillaire		
ρ	Masse volumique	w	Teneur en eau
VBS	Valeur au Bleu des Sols	m	Masse de l'échantillon
CEC	Capacité d'échange cationique	V	Volume de l'échantillon
ACB	Activité des argiles calculée sur la VBS	p_e	Masse volumique particulière de la terre
ACEC	Activité des argiles calculée sur la CEC	p_w	Masse volumique de l'eau
DRX	Diffraction par Rayon X	w_slip	Masse volumique de la barbotine
ATG	Analyse Thermo-Gravimétrique	A	Méthode de fabrication de la barbotine "type chantier"
ICP	Spectrométrie à plasma à couplage inductif	B	Méthode de fabrication de la barbotine à seuil de cisaillement estimé fixé
W_p / LP	Limite de plasticité	C	Méthode de fabrication de la barbotine à teneur en eau fixée
W_l / LL	Limite de liquidité	X1	Mélange terre-chanvre avec une barbotine A
IP	Indice de Plasticité	X2	Mélange terre-chanvre avec une barbotine B ou C
DVS	Dynamic Vapor Sorption / Sorption dynamique	L	Hauteur de la partie cylindrique du cône de Marsh
AA	argile lourde	h_s	Hauteur de barbotine restante
A	argileux	H_f	Hauteur de la partie conique du cône de Marsh
H₀	Hauteur initiale du contenant du test à l'étalement	v	Rapport de stabilité verticale des essais au rhéomètre équipé d'une géométrie Vane
R_{0max}	Rayon maximal initial du contenant du test à l'étalement	h_c	Hauteur de l'outil Vane
R_{0min}	Rayon minimal du contenant du test à l'étalement	k	Nombre de particules
V	Volume du contenant du test à l'étalement	Ø_{max}	Diamètre maximal des particules dans les barbotines
ρ	Masse volumique	I	Inertie
g	Gravité	Cyl	Cylindre
S	Slump / affaissement	λ	Epaisseur de matériaux cisailé à l'interface air/matériau
S'	Affaissement sans dimension	α	Paramètre de Fit
R	Rayon final d'étalement	w	Teneur en eau

V₀	Volume initial de l'échantillon	ρ_e	Masse volumique particulaire
a, b	Paramètre du calcul de de seuil de cisaillement par la formule de Pierre	ρ_w	Masse volumique de l'eau
M	Masse	m	Masse de l'échantillon
A	Surface de la plaque (essai d'immersion)	λ	Conductivité thermique
W'	Poids apparent	C_p	Capacité calorifique
M₀	Masse initiale de l'échantillon	μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau
A₀	Surface initiale de la plaque	w80	Teneur en eau à 80% d'humidité relative
t	Epaisseur du restant de barbotine	MBV	"Moisture Buffer Value" ou valeur tampon d'humidité
T	Force de tension à l'interface air/liquide	C	Compacité
p₀	Périmètre du cylindre	f_{chanvre}	Fraction massique de chanvre
h	Hauteur immergée	ρ_{terre}	Masse volumique particulaire de la terre
h₀	Hauteur de la plaque	V_{terre}	Volume de terre
H_c	Hauteur du cône à parois rugueuse, sans extension	V_{chanvre}	Volume de chanvre (parois)
β	Angle de la pente du cône à parois rugueuse	V_{échantillon}	Volume de l'échantillon
R_{max}	Rayon maximal du cône à parois rugueuse	ρ_{chanvre}	Masse volumique des parois des chènevottes
R_{min}	Rayon minimal du cône à parois rugueuse	ρ_{sec}	Masse volumique sèche de l'échantillon
A_{cone}	Surface de la pente	A_w	Coefficient d'absorption capillaire
R_f	Rayon maximal du cône de Marsh	DVS	"Dynamic Vapor Sorption"
R	Rayon minimal du cône de Marsh	SSS	Solution Saline Saturée
V_S	Volume des solides	L/G	Rapport Liant sur Granulat
V_T	Volume total	MOE	"Module of Elasticity"
η	Taux de porosité	C/T	Rapport Chanvre sur Terre
σ_e	Limite d'élasticité du composite	k	variable d'ajustement
σ_L	Résistance spécifique du liant	φ_{Argile}	Fraction volumique solide d'argile
σ_G	Résistance théorique de granulat densifié	a	Constante
φ_G	Fraction volumique solide de granulat		
φ_{Gmax}	Fraction volumique de granulat nécessaire à remplir tous les pores		

INTRODUCTION

CONTEXTE GÉNÉRAL ET PERCEPTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

PERCEPTION

Le phénomène de changement climatique est aujourd'hui conscientisé. Son origine anthropique est validée par 98% des chercheurs travaillant sur les sciences du climat [1] et confirmée par la communauté scientifique [2–4]. Étant tout aussi connu du grand public, la problématique de la lutte contre le réchauffement climatique est un défi majeur de notre temps et son urgence est avérée. Le contexte actuel tend à décrire une difficulté de la population à intégrer ces informations afin d'agir au quotidien. Une étude réalisée sur des populations de Portland et Houston, montre que près de 90% des personnes se sentent concernées. Parmi elles, seulement près de 50% rapportent un changement de comportement (diminuer ses consommations d'énergies domestiques, réduire ses consommations d'essence, recycler...) [5]. Les freins, à l'échelle individuelle, évoqués par l'autre moitié de la population étudiée sont majoritairement les suivants : ne pas savoir comment changer son comportement pour diminuer sa contribution au changement climatique, changer son propre comportement ne fera aucune différence, ou encore ne pas avoir assez de temps ou d'argent pour changer. L'étude met en lumière le fait que la majorité de la population veut faire partie de la solution au problème, mais qu'un changement de mode de vie du public peut être maximisé par des mesures de supports politiques et structurels [5].

SCEPTICISME

Le GIEC insiste sur la nécessité de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre de 70% d'ici 2050 pour maintenir la hausse de température en dessous de 2°C [4]. Malgré le consensus scientifique sur l'importance du phénomène, des médias grand public se réfèrent encore à des articles scientifiques climato-sceptiques non vérifiés par des pairs [2], ce qui entrave la prise de conscience par le grand public. Ajouté aux supports politiques et structurels, un support médiatique réel permettrait d'augmenter la part de la population optant pour un changement de comportement.

SOLASTALGIE

Le constat de ces freins, additionnés aux attaques perpétrées contre l'environnement atteint aujourd'hui directement la santé physique – en 2012, une mort sur neuf dans le monde était attribuée à la pollution de l'air soit 6.5 millions [6] – mais aussi psychique, de certaines populations. Depuis quelques années, un nouveau terme est apparu pour décrire la détresse psychique ou existentielle ressentie par des personnes fortement affectées par le changement climatique : *Solastalgia*, ou la solastalgie [7], de *Solacium* (consolation ou réconfort) et *algia* (douleur, souffrance ou maladie). L'auteur de ce néologisme a mis en relation la santé d'un environnement proche avec la santé humaine. Il met notamment en évidence la perte de stabilité psychique due à une transformation du lieu de vie, à une perte de confort, à l'incapacité d'agir sur la cause, ou plus encore à une forte empathie envers la destruction d'une identité endémique (diversité culturelle et/ou biodiversité).

ÉCOLOGIE, PERSPECTIVES D'EFFONDREMENT ET COMPLEXITÉ DES SOLUTIONS

C'est en 1866 que le voyageur Ernst Haeckel (1836-1919) forge le mot *Ökologie* à partir du grec *oïkos* « habitat, maisonnée » et *logos* « discours, connaissance » [8]. Il s'agit de la science des relations entre les êtres vivants et leur environnement. Cette notion, utilisée au 20^{ème} siècle comme base de définition de l'écologie politique, est à cette époque peu connue du grand public, et ne fait pas l'objet d'intérêts politiques. Plus tard, dans le domaine du bâtiment, le bio-climatisme apparaît comme une approche de l'habitat en correspondance avec cette définition de l'écologie. Le bio-climatisme se définit alors comme un ensemble de principes de construction d'un bâtiment, permettant de prendre au maximum en compte l'environnement climatique direct de celui-ci pour ainsi créer une efficacité énergétique. Cette notion permettra d'optimiser le fonctionnement du bâtiment et le confort de l'utilisateur, mais ne permettra pas d'avancer sur les questions d'impacts environnementaux.

Récemment, une nouvelle approche scientifique pluridisciplinaire est née de la combinaison de nombreux constats alarmant. Sans être exhaustif, nous pouvons citer l'urgence climatique, l'effondrement de la biodiversité, la croissance démographique, la fin de l'énergie bon marché, la raréfaction de minéraux précieux ... Cette discipline a vu le jour ces dernières années sous le nom de « collapsologie », de « collapse », traduction anglaise d'effondrement. Selon Y.Cochet [9], nous pouvons dessiner les contours de l'effondrement comme un « processus à l'issue duquel les besoins de base (eau, alimentation, logement, habillement, énergie, mobilité, sécurité) ne sont plus fournis à une majorité de la population par des services encadrés par la loi ». P.Servignes et R.Stevens proposent de rassembler, à travers un livre [10], les bases et les questions liées à la collapsologie : Quel est l'état global de notre Terre, de notre civilisation ? Quels sont les liens entre les différents signaux d'alarmes, et peut-il y avoir des réactions en chaîne ? Jusqu'où l'effondrement peut aller et en combien de temps ? Comment vivre en ayant conscience de ces faits et comment s'y préparer ? Aussi, le logement étant un besoin de base, mettre en perspective le domaine de la construction avec des phénomènes d'effondrement est éclairant et peut apporter un nouvel angle de réflexion autour des solutions futures dans le domaine du bâtiment.

L'incompatibilité entre complexité et durabilité a été mis en évidence par Tainter & Taylor [11]. La complexité est définie comme un outil de résolution de problèmes, évoluant dans le cadre de systèmes sociaux, se différenciant de par leur structure, leur comportement et leur degré d'organisation. L'utilisation de solutions complexes a des limites [11], notamment parce qu'elles nécessitent plus de travail, de temps ou d'argent, que l'on peut traduire par un développement coûteux en ressources limitées. L'augmentation de la complexité, efficace à court terme, altère ainsi notre capacité à résoudre les problèmes futurs (Figure 1). La durabilité écologique des activités humaines étant le cœur du problème, ce principe mentionne notamment l'utilisation de technologies de plus en plus énergivore.

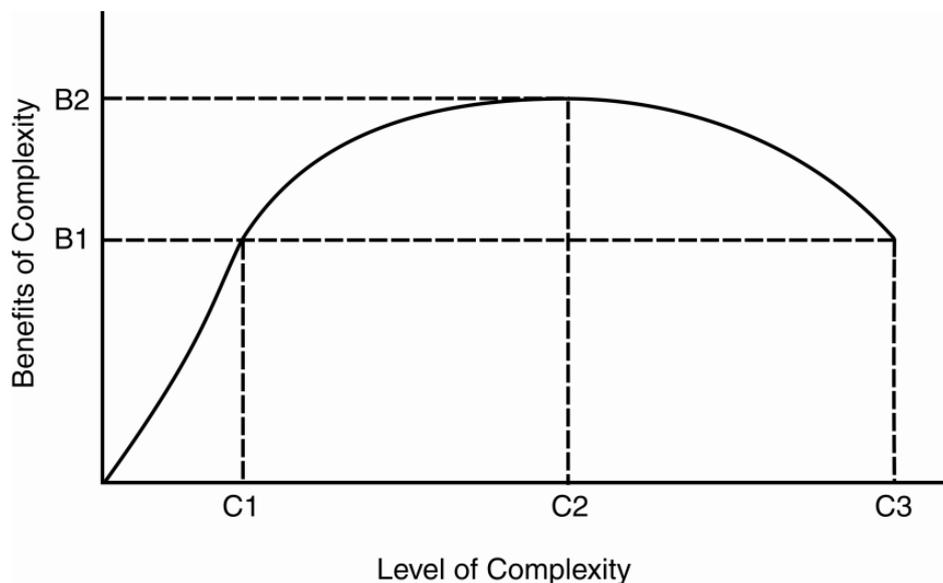


Figure 0-1: Niveau de complexité et bénéfices, "the collapse of complex societies" [11]. Au point C1, les bénéfices (B1) ne sont plus (linéairement) proportionnels au niveau de complexité ; En C2, la courbe atteint un maximum, les bénéfices associés au niveau de complexité ne peuvent pas être plus importants, puis ces bénéfices décroissent avec le niveau de complexité ; Au point C3, le haut de niveau de complexité apporte autant de bénéfices qu'en C1.

Ainsi, aller vers des solutions constructives permettant moins de complexité, c'est faire le choix de la résilience, ou résistance au changement. C'est un concept qui peut être appliqué au bâtiment d'aujourd'hui et de demain.

BÂTIMENT ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'impact environnemental des activités humaines, dont l'utilisation de bâtiments, est aujourd'hui mesuré à l'aide d'un outil : l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Cette analyse permet de quantifier, entre autres, des impacts environnementaux tels que l'émission de gaz à effet de serre, l'eutrophisation, la consommation d'eau, l'impact sur la santé humaine, la pollution des sols et des eaux et l'acidification des océans. Pour un bâtiment, l'ensemble de sa vie est considéré, de la construction à la déconstruction et à la fin de vie de ses matériaux. Dans cette partie, une distinction est établie entre l'impact du bâtiment durant son utilisation, définie principalement par l'énergie en service, et l'impact de la construction, définie en grande partie par l'énergie grise.

Le secteur du bâtiment en Europe représente 40 à 45% des émissions de gaz à effet de serre (GES) [12]. En France, il est à l'origine de 43% des consommations d'énergie [13,14], et de 50% des ressources exploitées [15].

Concernant l'énergie d'usage du bâti existant aujourd'hui en France, les besoins en énergie de chauffage représentent trois quarts de la consommation énergétique totale du bâtiment [6,12], vient ensuite l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire, puis à l'éclairage et l'électroménager. La production d'énergie étant la première source de pollution au monde, la diminution de l'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments constitue un levier majeur de lutte contre le changement climatique. Les principales sources de déperditions thermiques, augmentant le besoin en chauffage d'un bâtiment sont les défauts d'étanchéité à l'air, et une mauvaise isolation thermique de son enveloppe. L'optimisation du chauffage des bâtiments passe donc principalement par une meilleure isolation.

Déjà en 2004, l'observation de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments européens menait à constater que l'impact environnemental lié à la production de matériaux de construction et à leur mise en œuvre ne représentait qu'un quart de l'impact total du secteur du bâtiment. C'est dans cette idée que le gouvernement français a mis en place une réglementation thermique (RT) dès les années 70. La première réglementation, débutée en 1974 suite au premier choc pétrolier de 1973, avait pour objectif d'obliger l'installation d'une isolation et d'un système de régulation du chauffage. Ayant évolué au fil des années, c'est aujourd'hui la RT2012 qui est appliquée. Cette réglementation, couverte par les décret et arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments [16], donne trois principaux critères à respecter (ou coefficients) variables en fonction de l'emplacement géographique de la construction :

- Consommation conventionnelle maximale d'énergie de l'ordre de 50kWh/m²/an
- Exigence de confort d'été avec une température intérieure à ne pas dépasser, nommée Tic (Température intérieure conventionnelle) et égale à 26°C.
- Exigence d'efficacité énergétique bioclimatique

En 2017, la surface habitable neuve de logements individuels équivaut à 33.8 millions de mètres carrés, ce qui correspond seulement à 1.7% du parc immobilier Français. 55% des logements individuels et 69% des logements collectifs dataient d'avant 1974 (Tableau 0-1). Si l'on suit les volontés de construction de logement neuf (300000 logements neuf/an selon l'Ademe [17]) et que l'on considère les logements existants en 2017 (Tableau 0-1) alors on peut dire que plus de 70% des logements de 2050 sont déjà construits. À l'échelle Européenne, ce sont près de 80% des bâtiments résidentiels qui datent d'avant 1990 et consomment 90% de l'énergie consommée par l'ensemble des bâtiments résidentiels [18]. Ces éléments montrent qu'en Europe l'enjeu d'économie d'énergie dans le bâtiment se situe clairement dans la rénovation thermique.

Tableau 0-1: État des lieux du parc immobilier français [19]

Type de construction		Nombre de bâtiments existants	Période de construction des logements existants				Surface de plancher existante [10 ⁶ m ²]	Surface de plancher construite en 2017 [10 ⁶ m ²]
			<1948	1948-1974	1974-2000	>2000		
Résidentiel (70% en surface de planchers)	Maisons individuelles	19.33 millions (56% en nombre)	33%	22%	33%	12%	2011	33.8 (1.7% du parc)
	Logements collectifs	15.21 millions (44% en nombre)	28%	41%	23%	8%	862	25 (2.9% du parc)
Tertiaire (30% en surface de planchers)		1.46 millions	(<1960) 10%	(1960-1974) 35%	43%	12%		
Surface moyenne des logements			75 m ²	75 m ²	82 m ²	80 m ²		
Matériaux de structures principalement utilisés dans la période			Pierre, brique pleine, pisé, pans de bois + terre	Pierre, brique pleine et creuse, parpaing	Brique pleines et creuses et parpaings			
Principaux Matériaux d'isolation			Aucun		Laines minérales, mousses isolantes synthétiques (PSE, PU)			
Proportion de "passoires énergétiques" (classement F et G du diagnostic de performance énergétique)	Maisons individuelles		26%	44%	17%	2%		
	Logements collectifs		38%	30%	11%	13%		

Pour répondre à ces enjeux, la Fédération Française du Bâtiment (FFB) annonce 20 millions de logements à rénover d'ici à 2050. Pour cette même date, l'Ademe ainsi que The Shift Project (Think Tank) imaginent dans différents rapports [17,18] les évolutions de nos habitats et souhaite que l'ensemble des bâtiments existants soient rénovés selon les normes Bâtiment Basse Consommation (BBC). Sans compter le secteur du bâtiment tertiaire, dans lequel la consommation par utilisateur est 50% supérieure à celle de l'habitat (les habitations européennes consomment en moyenne environ 200 kWhep/m²/an alors que la consommation moyenne des bâtiments tertiaires est proche de 300 kWhep/m²/an [19]). The Shift Project propose ici une rénovation importante du tertiaire à hauteur de 3% du parc par an, soit l'ensemble des bâtiments publics d'ici 2050.

Le Tableau 0-1 montre aussi la part de logement considérés comme des « passoires énergétiques », soit des logements dont l'isolation thermique est très faible. Au final, une part non négligeable de bâtiments datant d'avant 1948 (26% des maisons individuelles et 38% des logements collectifs), sont considérés comme des passoires énergétiques et sont principalement composés de matériaux naturels peu transformés (pierre, terre, bois) et souvent sensibles à l'eau. La rénovation de ce type de bâtiment doit se faire avec une attention particulière. Ces bâtiments sont souvent sujets à des problèmes de remontées capillaires. Les matériaux conventionnels et peu perspirants et/ou trop rigide, ne sont pas adaptés et sont responsables de pathologies lorsqu'ils sont associés à des matériaux naturels [20–22]. Les matériaux de types terre, chaux ou bio-sourcés permettent des transferts d'eau liquide ou de vapeur à travers l'ensemble de la paroi, peuvent évacuer le surplus d'eau et ainsi éviter un endommagement de la paroi. Ils sont donc particulièrement compatibles avec les matériaux de l'architecture vernaculaire. Il existe un réel besoin de développement d'isolants de ce type.

En 2007, la part d'impact généré par la fabrication des matériaux était faible au regard de l'impact de la vie de service du bâtiment. Aujourd'hui, avec les réglementations existantes sur le neuf et la rénovation, cette tendance va tendre à s'inverser [23].

Une nouvelle réglementation est prévue à l'horizon 2020 [24]. Tous les bâtiments neufs devront être à énergie positive, soit produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Cette réglementation mettrait l'accent sur l'efficacité énergétique du bâtiment, gage d'une optimisation de sa phase d'utilisation. Aucune exigence n'amènerait la construction vers une démarche incluant la construction et la déconstruction. De plus, la production d'énergie nécessite en amont la fabrication des moyens de production (panneaux photovoltaïques, éoliennes, stockage d'énergie...), aujourd'hui non neutre en impact environnemental [23] et augmentant le degré de complexité.

Ayant été alerté de cette problématique, et suite aux accords de Paris lors de la COP 21, l'État français a lancé un label volontaire : le label Énergie + Carbone -, ou E+C-. Piloté par le Conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique (CSCEE) et lancée pour 2 ans, cette expérimentation doit permettre de préparer l'arrivée de la nouvelle RT2020 (rebaptisée RE2020) en testant la faisabilité d'une telle démarche [14].

En 2017, le marché des isolants était composé de 50% de laines minérales, 40% de mousses alvéolaires, et seulement 7% d'isolants considérés comme bio-sourcés [25]. La fabrication des mousses alvéolaires pour l'isolation est à l'origine de l'émission de gaz fluorés et chlorés dont l'impact sur le réchauffement climatique est très important [26].

Parmi les matériaux bio-sourcés figurent des composites. La matière végétale peut être liée avec des liants à prise chimique : c'est le cas du chaux-chanvre. Ce composite est en grande partie composé de matière végétale (chanvre), qui capte et stocke du CO₂ durant sa croissance. Cependant, ce matériau utilise la chaux, produit relativement impactant, notamment à cause de la température des fours nécessaire à la cuisson du calcaire [26]. De plus, les cuissons à hautes températures émettent des composés dangereux, comme le SO₂ et le NO_x [6]. Ces deux substances chimiques sont responsables d'une augmentation du dérèglement climatique et de l'acidification des eaux douces [6]. L'utilisation de ces fours de cuisson figure aussi parmi les premiers émetteurs de particules fines (PM_{2.5}) [6], responsables de maladies cardio-vasculaires, altération des fonctions pulmonaires et cancer du poumon. Ici, utiliser un autre liant, comme la terre crue, permettrait déjà d'éviter ces émissions de composés dangereux, et selon des études, cela permettrait aussi de diviser par 5 l'impact carbone de l'isolant [27] et par 20 son énergie grise [28]. En effet, les matériaux bio-sourcés peuvent compenser les émissions liées à leur production (culture, transport puis transformation) par le dioxyde de carbone capté durant leur croissance [26].

Parmi les impacts dus à la fabrication des matériaux figurent l'énergie dépensée et l'impact environnemental généré pour le transport de ces matériaux [29]. Ces transports se faisant aujourd'hui majoritairement grâce à l'utilisation du pétrole, ils génèrent une part importante de pollutions liées à une construction [26,29]. Le caractère local d'un matériau de construction est donc primordial lorsque l'on souhaite construire durablement.

Le caractère local d'un matériau est défini par la distance entre le lieu d'extraction et/ou de transformation et le lieu de construction. La notion de « locale » peut donc être très variable, mais il paraît raisonnable pour le domaine de la construction en terre allégée de prendre une distance limite aux alentours de 100 km. Dans cette zone, les matériaux disponibles pour construire peuvent varier d'une zone géographique à l'autre.

Une étude de J.C Morel [29], prenant comme exemple la construction d'une maison individuelle en maçonnerie de pierres, compare l'influence de l'utilisation de différents matériaux sur l'impact environnemental de la construction. La mise en œuvre d'un matériau local permettrait de réduire de 215% la consommation d'énergie à la construction et de 453% l'impact lié au transport.

En fin de vie, la filière de recyclage des laines minérales n'étant pas très développée en France [30], ces matériaux finissent la plupart du temps enfouis en décharges [30]. Pour les composites bio-sourcés dont le liant est synthétique ou à prise chimique, la présence de ces liants complexifie le traitement en fin de vie [26]. Si le liant n'est pas séparable du reste, le matériau aura un traitement similaire aux laines minérales. Les laines végétales produite industriellement (à base de lin, bois, chanvre) sont liées par des fibres polymères synthétiques. Sans processus dédié permettant de séparer ces matières synthétiques, ils seront incinérés avec récupération d'énergie ou mis en décharge [26].

Pour les matériaux biosourcés, si ceux-ci sont utilisés en vrac ou liés avec de la terre ou d'autres matières biosourcées, ils peuvent alors être compostés [26]. Le compostage puis l'épandage en champ est une des meilleures solutions pour relarguer lentement le carbone stocké dans la matière végétale, et ainsi le rendre bio disponible: entre 35 et 65% du carbone est stocké lors du compostage, le reste étant réémis dans l'air, puis après épandage 0.1 à 0.8% de ce carbone stocké est réémis par an [26].

Les choix de matériaux et de techniques constructives sont directement liés aux conditions de travail des artisans et travailleurs du bâtiment, mais aussi à un nombre d'emplois nécessaire. Les techniques fortement industrialisées sont par définition fortement mécanisées, nécessitent un nombre faible de travailleurs, peu considérés pour leur savoir-faire. L. Floissac étudie l'impact social de matériaux locaux en développant un indicateur d'« intensité sociale » de différents matériaux. Cet indicateur est calculé en rapportant la durée du travail humain sur l'énergie grise [31]. Au final, le moins impactant d'un point de vue environnemental permet aussi d'atteindre un optimum social (Figure 0-2).

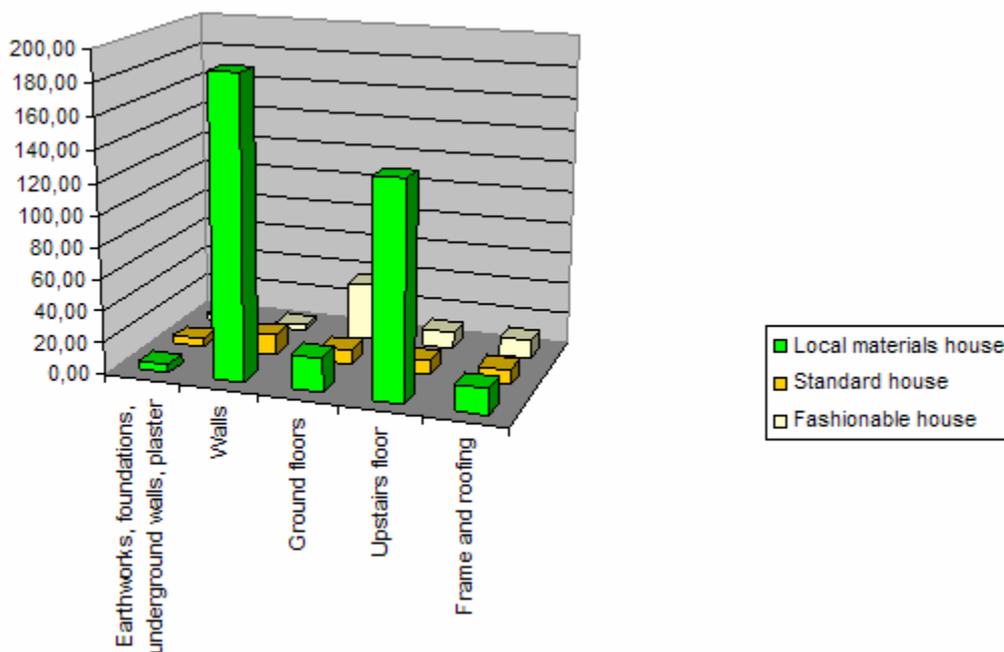


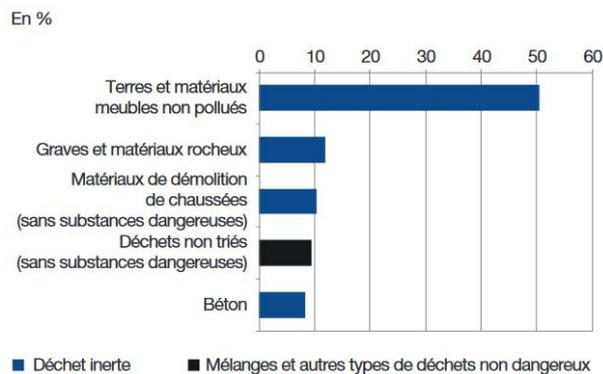
Figure 0-2 : Comparaison de l'influence de 3 méthodes constructives sur l'intensité sociale [31]

En effet, l'utilisation directe d'un matériau peu ou pas transformé nécessite un savoir-faire particulier lié à ce matériau. À travers le développement de matériaux locaux nécessitant un savoir-faire élevé, il est alors possible de créer des emplois non délocalisable et participant à la résilience d'un territoire et au maintien d'un patrimoine architectural.

Les publications de J.C Morel et L. Floissac se rejoignent sur un point. L'utilisation de ces matériaux dans les pays développés peut être entravé par deux verrous : le manque de savoir-faire et le manque de réglementation appropriées.

D'un point de vue économique, le développement de filières courtes de distribution de ces matériaux n'est pas évidente. Un matériau peu ou pas transformé a peu de valeur commerciale. Son transport, amenant un coût, est une limite directe. C'est notamment le cas de la terre, ayant une masse volumique élevée (environ 1500 kg/m³ pour une terre en vrac). À partir d'une certaine distance, le rapport coût du transport sur prix de la construction devient trop élevé. Cette variable de distance est dépendante du modèle économique choisi par les entreprises de vente de matériaux et de mise en œuvre.

Pour finir, le secteur du bâtiment, construction et déconstruction comprises, est aujourd'hui responsable d'une production de 33% des déchets en Europe et 40% en France [15,31]. La Figure 0-3 présente les 5 principaux types de déchets produits par le secteur du bâtiment. On constate que les premières sources de déchets sont les terres. Ces déchets peuvent néanmoins avoir un impact négatif sur l'environnement [32–34] et il est de plus en plus difficile de trouver de l'espace pour les enfouir ou les réutiliser [34,35]. Le gouvernement favorise actuellement le recyclage des déchets [32,34,35], l'économie circulaire [32] et encourage les acteurs du bâtiment à trouver un marché pour ces déchets. Dans ce contexte, le réemploi des terres pour la construction est pertinent. Et utiliser un matériau recyclable à l'infini (réversible) tel que la terre crue, pour lier des particules végétales, paraît être une solution appropriée pour créer un isolant répondant aux problématiques actuelles du bâtiment.



Source : Sdes, EDD 2014

Figure 0-3: Principaux types de déchets du bâtiment [36]

Mais utiliser ces terres pour la construction, c'est devoir composer avec leur variabilité. La terre varie selon de nombreux paramètres, comme le climat, la roche-mère, la profondeur et la topographie [36]. De l'autre côté et de la même façon, les granulats bio-sourcés, issus de transformation de plantes, varient selon les conditions climatiques locales, l'espèce et le mode de culture [37]. Du point de vue artisan, cette variabilité ne pose pas de problème particulier, et l'histoire de ces matériaux le montre bien.

DE LA TERRE À LA TERRE ALLÉGÉE

La terre est un des matériaux de constructions les plus anciens. On retrouve des traces d'adobes – maçonnerie de briques de terre crue – dans ce qui serait probablement la plus vieille ville de l'humanité : Jericho, dont les bâtiments les plus anciens datent du néolithique, aux alentours de -9000 avant J.C. Les exemples historiques de constructions en terre crue sont ensuite présents sur tous les continents [38] : De l'Égypte avec l'Oumm el Qaab, à la Chine avec une partie de sa Grande Muraille mais aussi ses habitats fortifiés circulaires (Chuxi tulou), en passant par l'Irak avec le Ziggurat d'Ur, sans citer les sites plus connus que sont la Mosquée de Djenné au Mali et la ville de Shibam au Yémen [39].



Figure 0-4: De gauche à droite et de haut en bas: détail de la partie en terre de la muraille de Chine; habitats Chuxi Tulou; Ziggurat d'Ur; mosquée de Djenné en rénovation [40–42].

Les systèmes constructifs retrouvés dans ces bâtiments sont principalement les adobes et le pisé (mur monolithique de terre compactée entre banche). Mais d'autres systèmes constructifs sont présents historiquement et plus récemment en Europe. La bauge, mur monolithique de terre armée de fibre disposé à l'état plastique, est particulièrement présent dans le Sud de l'Angleterre, dans le bassin Rennais et en Normandie. C'est dans cette même région que l'on retrouve particulièrement le torchis, où la terre armée de fibres sert de remplissage entre montants de bois.



Figure 0-5: De gauche à droite et de haut en bas: chantier de bauge en Angleterre (2011); habitat vernaculaire de la manche en bauge; bâtiments pans de bois et torchis à Rouen [43–45].

Dans l'ensemble des systèmes constructifs évoqués, il n'y a pas d'isolation. Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, le système de chauffage de ces habitats était généralement concentré dans une seule pièce. La notion de confort était alors bien différente d'aujourd'hui. C'est seulement à la fin du XX^{ème} siècle que la stratégie de gestion de la température dans l'habitat évolue, avec la nécessité d'isoler les bâtiments [46]. Les isolants sont donc des produits relativement récents, permettant de répondre à un besoin de confort thermique dans l'ensemble de l'habitat.

L'apparition des premiers isolants, à base de matériaux locaux peu transformés et simples de mise en œuvre, semble liée à la guerre. C'est en Allemagne que l'on retrouve la plus ancienne construction en terre allégée (terre paille), datant de la sortie de la 1^{ère} guerre mondiale [47]. Elle se différencie du torchis par une proportion bien plus importante de fibres, la terre venant simplement lier les fibres entre-elles. Cette technique est légalisée en Allemagne en 1944 puis fait l'objet d'une norme en 1951 [48]. L'Allemagne d'après-guerre avait peu accès au pétrole, et cette technique permettait alors la reconstruction malgré les restrictions des pays occidentaux.

C'est seulement dans les années 70, avec la prise de conscience écologique due à la première crise énergétique, que l'intérêt pour ces systèmes constructifs peu énergivores réapparaît. La première édition du livre « Construire en terre allégée » de F.Volhard [49] est publié en 1983. Quelques années plus tard, le terre-paille et les autres techniques de construction en terre sont de nouveau reconnus officiellement en Allemagne. En France, ces techniques recommencent à être utilisées à la même époque, mais ne sont pas reconnues jusqu'à récemment, avec la publication des Guides de Bonnes Pratiques de Construction en Terre Crue [50].

Toujours en France, le premier « béton bio-sourcé », mélange de chanvre et de chaux, apparaît en 1986 [51], sous le nom de « béton de chanvre ». La même année est créée l'association Construire En Chanvre, œuvrant

pour la mise en place d'un cadre normatif et réglementaire pour permettre aux professionnels d'assurer leur construction. En parallèle les recherches sur les isolants bio-sourcés démarrant aussi dans les années 70, la production scientifique augmentent progressivement jusqu'à aujourd'hui, où le chanvre est particulièrement étudié et le chanvre en général est le matériau issu de la biomasse le plus étudié parmi les isolants [52].

Le terre-chanvre, c'est donc premièrement un mélange de terre et d'eau (Figure 0-6), appelé barbotine, qui est ensuite mélangé aux chènevottes (partie interne de la tige de chanvre - Figure 0-6).



Figure 0-6: À gauche, fabrication de barbotine; à droite, chènevotte

Différentes méthodes de mise en œuvre du terre-chanvre existent aujourd'hui. La Figure 0-7 présente deux exemples de chantier de terre-chanvre avant finitions. Tout comme le chanvre, le terre-chanvre peut :

- Être mélangé au moyen d'une bétonnière puis placé et compacté manuellement entre deux parois ;
- Être préfabriqué sous forme de briques puis maçonné à l'aide d'un mortier de terre ;
- Être projeté mécaniquement à l'aide d'une projeteuse.



Figure 0-7: Exemple de chantier de terre chanvre. Gauche, banchage ; droite, projection. (Crédits_ A. Hellouin de menibus)

PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

Comme nous venons de le voir, le bâtiment est un des secteurs économiques qui a le plus fort impact environnemental, tant à travers la phase de construction, que durant l'utilisation et la déconstruction. Ceci fait de ce secteur un des acteurs clé dans la lutte contre le réchauffement climatique et contre la raréfaction des ressources. Parmi les enjeux de la construction durable contemporaine, le développement d'isolants doit permettre :

- La rénovation thermique du bâti ancien par des matériaux qui ne perturbent pas le fonctionnement hygrothermique de ses parois ;
- Le stockage de carbone dans des matériaux, afin de viser des constructions régénératives (à impact positif) ;
- L'utilisation de matériaux locaux, diminuant l'impact du transport, favorisant le développement de filières et de savoir-faire locaux ;
- Le choix de techniques constructives moins complexes, utilisant des matériaux dont la gestion de fin de vie est simple (compostage ou réutilisation).

La terre allégée se présente comme une solution permettant de répondre à l'ensemble de ces enjeux. Développée à grande échelle, cette technique d'isolation pourrait jouer un rôle essentiel dans la réduction drastique d'impacts environnementaux du secteur du bâtiment. Cependant, la terre allégée ne figure pas parmi les techniques constructives courantes [53,54]. Étant un matériau innovant, les retours d'expériences de chantiers récents sont encore peu nombreux. Le développement à grande échelle de matériaux de construction nécessite d'une part un travail auprès des acteurs de la construction (assureurs, bureaux d'études, architectes, gouvernement), de manière à ce que le matériau développé s'adapte aux réglementations à venir pour les bâtiments neufs (E+C-) comme pour la rénovation (RE-2020). D'autre part, cela nécessite un travail scientifique de compréhension permettant d'assurer les performances de ce matériau en tant qu'isolant.

Or, lorsque l'on souhaite utiliser les matériaux disponibles localement, la variabilité naturelle des terres et des granulats végétaux ne permet pas de prédire directement un niveau de performance indépendamment des natures de matériaux et des formulations utilisées. De plus, peu de données existent sur l'impact de la variabilité des constituants sur les performances des mélanges chaux-chanvre, et aucune sur la terre allégée. Ce manque de données favorise une forte normalisation des constituants, seule méthode actuelle permettant de s'assurer de rester dans la gamme des matériaux standardisés, ce qui limite l'accès des nouvelles filières locales de production d'éco-matériaux au marché.

L'objectif de ce travail de thèse vise donc premièrement à obtenir des connaissances scientifiques permettant de comprendre les liens entre la variabilité des constituants et les performances du matériau isolant. Cela nécessite dans un premier temps de caractériser la variabilité des matériaux constitutifs. De manière à cadrer l'évaluation de ces variabilités, la thèse se limite à l'utilisation de chènevotte de chanvre comme granulats végétaux. Dans un second temps, il s'agit de choisir des matériaux représentatifs de cette variabilité, pour ensuite réaliser des mélanges permettant d'étudier l'impact des différents paramètres de variabilité sur les performances de l'isolant. Dans une démarche où l'on considère les parois comme élément participant au confort hygrique et thermique du bâtiment, nous chercherons à caractériser le comportement hygrothermique du terre-chanvre. Enfin, ce matériau n'occupe pas de fonction structurelle, il doit néanmoins être autoporteur et supporter un enduit de protection, nous chercherons donc aussi à caractériser son comportement mécanique.

LE PROJET DE RECHERCHE ECO-TERRA, CADRE DE LA THÈSE

La thèse est réalisée dans le cadre du projet ECO-TERRA, pour Ecomatériaux en TERRE Allégée. Il est notamment financé par l'Ademe dans le cadre de l'appel à projet GRAINE. La Figure 0-10 présente les différents acteurs de ce projet. La Société Coopérative d'Intérêt Collectif (SCIC) Eco-Pertica, avec la participation d'Arthur Hellouin de Ménibus, pilote le projet, fournit les matériaux avec l'association des Chanvriers en Circuits Courts pour le chanvre. Eco-Pertica amène notamment des connaissances de terrain, à travers ses interactions avec les artisans mettant en œuvre du terre-chanvre. La SCIC a notamment développé une expertise sur la mise en œuvre de terre-chanvre par projection. L'IFSTTAR, à travers la participation de Erwan Hamard, participe à la caractérisation des terres et à la compréhension de son influence sur les performances du composite. UniLasalle, avec la participation d'Hélène Lenormand, permet la caractérisation et l'analyse des granulats végétaux. Enfin, la thèse est réalisée au laboratoire IRDL, au sein duquel sont présents les appareils et expertises nécessaires à la caractérisation hygrothermique (avec Thibaut Colinart) et mécanique (avec Thibaut Lecompte) du matériau.

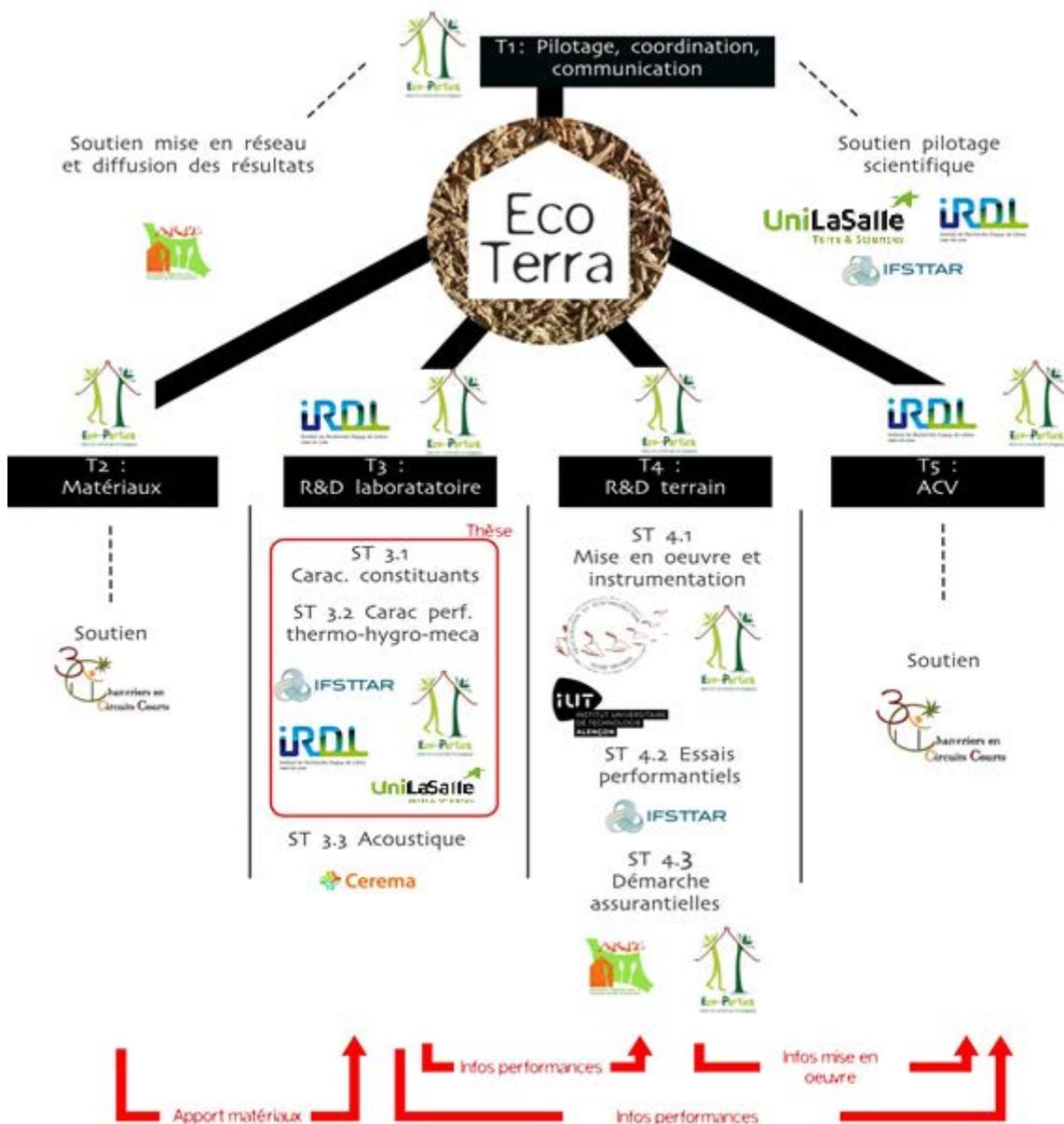


Figure 0-10: Acteurs du projet ECO-TERRA.

PLAN DE LA THÈSE

Le premier chapitre s'attachera à présenter la composition d'une barbotine, en décrivant particulièrement quels sont les paramètres de variabilité. Une discussion sur les méthodes de caractérisation de ces paramètres sera exposée. Ensuite, la stratégie de collecte de matériaux est développée. En effet, 28 terres ont été collectées à travers la Bretagne et la Normandie. Puis les résultats de caractérisation sont exprimés et analysés. Ces résultats sont présentés dans un but de choisir 6 barbotines, utilisées dans la suite de l'étude et représentatives des plages de variabilité de l'ensemble des terres collectées.

Le second chapitre dessinera brièvement un historique de l'utilisation du chanvre, conjointement avec des généralités sur la plante. Les méthodes de caractérisations sont ensuite présentées avant de comparer les résultats avec d'autres chanvres présents dans la littérature, de manière à estimer la plage de variabilité couverte.

Le troisième chapitre présentera les différentes méthodes de fabrications d'échantillons. Une attention est portée sur la représentativité de ces échantillons. Le cadre de l'étude est présenté conjointement avec les différentes formulations, de manière à visualiser le plan d'expérience de la thèse. Des résultats de premières caractérisations physiques des différentes formulations réalisées sont aussi présentés.

Le quatrième chapitre présente à la fois une étude du comportement rhéologique des barbotines et une comparaison de différentes méthodes d'étude de ce comportement sur chantier. Un état de l'art permet de reprendre les principaux éléments théoriques nécessaires à l'étude de la rhéologie d'une suspension de terre, ainsi que les différents paramètres pouvant affecter son comportement. Une partie de ce chapitre s'attache à la mesure précise, en laboratoire et à l'aide d'un rhéomètre, du seuil de cisaillement des barbotines. Un premier pas vers la modélisation de ce comportement est présenté. Puis les différents types d'essais permettant de mesurer ce seuil en conditions de chantier sont détaillés et leurs résultats sont comparés.

Le cinquième chapitre concerne l'étude des performances hygrothermiques du terre-chanvre. Les méthodes de caractérisation de ces performances sont présentées. Nous étudierons les capacités de stockage et de transfert thermique et hydrique. Une attention particulière est portée sur l'influence des protocoles de mesure sur les résultats. Cette influence est comparée à l'influence de la variabilité des matériaux constitutifs.

Pour finir, le chapitre six porte sur le comportement mécanique de ce matériau. Un état de l'art permettra de visualiser les connaissances existantes sur les matériaux semblables. Les différentes méthodes de caractérisation de chaque type d'échantillon sont présentées, suivi des différentes méthodes d'analyse des résultats. Une fois le comportement mécanique général du matériau exprimé, une analyse de l'influence de la géométrie des échantillons et des méthodes d'acquisition est donnée. Enfin, différents paramètres d'influence sur ce comportement sont étudiés, ainsi qu'une caractérisation de son anisotropie.

1 CHAPITRE 1 : CARACTÉRISATION DES TERRES BRUTES POUR LA FABRICATION DE BARBOTINES

1.1 QU'EST-CE QUE LA TERRE ?

La barbotine est un mélange de terre brute et d'eau à l'état liquide. Ce premier chapitre vise à premièrement faire un état de l'art de ce qu'est une terre, et par extension une barbotine, puis d'en tirer les connaissances nécessaires à la compréhension de son rôle de liant dans notre composite terre-chanvre. Deuxièmement, la terre brute prélevée localement est sujette à une importante variabilité. Les définitions à suivre permettent aussi de rendre compte de cette variabilité, afin de mieux comprendre son influence sur le terre-chanvre par la suite.

1.1.1 DÉFINITIONS GÉNÉRALES

Le mot « sol » désigne différents éléments en fonction du domaine d'étude. En pédologie, le sol correspond aux premières couches vivantes, contenant une quantité importante de matière organique. Puis se succèdent des couches de roches altérées avant d'atteindre la roche non altérée. La pédologie s'attache à étudier la pédogénèse, soit la formation et l'évolution des sols, notamment dues au phénomène d'altération des roches. Il y est question d'analyser « les propriétés d'un sol comme le produit d'une interaction complexe entre roche, relief, climat, biocénoses, temps et Homme » [36]. Considérer ces paramètres de formation des terres peut notamment permettre d'appréhender l'origine de leur variabilité. Mais dans cette étude, l'attention sera plus portée sur le constat de cette variabilité et son influence sur les performances d'un matériau de construction.

En géotechnique, est considéré sol toutes les couches au-dessus de la roche dure non altérée. La géotechnique étudie le sol comme élément porteur pour l'implantation de bâtiments et le définit comme un ensemble de matériaux, liés ou non, existant naturellement et couvrant les cents premiers mètres de la croûte terrestre [55].

Une synthèse de ces différents éléments est présentée en Figure 1-1, selon le résumé réalisé dans la thèse de E. Hamard [56]. L'auteur décrit notamment le fait que les terres traditionnellement employées en construction sont issues, selon les définitions pédologiques, de matériaux de différentes natures [57–59]. Dans la présente thèse, le mot « sol » sera utilisé pour indiquer une ressource en place, tandis que le mot « terre » sera utilisé pour qualifier une ressource extraite, dans l'objectif de construire.

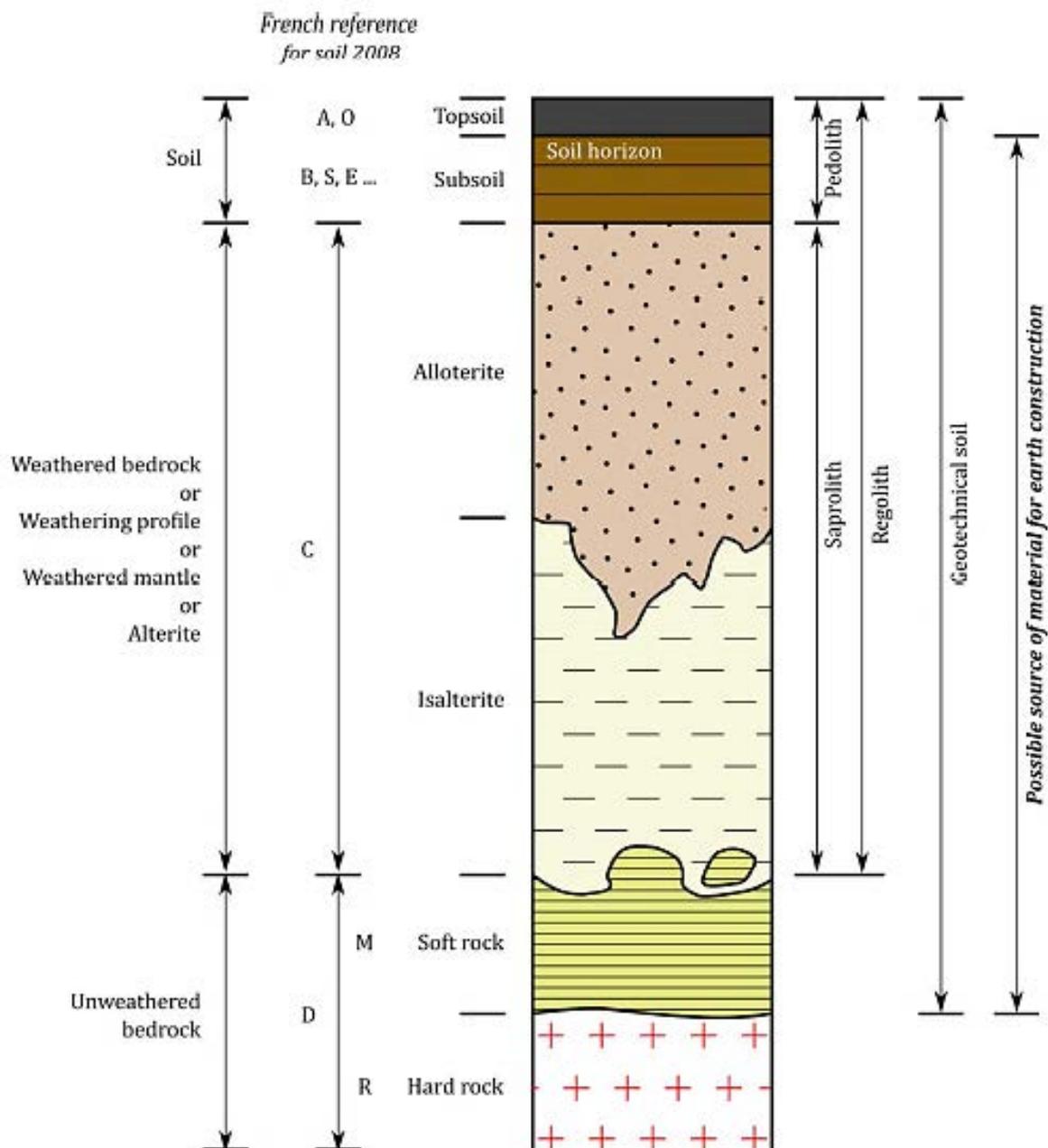


Figure 1-1 : Vue en coupe verticale de matériaux altérés depuis la surface jusqu'à la roche non altérée, selon les définitions de différentes disciplines [60]

Le domaine d'études scientifiques spécifique à la construction en terre crue est relativement récent au regards des publications scientifiques [61]. En dehors de certaines démarches originales et pluridisciplinaires [56], les scientifiques travaillant dans ce domaine caractérisent la terre sous l'angle géotechnique. Une des particularités étant, à l'instar des artisans, de considérer convenable une terre exempte de matière organique [62]. Les artisans prélèvent la terre en prenant soin d'enlever les 20 à 30 premiers centimètres. Ceci permet d'éviter tout désordre lié à cette matière organique (moisissures, porosité non contrôlée et fragilisation du matériau) et ainsi pouvoir contrôler le matériau de construction.

Un sol non saturé est constitué de trois phases. Une phase liquide, l'eau, une phase gazeuse, l'air, et une phase solide, les particules de sol. Le diagramme à trois phases, présenté en Figure 1-2 au côté d'un schéma de structure de sol, est une représentation schématique souvent utilisée et permet de rapidement visualiser ce

concept. On y retrouve les paramètres inscrits dans le Tableau 1-1. Il est à noter que dans cette modélisation du sol, les volumes et les poids s'ajoutent. Aussi, ce concept s'avère un outil efficace pour étudier la structure d'une terre mise en œuvre en tant que matériau de construction.

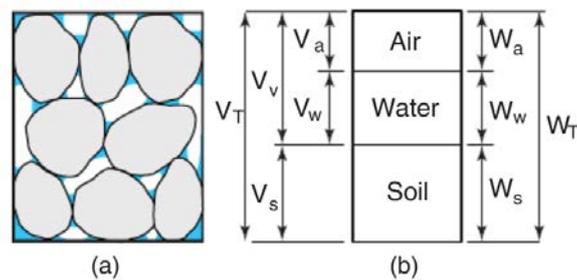


Figure 1-2: a) Représentation d'une structure de sol naturel. b) Diagramme trois phases.

Tableau 1-1: Nomenclature du diagramme trois phases.

V_a	Volume d'air	W_a	Poids de l'air = 0
V_w	Volume d'eau	W_w	Poids de l'eau
V_s	Volume de sol (solides)	W_s	Poids des solides
V_v	Volume des vides	W_T	Poids total
V_T	Volume total		

L'un des caractères de la terre les plus remarquable à l'œil nu est sa composition de plusieurs tailles de particules en différentes proportions, ou granulométrie. C'est une caractéristique majeure de l'observation de la variabilité des terres. Ces différentes particules sont ainsi définies par des limites dimensionnelles [55,63] :

Tableau 1-2: Définitions des différents composants de la terre, en fonction du domaine d'étude.

	GEOTECHNICS		PEDOLOGY		AGGREGATES STANDARDS		SOILS STANDARDS		FRENCH	
	Min. Size	Max. Size	Min. Size	Max. Size	Min. Size	Max. Size	Min. Size	Max. Size	Min. Size	Max. Size
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
CLAY	0	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0.002
SILT	0.002	0.075	0.002	0.05	0.002	0.063	0.002	0.063	0.002	0.08
SAND	0.075	2	0.05	2	0.063	2	0.08	2	0.08	2
GRAVEL	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-

1.1.2 DÉFINITION D'UNE ARGILE

Les définitions générales permettent de visualiser les principales caractéristiques d'un sol. La granulométrie et la structure d'une terre mise en œuvre influencent son comportement mécanique et hygrothermique [64–68]. Il est capital de porter une attention particulière aux argiles, particules les plus complexes composant nos terres.

Les argiles sont de la famille des phyllosilicates, du grec « phullon » = feuille et du latin « silis » = silex. En effet, la plupart des argiles se présentent sous la forme de feuillets : leur épaisseur est très faible au regard des deux autres dimensions. La Figure 1-3 présente des exemples d'images au MEB (microscope à balayage électronique) de kaolinite et d'illite, présentant des morphologies de feuillets. Ces feuillets ont une structure chimique cristalline. On retrouve un faible nombre de familles, ou espèces, regroupant des types de structures. Mais les composants de ces structures peuvent varier fortement [69], et ainsi créer une grande diversité d'argiles. Cette diversité se comprend dans la microstructure des argiles.

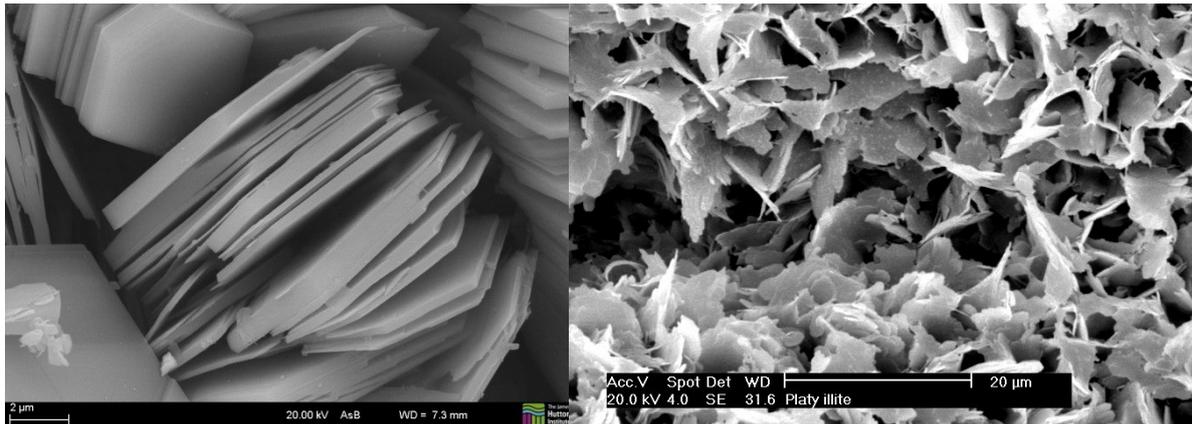


Figure 1-3: Kaolinite (gauche) et illite (droite), images réalisées au microscope à balayage électronique [17].

Partons de la plus petite échelle, celle du feuillet. Ce dernier est composé de différentes couches, composées d'anions et de cations liés par une force ionique. Les dimensions des feuillets varient entre 1.10^{-2} nm et 1 nm. On distingue deux types de couches, dont des exemples sont présentés en Figure 1-4 :

- Les couches tétraédriques principalement composées de cations Si ou Al liés à des anions O ;
- Les couches octaédriques peuvent être composées de cations Mg, Al ou Fe liés aussi à des anions O.

Ces différentes couches s'assemblent par liaison de leurs oxygènes libres, forment alors les différents types de feuillets :

- Les feuillets 1/1 ou T-O, dans lesquels une couche tétraédrique est liée à une couche octaédrique ;
- Les feuillets 2/1 ou T-O-T, dans lesquels une couche octaédrique est en « sandwich » entre deux couches tétraédriques ;
- Les feuillets 2/1/1 ou T-O-T + O, dans lesquels on retrouve, par rapport aux feuillets 2/1, une couche octaédrique supplémentaire dite « couche brucitique ».

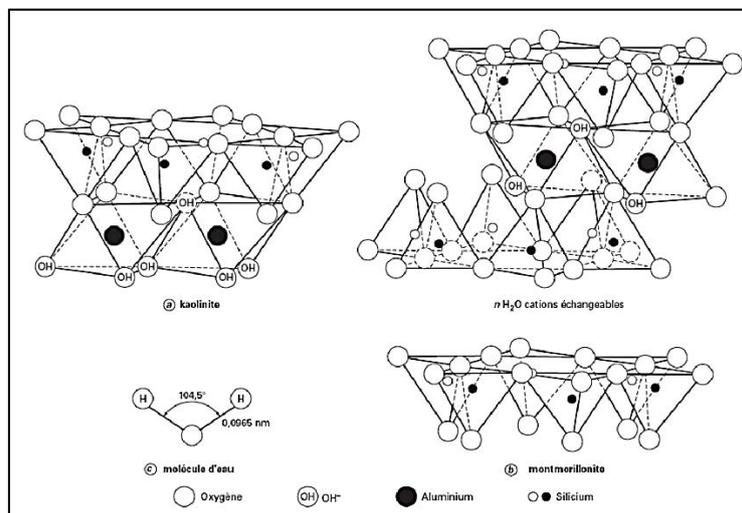


Figure 1-4: Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite [70]

Dans certains feuillets de types 2/1 et selon les espèces chimiques en présence, la neutralité électrique entre les couches n'est pas respectée. On retrouve alors une troisième couche, appelée « couche interfoliaire », dans laquelle sont présents des cations liés aux anions O^{2-} par des liaisons de type Van der Waals (énergétiquement plus faible que les liaisons covalentes). Ainsi, entre 1 et 3 couches de molécules d'eau peuvent se fixer aux feuillets par des liaisons hydrogènes (énergétiquement faible) selon deux critères : la nature des cations interfoliaires (Li^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ou Mg^{2+}) et la pression partielle d'eau (P/P_0). Aussi, en fonction du rayon des ions

présents dans la couche interfoliaire, les dimensions des couches varient entre 0.1 nm et 1 nm, créant ainsi une seconde zone de variabilités dans l'assemblage des couches. Il est important de noter que cette couche interfoliaire donne à certaines argiles des propriétés « gonflantes ». Cette propriété est donc déterminée par la capacité des cations des feuillets à se lier aux molécules polaires en présence, notamment l'eau.

Passons à l'échelle suivante, l'assemblage des feuillets, donnant une structure cristalline. Ici, on parle de polytypes lorsque le cristal est un assemblage de feuillets de même type. Lorsque le cristal est constitué de différents types de feuillets, c'est un interstratifié. La morphologie de ces cristaux varie ainsi en fonction du type d'assemblage et de sa composition. Ce sont des forces de Van der Waals qui sont à l'origine des liaisons inter-feuillet. Concernant leur taille, la plus grande dimension va varier d'un à quelques micromètres [71]. La Figure 1-5 présente des exemples de morphologie.

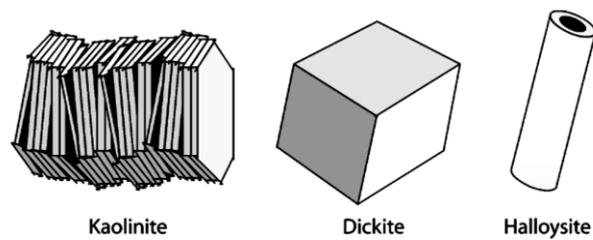


Figure 1-5: Exemple de morphologie des cristaux argileux [72]

Au final, à une argile va correspondre un type de feuillet, avec une composition chimique et une ou plusieurs morphologies possibles. Mais les minéraux argileux sont classés suivant seulement le type de feuillet et le type de couche octaédrique (taille de la maille : dioctaédrique ou trioctaédrique). Aussi, la structure cristalline et sa morphologie sont importantes puisqu'elles régissent le comportement physique du minéral [69,72–74], et donc en partie le comportement d'une terre. Ce sont ces morphologies qui sont observables au Microscope à Balayage Électronique (MEB). Ensuite, ces structures cristallines peuvent elles aussi s'assembler, et créer des agrégats. Les cristaux y sont reliés par des forces coulombiennes ou par des dépôts d'hydroxydes ou de matière organique. Cet assemblage peut notamment dépendre du pH [69]. La Figure 1-6 présente les différents types d'agrégats qu'il est possible de trouver, sachant que leur taille atteindra facilement quelques micromètres.

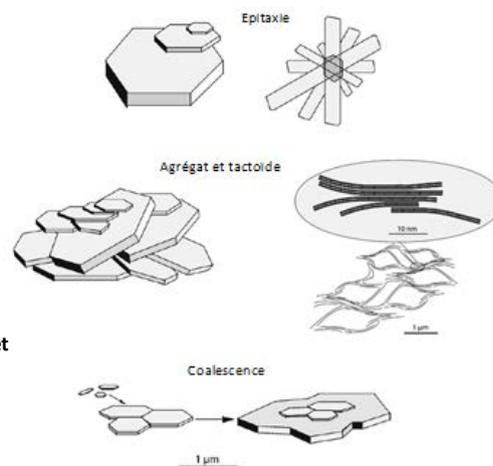


Figure 1-6: Principaux types de particules et d'agrégats des minéraux argileux [19].

Le Tableau 1-3 présente les minéraux argileux associés aux caractéristiques précédemment évoquées.

Tableau 1-3 : Principales natures d'argile selon leur structure cristallographique

Minéraux dioctaédrique		Minéraux trioctaédriques		Charge électrique du feuillet (C.m ⁻²)
Minéral	Sous familles	Minéral	Sous familles	
Feuillets 1/1				
Kaolinite	Kaolinite, dickite, nacrite, Halloysite	Serpentine	Amesite, berthiérine, chrysotile, antigorite, lizardite, cronstedtite, greenalite, ...	0
Feuillets 2/1				
Pyrophyllite		Talc		0
Smectite	Montmorillonite, beidellite, nontronite	Smectites	Saponite, stevensite, hectorite	0.2-0.6
Vermiculites		Vermiculites		0.6-0.9
Illite, Glauconite				0.9
Micas	Muscovite, phengite, paragonite, céladonite	Micas	Phlogopite, biotite, lépidolite	0
Micas durs	Margarite, clintonite			0
Feuillets 2/1/1				
Chlorites	Donbassite, cookeite, sudoite	Chlorites	Diabentite, penninite, chamosite, brunsvigite, clinochlore, thuringite, ripidolite, sheridanite	Variable
Feuillets 2/1 à structure fibreuse				
		Palygorskite		
		Sepiolite		

La variabilité des terres s'observe donc à différentes échelles, depuis la granulométrie d'une terre jusqu'à la structure cristalline de ses argiles. À l'échelle de ces argiles, différentes forces sont à l'œuvre. Henri Van Damme présente la terre crue comme un béton d'argiles [75]. En effet, pour le béton de ciment comme pour la terre, le matériau est composé d'un ensemble de différentes tailles de granulats dont une partie assure la cohésion. C'est cette cohésion qu'il s'agit de comprendre.

Les particules présentes dans la terre sont pour la plupart hydrophiles [75]. Elles forment des liaisons hydrogène avec l'eau. L'eau liée aux surfaces des particules aura donc tendance à s'étaler sur celles-ci. Parallèlement, les molécules d'eau forment aussi des liaisons hydrogènes entre elles, et sont donc liées. Ainsi se forme une membrane élastique à la frontière entre eau et air : c'est le phénomène de tension superficielle responsable de la capillarité. La Figure 1-7 présente une modélisation de ce phénomène, selon [76]. Cette tension est régie par deux paramètres : la forme géométrique du pont capillaire et la différence de pression entre l'air et l'eau. Le modèle de Laplace-Young [76] décrit ce phénomène de la manière suivante :

$$\frac{\Delta p}{\sigma} (1 + y'^2(x))^{3/2} + \frac{1 + y'^2(x)}{y(x)} - y''(x) = 0 \quad 1-1$$

Avec $\Delta p = p_{gaz} - p_{liquide}$ le différentiel de pression, σ la tension superficielle et x , y , y' et y'' les paramètres géométriques du pont capillaire. Au final, la force capillaire (F) engendrée par le pont liquide peut s'exprimer en fonction du rayon central du pont (gorge) selon la formule suivante [77]:

$$F_A = 2\pi y_0 \sigma + \pi y_0^2 \Delta p \quad 1-2$$

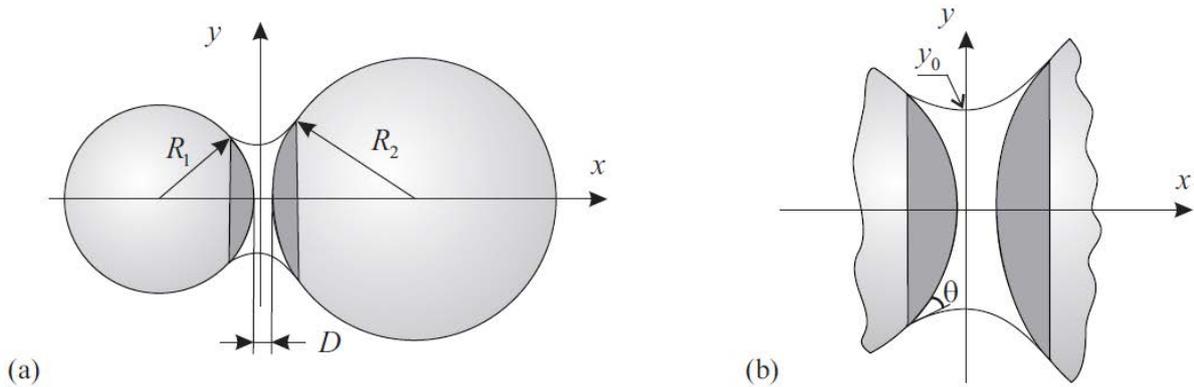


Figure 1-7: Configuration géométrique d'un doublet capillaire. a) Description générale ; b) Détails du pont capillaire [77].

Ce phénomène est dépendant de la rugosité des grains, affectant la quantité d'eau nécessaire à créer des ponts capillaires interparticulaires. Ce phénomène a été mis en évidence par Hasley en 1998 [78] (Figure 1-8). L'auteur montre que la formation des ponts se fait en trois étapes qui dépendent de la teneur en eau de la terre : I) régime d'aspérité, II) régime de rugosité, III) régime sphérique.

Pour un volume de terre donnée, la force capillaire développée dans l'ensemble va dépendre du nombre de ponts capillaires, et donc du nombre de grains. Ainsi, on peut ajouter qu'il y a un lien fort entre capillarité et granulométrie : pour un même volume de terre, plus les particules sont petites, plus les ponts capillaires sont nombreux.

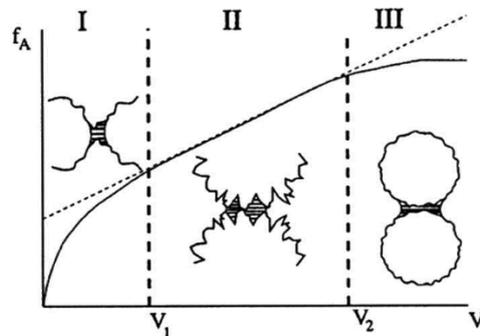


Figure 1-8 : Évolution de la force de cohésion capillaire (F_A) entre deux sphères rugueuses, en fonction du volume de liquide dans la contact. I : régime d'aspérité, II : régime de rugosité, III : régime sphérique [70].

Les argiles sont, en fonction des types de minéraux argileux, plus ou moins chargées électriquement. Ces charges sont négatives sur les grandes surfaces des feuillets (Figure 1-9). Elles attirent donc des cations, naturellement présents dans l'eau. Si l'on fait le bilan des interactions électrostatiques, le résultat est toujours un phénomène d'attraction. A ces interactions s'oppose la pression osmotique issue de l'agitation des ions [75].

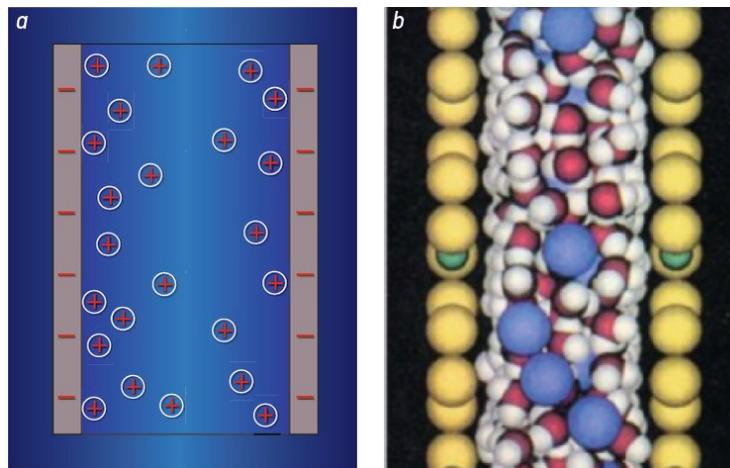


Figure 1-9: Structure ionique d'un assemblage de feuillet d'argile. Schéma simplifié d'alternance entre couche négative des surfaces minérales et couche positive des cations en solution [75].

Le comportement mécanique et rhéologique d'une terre contenant de l'argile est donc en grande partie régi par la surface spécifique déployée par ces argiles (sommées des surfaces de tous les sites échangeables accessibles à un ion ou à une molécule donnée) et par la charge électrique de ces surfaces. Mais ces comportements mécaniques et rhéologiques dépendent de la distance interparticules [69,71,77]. Ces deux paramètres de surface spécifique et de charge électrique sont regroupés sous l'appellation « argilosité ». Elle est considérée élevée si, pour une terre donnée, le nombre de sites échangeables accessibles est important et la charge électrique des surfaces est élevée.

Dans cette interaction entre l'eau et les particules de terre, l'eau joue un rôle clé dans la capacité des particules à se lier entre elles. Beckett [79] indique qu'il est possible de quantifier cette capacité à lier, par un « degré d'attachement », de l'eau sur la phase solide de la terre : c'est la succion. Une pression négative représente alors une combinaison de ces phénomènes : capillarité, adsorption et pression osmotique. C'est un élément essentiel, qui permet de synthétiser les éléments évoqués pour comprendre pourquoi la terre est un matériau cohésif utilisé depuis le néolithique pour construire.

Bui et al. [80] utilisent, pour le pisé, la définition de Hasley pour décrire l'évolution de la succion capillaire avec l'augmentation de la teneur en eau. Un pisé séché naturellement semble atteindre un seuil correspondant à la plus grande capacité des forces capillaires, en équilibre avec la pression atmosphérique. Un échantillon de terre devrait arrêter de sécher lorsque l'humidité de l'air dans ses pores est égale à l'humidité de l'air environnant. Ce seuil, pour le pisé, se situe entre 2% et 4% de teneur en eau, et dans cet état « Le ménisque n'est plus sensible à la rugosité et les forces cohésives sont indépendantes de la teneur en eau, comme entre deux sphères » [80]. Au-dessus de 4%, les ménisques commencent à fusionner et les forces capillaires décroissent. Au final, la succion dépend de la teneur en eau et affecte le comportement mécanique d'un matériau terre.

1.2 CHOIX DES MÉTHODES D'ANALYSES

Il n'existe pas de norme dédiée décrivant la caractérisation de terres pour la construction. En revanche, il en existe de nombreuses dans le domaine géotechnique. Ainsi, à travers la comparaison et le choix de méthodes de caractérisation se trouve un enjeu important de cette étude : être capable d'évaluer la variabilité des terres de construction. Autrement dit, les éventuelles erreurs dues aux protocoles de mesures ne doivent pas être limitantes dans la différenciation de terres à l'étude.

Les caractéristiques principales à évaluer sont la granulométrie, les types d'argiles et leur activité. Pour être à même d'utiliser le diagramme trois phases (Figure 1-2), la masse volumique particulaire de la terre est nécessaire. Enfin, pour évaluer le comportement de la terre en présence d'eau, il est intéressant d'étudier sa rhéologie, sa sorption et sa succion. Pour ces différents paramètres, les essais présents dans la littérature seront présentés et comparés, en se basant principalement sur les normes françaises et internationales. On trouve dans ces normes des documents de références, pour la géotechnique, concernant la reconnaissance et la caractérisation en laboratoire de sol. Dans chacun des essais ainsi décrit, un choix de méthode sera établi pour présenter les résultats de caractérisation. Les possibles comparaisons de résultats entre méthodes sont présentés en annexe n°1.1.

1.2.1 MÉTHODE GÉNÉRALE DE RECONNAISSANCE DES TERRES

Les normes XP P94-011, NF EN ISO 14688-1 et NF EN ISO 14688-2 sont des documents qui regroupent les différents essais à réaliser pour caractériser une terre. Ils font principalement référence aux autres normes avec la particularité d'ajouter des dénominations en fonction des caractéristiques établies par les essais.

1.2.2 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Les éléments grossiers (>80µm) sont premièrement tamisés par voie sèche ou humide. L'analyse d'une terre contenant des argiles est préférable par voie humide afin d'assurer la séparation des particules. Les différentes normes indiquent alors de laver le matériau à l'eau sur un tamis de 80µm. On retrouve alors une seule méthode pour l'analyse du refus : le tamisage. Concernant l'analyse du passant à 80µm, trois différentes méthodes sont proposées.

La norme NF P94-057 décrit l'utilisation de la sédimentométrie par méthode gravimétrique. Le sol est mis en suspension dans une solution d'eau ajoutée de défloculant (hexamétaphosphate de sodium). Puis est utilisé un densimètre placé à la surface de la solution. Cette méthode est basée sur le calcul de la vitesse de chute des particules. La densité en surface d'une solution de sol à différents temps est mise en lien avec un volume de particules d'une certaine taille. Les deux hypothèses sont les suivantes :

- Le calcul de vitesse de chute fait l'hypothèse de particules sphériques. Or, ce n'est pas le cas des argiles.
- Le rapport entre fraction volumique et fraction massique des différentes tailles de particules se fait par l'intermédiaire d'une masse volumique moyenne. Les différents minéraux argileux, de par leur structure et leur composition chimique, ont des masses volumiques variables. En connaissant la formule chimique d'une maille unitaire d'un feuillet d'argile, on peut calculer sa masse molaire, son volume, et donc sa masse volumique, selon la formule suivante : $\rho = \frac{\text{Masse molaire}}{\text{Volume de la maille} \times N_a}$. Nous avons donc, par exemple, $\rho_{\text{kaolinite}}=2599 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\rho_{\text{pyrophyllite}}=2772 \text{ kg.m}^{-3}$ [69]. Ces dernières sont aussi différentes de celle du limon, qui, s'il est principalement composé de quartz, à une masse volumique de 2650 kg.m⁻³.

La norme ISO 17892-4 présente une autre méthode, celle de la pipette. De la même façon, le sol est placé dans une solution défloculante, dans une éprouvette graduée. Il s'agit ensuite de prélever, à certains intervalles de temps et à certaines profondeurs, une masse de suspension de sol. Cette méthode utilise le même principe que celui utilisé pour une mesure au densimètre, la vitesse de chute des particules. On retrouve ici les mêmes limites dues aux hypothèses de départ. Seulement, le prélèvement à la pipette peut être automatisé. Ce qui permet l'assurance d'une répétabilité des résultats, et supprime l'effet opérateur.

Enfin la granulométrie laser, ou diffraction laser, est décrite dans la norme ISO 13320 : 2009. Le principe permettant la mesure de la granulométrie est le suivant : ici encore, l'échantillon est placé dans une solution défloculante. Un laser monochromatique passe alors à travers l'échantillon. La lumière est diffractée par les particules à différents angles, puis mesurée par un détecteur multiélément. L'intensité et l'angle de la diffraction renseignent sur les dimensions des particules. Les valeurs de diffraction permettent de recomposer la granulométrie de l'échantillon, selon le modèle optique approprié à l'interaction laser-solide : Diffraction, réflexion, réfraction ou absorption [81–84].

La même norme décrit les limites de cette méthode. La morphologie des particules peut influencer la mesure, sachant qu'ici aussi, le modèle utilisé pour traiter les résultats considère des particules sphériques. De plus, la concentration de la suspension influence le résultat. Une certaine concentration est appropriée pour une certaine taille de molécule. Ainsi, plusieurs échantillons à plusieurs concentrations devraient être testés pour assurer un résultat robuste, mais cela rend la mesure compliquée.

Loizeau et al. [85] présentent une étude comparative entre granulométrie laser et pipette, réalisée sur des sédiments. Il apparaît, selon les auteurs, que l'analyse granulométrique par diffraction laser sous-estime la fraction argileuse : selon les méthodes de traitement de données utilisées, entre 16% et 37% seulement de la fraction argileuse est détectée.

Dans cette étude, les résultats de caractérisation par la méthode à la pipette sont présentés. Les essais ont été réalisés par l'INRA d'Arras, qui réalise des essais sur des centaines d'échantillons par semaine, et ont ainsi acquis un savoir-faire, une rigueur et un regard critique rendant les résultats robustes. Un dispositif automatisé prélève les masses des différentes fractions granulométriques durant la sédimentation.

1.2.3 CARACTÉRISATION DES ARGILES

Une première approche dans la caractérisation des argiles consiste en l'évaluation de leur surface spécifique. Deux méthodes sont actuellement utilisées dans les laboratoires.

La première, la valeur au bleu des sols (VBS) est historiquement utilisée par les géotechniciens. Cette méthode est décrite dans la norme NF P 94-068, puis dans la norme NF EN 933-9+A1. La seconde méthode, utilisée dans le domaine de l'agronomie, est appelée capacité d'échange cationique (CEC). Le protocole d'essai est décrit dans la norme NF EN ISO 23470.

Les deux méthodes utilisent le même principe : le dosage d'une molécule capable de se fixer sur les sites échangeables accessibles aux ions. On cherchera à déterminer le dosage pour lequel la molécule utilisée est en saturation dans une solution de sol. Dans le cas de la VBS, le bleu de méthylène est utilisé, dont la formule brute est $C_{16}H_{18}ClN_3S$, représentée schématiquement en Figure 1-10a. Sa saturation dans la solution de sol est évaluée visuellement, en déposant une goutte de solution sur un papier filtre (Figure 1-11). Ce protocole crée des conditions opérateur-dépendantes sur l'évaluation du résultat. Pour la CEC, une solution de trichlorure de cobaltihexamine est principalement utilisée, dont la formule brute est $H_{16}N_6Cl_3Co$, représentée schématiquement en Figure 1-10b. Elle est reconnue pour avoir une affinité plus forte avec les minéraux argileux du sol que les cations que l'on y trouve (Ca, Mg, Na et K) [NF EN ISO 23470]. Ici, la quantité de trichlorure de cobaltihexamine échangée est mesurée par spectrophotométrie.

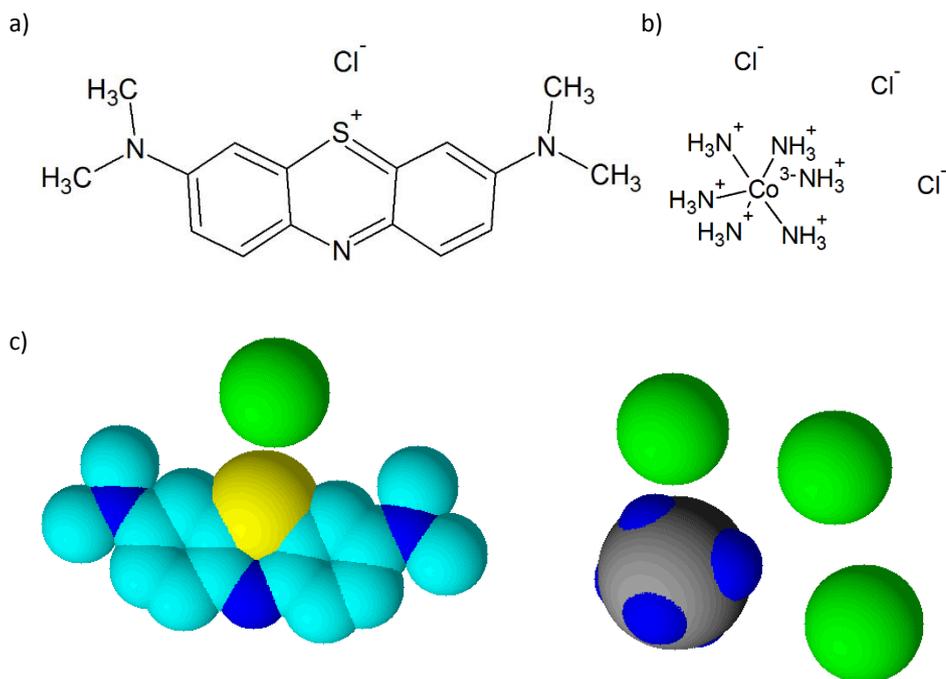


Figure 1-10 : a) Représentation schématique de la molécule de bleu de méthylène. B) représentation schématique de la molécule de cobalthexamine. c) Représentation dans l'espace des deux molécules de bleu de méthylène, à gauche, et de cobalthexamine, à droite.

La Figure 1-10c représente dans l'espace les deux molécules à l'étude. Les ions Chlorure liés aux molécules y sont liés. Ce sont ces ions qui seront échangés avec les sites chargés négativement des argiles. Quelle que soit la méthode choisie, il convient de savoir que l'échange cationique n'est jamais complet [NF EN ISO 23470].

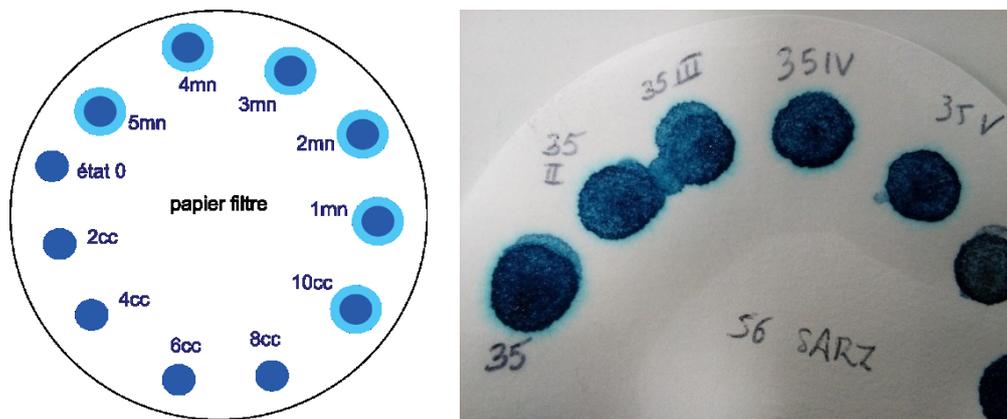


Figure 1-11: À gauche, observation théorique du résultat de l'essai au bleu de méthylène. À droite, l'observation réelle d'un résultat, moins évidente.

Comme indiqué dans la norme NF EN ISO 23470, la problématique du gonflement de l'espace interfoliaire des argiles peut être évoquée comme limite. Le gonflement est ici provoqué par la dissolution des minéraux solubles dans cet espace. Des solutions existent pour éviter cette dissolution ou corriger la fraction dissoute, mais elles ne sont pas encore communément utilisées. Il est à noter que ces deux méthodes restent utilisées aujourd'hui alors qu'elles caractérisent le même paramètre : la surface spécifique. Il paraît ici intéressant de les comparer, notamment pour confronter les résultats avec ceux disponibles dans la littérature.

Selon les données de Cokca et Birand, la relation suivante est calculée [86]:

$$VBS = 0.4483 * CEC + 0.0009 \quad 1-3$$

Et Laribi propose la relation suivante [87]:

$$CEC = 1000 \times \frac{VBS}{374} \quad 1-4$$

Ces formules de comparaisons des résultats seront utilisées en annexe n°1.1.2.

La VBS et la CEC sont des méthodes quantitatives, mais qui n'informent pas sur la nature des argiles en présence. Pour cela, nous pouvons utiliser la DRX. La DRX a été proposée pour la première fois par Raven et al [88] pour l'analyse quantitative de phases d'un assemblage complexe de minéraux. Les principes et protocoles d'essais sont décrits dans la norme NF EN 13925. Les résultats, analysés grâce au logiciel TOPAS® utilisant la méthode de Rietveld, nécessitent d'être croisés aux résultats d'autres essais pour permettre leur validation : une analyse thermo-gravimétrique (ATG), un essai de calcimétrie (NF P94-048), et une analyse des éléments chimiques par spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP). Les résultats de granulométrie et de CEC viennent aussi en complément.

Pour les essais de DRX, deux types d'échantillons sont préparés. Les essais sont réalisés sur poudres dispersées et sur lames orientées. Premièrement, les échantillons types « poudres dispersées » rendent possible la détection des natures cristallographiques. La méthode permettant la préparation de ces échantillons est décrite par Monecke et al [89]. Il s'agit notamment de déposer une poudre de terre préalablement tamisée à 63µm sur un porte échantillon de manière à éviter l'orientation préférentielle des particules. Dans un second temps, les échantillons types « lames orientées » aident à la quantification massive des natures d'argile découvertes plus tôt. La préparation de ces échantillons est décrite notamment par Jermouni [90], Duc [91] et Brown [92]. Pour une terre, quatre lames avec quatre traitements différents avant essais sont réalisées : séchage à l'air libre, traitement à l'éthylène glycol, séchage à 300°C et séchage à 550°C. Les argiles réagissent de manière différente à chaque traitement. Ceux-ci permettent alors une identification et une quantification plus aisée.

Pour traiter les résultats et remonter jusqu'à la quantification, le chemin suivi est le suivant :

- 1) Les différentes natures cristallographiques sont identifiées grâce aux échantillons de poudres dispersées
- 2) Une première quantification de ces natures cristallographiques est réalisée avec le logiciel TOPAS®, grâce aux lames orientées
- 3) Dans un tableur, la quantité de chaque phase minérale est ajustée pour que les quantités d'espèces chimiques les composant équivalent aux quantités mesurées par ICP. L'ajustement nécessite la connaissance de la stœchiométrie de ces phases minérales.
- 4) Les paramètres quantitatifs sont par la suite vérifiés de plusieurs façons
 - a. Les courbes de pertes de masses en fonction de la température des argiles pures sont connues. L'observation d'une courbe d'ATG permet dans un premier temps de valider la présence d'espèces argileuses. Puis, la perte de masse avant 230°C indique la quantité d'eau adsorbée par les argiles, tandis que la perte de masse après 230°C est directement liée à la désoxydation des argiles. Or, la quantité d'oxydes (groupe OH) est calculable grâce à la stœchiométrie.
 - b. Les CEC moyennes des argiles étant connues, il est possible de calculer une CEC théorique à partir des quantités d'argiles identifiées, que l'on compare ensuite à la CEC mesurée.
 - c. Les espèces argileuses identifiées (Illite, Kaolinite, Chlorite...) sont différenciées des espèces non argileuses (Quartz, Feldspath K, Calcite...). Il est alors possible de calculer la proportion d'argile dans le passant granulométrique testé. Ce qui est directement comparable à une courbe granulométrique.
- 5) Pour finir, si ce processus ne permet pas d'aboutir à une quantification cohérente, on réajuste la quantification, puis on vérifie de nouveaux.

Un exemple de croisement des résultats sur tableur est donné en annexe n°1.1.3.

Concernant la méthode de caractérisation, d'une part, les essais de CEC ont été réalisés par le même laboratoire que les essais de granulométrie à la pipette. D'autre part, les résultats de CEC sont utilisés pour valider la caractérisation des minéraux argileux par diffraction aux rayons X (DRX). Ainsi, dans la thèse, les résultats de CEC sont généralement préférés aux résultats de valeurs au bleu.

1.2.4 POTENTIEL HYDROXYDE

Une seule méthode est présentée et utilisée. Elle correspond à la norme NF ISO 10390. La terre est broyée à 2 mm puis un échantillon de 10g est prélevé et mis en solution pour un rapport de 1/5 en volume. Le pH est ensuite mesuré au pH-mètre.

1.2.5 MASSE VOLUMIQUE PARTICULAIRE

La Figure 1-2 illustre les trois phases présentes dans un sol. Afin d'être capable d'évaluer de manière précise la masse et le volume qu'occupe chacune de ces phases, il convient de connaître la masse volumique des particules solides de ce même sol. Aucune porosité ne doit être incluse dans la mesure de cette masse volumique. En géotechnique, la principale méthode est indiquée par les normes NF P 94-054 et XP CEN ISO/TS 17892-3. Elle consiste en l'utilisation d'un pycnomètre, permettant de placer un échantillon de sol et un liquide. Ce dernier permet, par une lecture de niveau, d'évaluer le volume de l'échantillon étudié. La norme NF P 94-054 indique la possibilité de désaérer le liquide par ébullition ou vide d'air. La seconde norme citée mentionne la possibilité d'utiliser d'autres liquides tels que l'éthanol.

Il existe d'autres méthodes de caractérisation de cette masse volumique particulière. Par exemple, en remplaçant le liquide par un gaz. Les mesures par pycnomètre à eau peuvent être comparées avec des mesures réalisées à l'aide d'un pycnomètre à hélium. Le principe utilisé est proche : le volume de l'échantillon étudié est évalué par mesure de la masse de gaz introduite et de sa pression, à température constante.

Deux paramètres peuvent ici induire une différence dans le résultat en fonction du fluide utilisé. Les surfaces des argiles sont hydrophiles [75], facilitant ainsi l'avancée d'eau dans les pores des argiles, par adsorption. L'utilisation d'eau ou de gaz doit donc, par hypothèse, influencer sur l'évaluation du volume des argiles, selon la profondeur à laquelle le fluide entre dans les pores. De plus, l'utilisation du pycnomètre à eau n'inclut pas de mise sous pression, ni de défloculant. La dispersion des argiles dépend alors de plusieurs paramètres : la concentration en électrolytes de la solution, la valence des cations en présence et la température [71]. Selon ces conditions, il est alors probable que l'eau n'atteigne pas tous les pores ou que les argiles ne soient pas parfaitement défloculées.

Afin de réaliser une mesure représentative d'une barbotine préparée pour la réalisation d'un terre-chanvre, et afin d'assurer la fiabilité des calculs utilisant ces résultats de masse volumique particulière, l'étude utilisera principalement les résultats au pycnomètre à eau. La désaération de l'échantillon est réalisée par ébullition.

1.2.6 CONSISTANCE ET RHÉOLOGIE EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU

La consistance définit l'état de la matière observée. Pour un matériau terre, cette consistance varie en fonction de sa teneur en eau. On définit alors trois états et deux limites entre ces états, comme indiqué par la Figure 1-12. Une limite de plasticité entre un état solide et plastique, une limite de liquidité entre un état plastique et liquide. Les barbotines fabriquées pour le terre-chanvre sont toujours au-delà de la limite de liquidité. Selon la définition de la rhéologie « la science qui étudie les déformations et l'écoulement de la matière » proposé par Eugene Cook Bingham en 1928 [93], l'étude des limites d'Atterberg est une étude rhéologique. Il existe à ce jour deux méthodes permettant d'évaluer ces limites.

Premièrement, pour la limite de liquidité, la norme NF P 94-051 décrit l'utilisation de la coupelle de Casagrande. Cette méthode consiste à remplir une coupelle de sol, séparer l'échantillon en deux en traçant une ligne centrale,

puis observer cette ligne se refermer lorsque la coupelle est « tapée ». Ici, des résultats peu répétables sont régulièrement observés. En effet, selon l'opérateur, la coupelle peut être remplie de différentes manières et cela influe sur le résultat. L'autre méthode possible est celle du cône de pénétration, décrite dans les normes NF P 94-052-1 et ISO 17892-12. Il s'agit de faire tomber un cône d'une hauteur donnée dans un échantillon de sol, puis d'observer son enfoncement. Cette méthode est plus simple à réaliser et beaucoup plus répétable.

Concernant la limite de plasticité, une seule méthode est aujourd'hui indiquée dans les normes NF P 94-051 et ISO 17892-12. La méthode du rouleau, consiste à rouler manuellement le sol jusqu'à ce que celui-ci atteigne un diamètre de 3mm. Si le rouleau se fissure en atteignant ce diamètre, alors le sol est à sa limite de plasticité. Il serait néanmoins utile de pouvoir réaliser cette même mesure avec la méthode du cône de pénétration. D'après les recherches réalisées, il n'existe pas aujourd'hui dans la littérature de consensus sur ce fait, mais l'on observe malgré tout des valeurs cohérentes dans la littérature [42–44]).

Ici, ce sont les résultats issus des méthodes classiques (coupelle de Casagrande et rouleau) qui seront présentés. En effet, le cône de pénétration reste encore peu utilisé, on s'assure alors la possibilité de comparer nos résultats avec d'autres études.

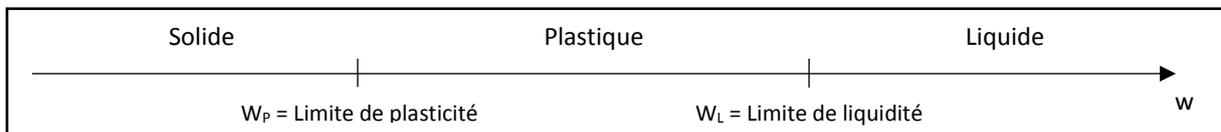


Figure 1-12: Définition des limites d'Atterberg, w étant la teneur en eau d'un sol à l'étude.

1.2.7 COMPORTEMENT HYDRIQUE

Plusieurs éléments de la littérature font état des liens entre sorption de vapeur d'eau et caractéristiques géotechniques de la terre [69,72], notamment un lien entre sorption et CEC. Le comportement argile-vapeur d'eau est d'autant plus intéressant que notre matériau, le terre-chanvre, peut avoir une interaction avec l'air intérieur de l'habitat, et ainsi influencer sur son hygrométrie.

Deux méthodes permettant de construire une courbe de sorption sont ici analysées. La première méthode est celle des solutions salines. Elle consiste à placer les échantillons à l'étude dans différentes ambiances de température et d'humidité contrôlées. L'humidité y est contrôlée par l'utilisation de solutions salines. Une ambiance correspondant à une humidité, l'évolution se fait par étape, la méthode est dite statique. La norme NF EN ISO 12571 décrit cette méthode particulièrement pour les matériaux utilisés dans le bâtiment. La deuxième à l'étude est la Dynamic Vapor Sorption, ou DVS. La sorption dynamique consiste à utiliser une chambre climatique dans laquelle l'évolution de l'humidité est contrôlée automatiquement (apport direct de vapeur d'eau ou séchage par condensation). L'influence de la méthode sur les résultats de mesures dépend alors en partie de l'évolution de l'humidité et du temps de stabilisation avant mesure de la masse. Mais un autre paramètre entre en jeu, la définition de l'état sec de la terre. Ce sera ici la principale différence à noter entre nos deux méthodes. Le séchage avant essais en statique se fait par étuvage à 40°C, alors que la DVS utilise un gaz sec pour sécher.

Pour six terres (présentées ensuite) les deux méthodes ont été utilisées (voir chapitre 5). Mais la méthode par solution saline est longue et demande de nombreuses pesées. La DVS permet de réaliser rapidement un grand nombre d'échantillons. Ainsi ce sont les résultats de la DVS des 28 terres qui seront présentés par la suite.

Le Tableau 1-4 résume l'ensemble de ces normes en y indiquant la caractéristique étudiée, la référence de la norme ainsi que son titre. Y sont indiquées les normes internationales d'actualités (au jour de la rédaction de cette thèse) avec leur parents plus anciens : les normes françaises, encore présentes dans les laboratoires.

Tableau 1-4: Liste des normes d'essais de caractérisation d'une terre, conformément à la géotechnique. Les tirets indiquent qu'aucune norme existe pour l'essai concerné.

Caractéristique étudiée	Méthode	Normes internationales et/ ou européennes		Normes françaises	
		Référence	Titre	Référence	Titre
Méthode générale et descriptif des caractéristiques à l'étude		NF EN ISO 14688-1 (P 94-400-1)	Reconnaissance et essais géotechniques. Dénomination - description et classification des sols. Partie 1. Dénomination et description.	XP P94-011	Sols : reconnaissance et essais Description - Identification Dénomination des sols Terminologie - Éléments de classification
		NF EN ISO 14688-2 (P 94-400-2)	Reconnaissance et essais géotechniques. Dénomination, description et classification des sols. Partie 2 : Principes pour une classification.		
Granulométrie	Tamisage et sédimentométrie	ISO 17892-4	Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules	NF P94-056 et NF P94-057	Sols : reconnaissance et essais Analyse granulométrique Méthode par tamisage à sec après lavage / Sols : reconnaissance et essais Analyse granulométrique des sols Méthode par sédimentation
	Tamisage et pipette	-	-	NF X 31-107	Qualité du sol - Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol - Méthode à la pipette
	Tamisage et granulométrie laser	ISO 13320:2009	Analyse granulométrique — Méthodes par diffraction laser	-	-
Caractérisation des argiles	VBS	NF EN 933-9+A1	Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulates — Partie 9 : Qualification des fines — Essai au bleu de méthylène	NF P 94-068	Sols : Reconnaissance et essais Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache
	CEC	NF EN ISO 23470	Qualité du sol — Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) effective et des cations échangeables à l'aide d'une solution de trichlorure de cobaltihexammine	-	-
Type d'argile	DRX	NF EN 13925	Essais non destructifs - Diffraction des rayons X appliquée aux matériaux polycristallins et amorphes (Plusieurs parties)	-	-
Masse volumique particulaire	Liquide	XP CEN ISO/TS 17892-3	Reconnaissance et essais géotechniques Essais de laboratoire sur les sols Partie 3 : Détermination de la masse volumique des particules solides — Méthode du pycnomètre	NF P 94-054	Sols : reconnaissance et essais Détermination de la masse volumique des particules solides des sols Méthode du pycnomètre à eau
	Gaz	-	-	-	-
Consistance (Limites d'Atterberg)	Cône de pénétration	ISO 17892-12	Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites d'Atterberg	NF P 94-052-1	Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.
	Coupelle de Casagrande et méthode du rouleau			NF P 94-051	Sols : reconnaissance et essais Détermination des limites d'Atterberg Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau
Sorption	Solution saline	NF EN ISO 12571	Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination des propriétés de sorption hygroscopique	-	-
	DVS	-	-	-	-
Teneur en eau	Étuvage	NF EN ISO 17892-1	Reconnaissance et essais géotechniques. Essai de sol au laboratoire. Partie 1 : Détermination de la teneur en eau.	NF P94-050	Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
	Micro-onde	-	-	NF P 94-049-1	-
	plaque chauffante	-	-	NF P 94-049-2	-

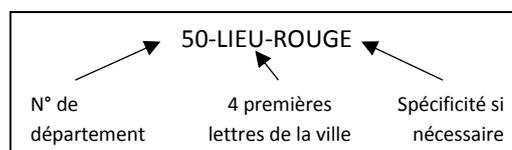
1.3 CHOIX ET CARACTÉRISTIQUES DES TERRES

1.3.1 MÉTHODE DE CHOIX ET D'OBSERVATION DES MATÉRIAUX TERRES

La carte présentée en Figure 1-13, illustre la position des points de récupération des différentes terres collectées pour cette étude. La collecte d'échantillons de terre a été réalisée avec un objectif : observer une plage importante de variabilité des terres, représentative de la variabilité naturelle. Nous devons ici observer la capacité de la terre à remplir son rôle de liant entre particules de chanvre. Un ensemble de terres représentatives de la variabilité naturelle doit être choisi pour ainsi définir les conditions de convenance d'une terre pour la réalisation d'un isolant terre-chanvre. La recherche de terres particulières, ou à caractère extrême, permet d'atteindre cet objectif. Ces termes sont utilisés par les artisans terre crue pour parler d'une terre ayant un comportement non commun dans la technique constructive utilisée. Par exemple, un artisan mettant en œuvre un enduit terre va qualifier une terre d'extrême lorsqu'elle nécessite une stabilisation au sable très importante pour pouvoir être utilisée en enduit. Ou encore, une terre peut présenter des agrégats d'argiles qui ne se dispersent pas lors de la formulation de l'enduit, rendant ce dernier non homogène.

Différents lieux de collecte ont été choisis : dans des carrières, où il est possible de récupérer des terres brutes ou des boues de lavage ; chez des particuliers, où la même terre a pu être utilisée pour la réalisation d'un élément de leur habitation ; auprès d'artisans, où leur expertise a favorisé le choix d'une terre à caractère extrême. Ainsi, 28 terres ont été récupérées dans 10 départements du grand ouest de la France. Parmi ces terres, 11 proviennent de carrières (8 terres brutes, 2 produits en sac et 1 boue de lavage) et les 17 autres ont été données par des particuliers ou des artisans.

Dans la suite du manuscrit, les terres seront référencées selon la nomenclature décrite ci-dessous :



Parmi ces terres, une terre sera indiquée comme référence (61-REF). Elle est fournie par Eco-Pertica et a été utilisée sur de nombreux chantiers de terre-chanvre avec succès, utilisant différentes méthodes de mise en œuvre, dans la région du Perche (Normandie). L'étude est donc basée sur cette terre de référence, qui représente le savoir-faire d'artisans expérimentés.

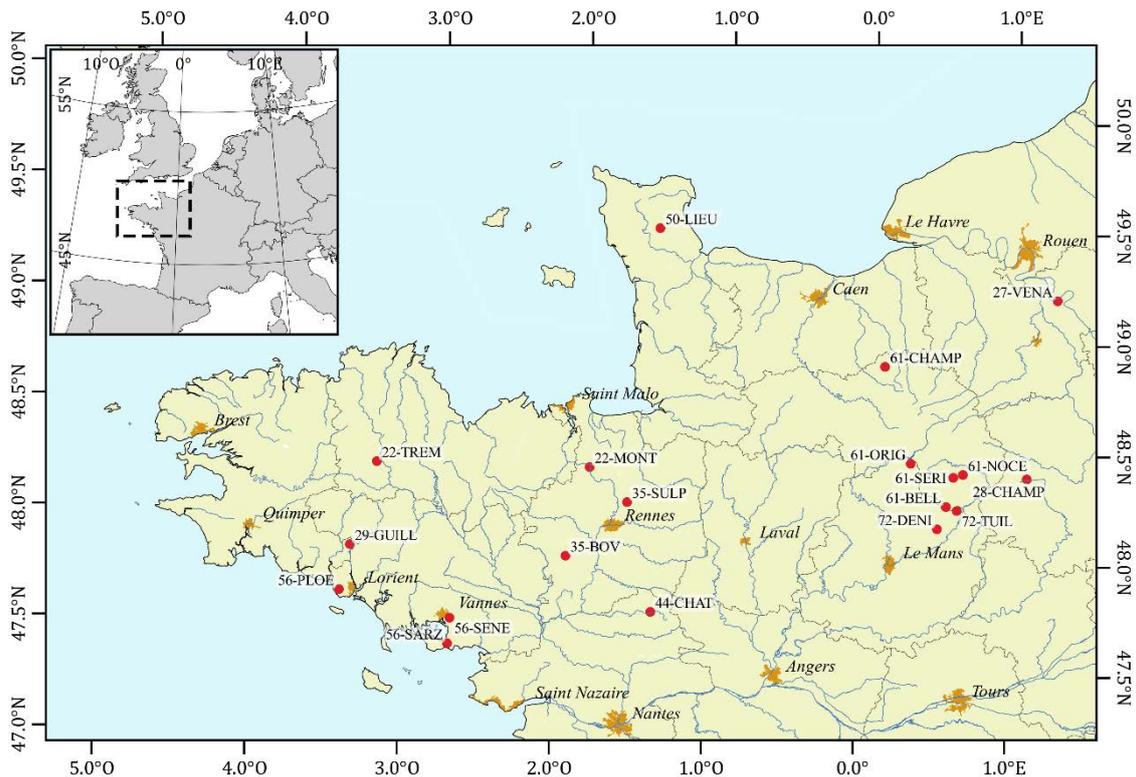


Figure 1-13: Carte de collecte des terres.

De manière à appréhender le nombre important d'échantillons de terres collectées, une méthode d'observation rapide et qualitative des comportements de déformation et d'écoulement des terres a été choisie. Une matrice de consistance a été construite afin de manipuler manuellement une première fois l'ensemble des échantillons. Cette méthode de caractérisation est en premier lieu un outil pédagogique permettant de qualifier l'influence de la teneur en eau sur la consistance de la terre. Aussi, ce test a été mis en place dans de nombreux cours d'architecture liés à la construction terre et est généralement appelé test de Carazas [97], mais n'a jamais été décrit dans un document scientifique. La Figure 1-14 présente un exemple de test de Carazas réalisé sur une terre : c'est une matrice dont chaque ligne correspond à une terre donnée, avec en abscisse différentes teneurs en eau.



Figure 1-14: Exemple de Carazas [98].

Le test de Carazas sera ici une inspiration, permettant de réaliser un test comparant les comportements de déformation et d'écoulement des différentes terres collectées. Le protocole choisi est le suivant :

- 1) Séchage de la terre à 50°C selon la NF EN ISO 17892-1
- 2) Désagrégation de la terre au mortier
- 3) Mélange de la terre et d'eau, à l'aide d'un malaxeur à mortier jusqu'à homogénéisation, à différentes teneurs en eau définies à partir de l'état sec après séchage à 50°C

1.3.2 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION

Parmi l'ensemble des terres étudiées, 6 terres seront choisies par la suite pour les représenter et poursuivre l'étude. La Figure 1-15a illustre la variabilité naturelle des terres. Certaines terres (50-LIEU-SABLE, 50-LIEU-BRUN) présentent un étalement pour une teneur en eau de seulement 30%. D'autres terres ne présentent pas d'étalement même pour une teneur en eau de 60% (T6, 56-PLOE-MICA, 22-TREM, 61-NOCE-3). À cette même teneur en eau, les fines de la terre 50-LIEU-ROUGE s'étalement alors que la part granulaire plus grossière reste cohésive (ségrégation). L'essai a été poursuivi pour les terres classées avec une forte argilosité apparente (HA) : 61-NOCE-3 présente un étalement à 75% de teneur en eau alors que 44-CHAT, 56-PLOE-MICA et 22-TREM présentent un étalement à 100%. Pour finir, la terre de référence, non présente sur ces différentes figures, a été testée et classée avec une argilosité apparente moyenne (MA).

L'ensemble des résultats de caractérisation des 28 terres sont présentés dans le Tableau 1-7. Afin de visualiser les plages de variabilité de chaque paramètre de caractérisation, le Tableau 1-6 reprend les moyennes, minimums, maximums, médianes et écarts types des résultats de caractérisation des terres. Ce nombre important de données n'étant pas simple à appréhender, une représentation graphique est proposée en Figure 1-17. Sur celle-ci, les terres choisies sont mises en avant afin de visualiser leur caractère représentatif. Chaque barre horizontale représente la plage de variabilité du paramètre et les barres verticales s'y trouvant donnent les valeurs de chaque terre concernant ce paramètre. Cela permet de visualiser la répartition des valeurs. L'observation des résultats permet de constater différents caractères extrêmes de certaines terres. Par exemple : 61-REF a la plus grande teneur en argile (51%), les terres 50-LIEU-SALBE et 56-PLOE-MICA n'ont pas de limites d'Atterberg car elles ne sont pas suffisamment cohésives, 56-PLOE-FINI présente un pH très bas de 3,9. Les masses volumiques particulières varient aussi de manière importante, puisque l'on observe un minimum de 2400 kg.m⁻³ et un maximum de 2900 kg.m⁻³. La valeur de masse volumique particulière moyenne est de 2650 kg.m⁻³, valeur couramment employée. Néanmoins, cela montre qu'une attention doit être portée sur la dispersion importante de ces résultats.

Les textures des 6 terres sélectionnées sont confrontées à l'ensemble des textures rencontrées en Bretagne [60] (Figure 1-16). La zone couverte par les échantillons collectés correspond avec la zone définie par l'étude sur les terres de Bretagne, seuls les sables limoneux (SI) et limons sableux (Ls) ne sont pas représentés. Ainsi, la campagne de collecte d'échantillons a permis de construire une base de données et de matériaux représentatifs de la variabilité naturelle des terres de l'ouest de la France.

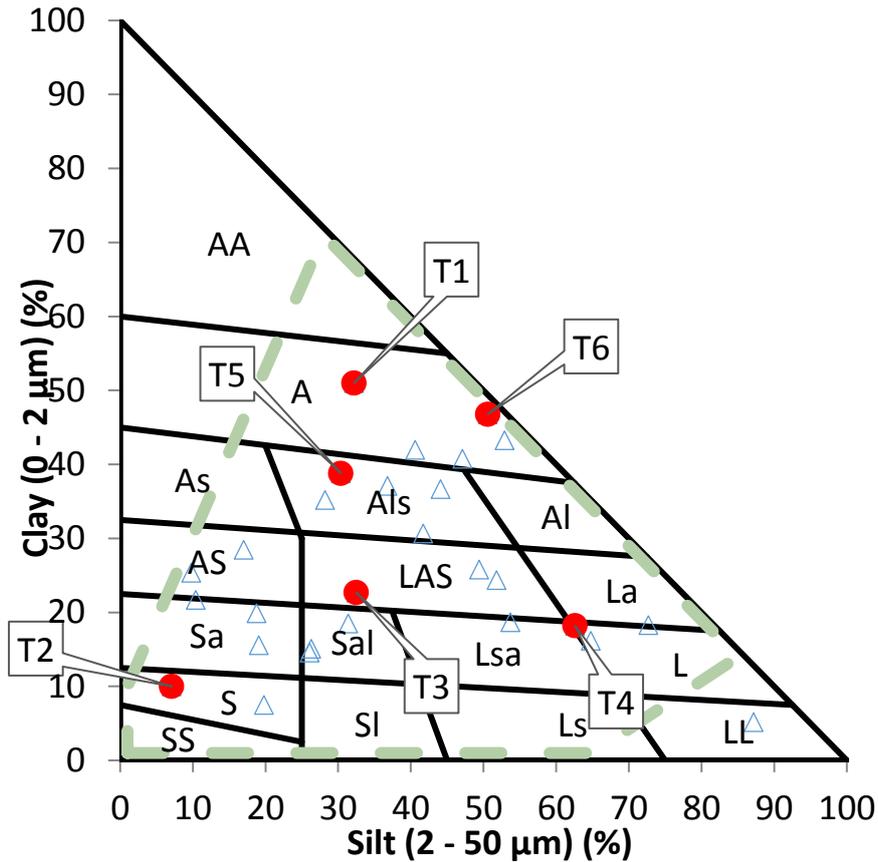


Figure 1-16: Classification GEPPA des terres collectées (triangles bleus et points rouges) comparées aux terres de Bretagne (zone délimitée par les pointillés verts). Les points rouges correspondent aux terres sélectionnées pour l'ensemble des études de la thèse

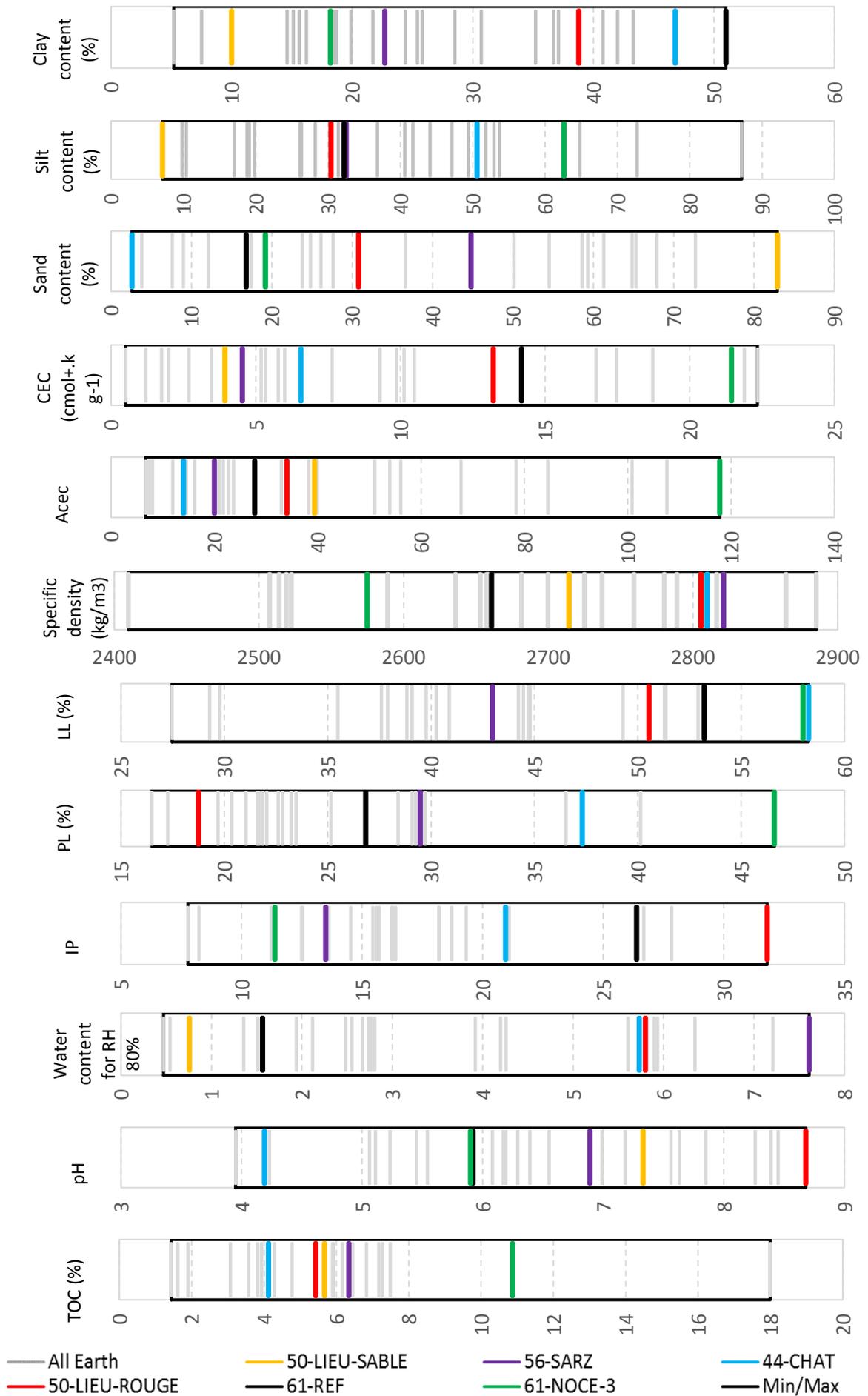
Tableau 1-6: Résumé statistique des données de caractérisation.

Samples		Average	Median	Minimum	Maximum	STD	
Texture	Pipette method	Clay (< 0.002 mm) (%)	26.03	23.55	5.20	51.00	12.14
		Silt (0.002 - 0.05 mm) (%)	38.04	34.65	7.10	87.20	19.45
		Sand (0.05-2 mm) (%)	35.94	27.60	2.60	82.90	23.09
Argilosité	CEC (cmol+.kg-1)		9.89	8.47	0.50	22.34	6.89
	ACEC		41.16	33.51	6.67	117.80	30.98
Limites d'Atterberg	LL		43.26	42.98	27.46	58.27	8.22
	LP		26.06	23.23	16.50	46.61	7.32
	IP		17.20	16.23	7.77	31.80	5.88
pH	Potentiel Hydroxide		6.41	6.24	3.95	8.68	1.29
TOC	Organic matter ratio (%)		5.74	5.67	1.43	18.00	3.30
Masse volumiques (kg.m-3)	Water pycnometer (drying temperature = 50°)	Average	2685.39	2699.76	2409.85	2885.15	119.74
		Standard deviation	36.11	18.09	0.00	139.07	34.11
Sorption	Water content for RH 80% - Salt solution		3.39	3.44	0.54	5.87	2.22
	Water content for RH 80% - DVS		3.55	2.76	0.47	7.61	2.12

Tableau 1-7: Ensemble des résultats de caractérisation des terres.

Echantillons :			22-MONT	22-TREM	27-VENA	28-CHAMP	29-GUIL	35-BOV	35-SUL	44-CHAT	50-LIEU-BRUN	50-LIEU-LIMON	50-LIEU-ROUGE	50-LIEU-SABLE	56-PLOE-FINI	56-PLOE-GRISE	56-PLOE-JAUNE	56-PLOE-MICA	56-SARZ	56-SENE	61-BELL	61-CHAMP	61-NOCE-1	61-NOCE-2	61-NOCE-3	61-ORIG	61-REF	61-SERI	72-DENI	72-TUIL
Texture	Méthode à la pipette	Argiles (< 0.002 mm) (%)	25.40	18.30	30.70	40.80	16.20	37.10	24.40	46.80	18.70	15.10	38.80	10.00	43.30	7.50	14.60	5.20	22.70	18.50	35.20	28.50	36.70	25.80	18.20	15.60	51.00	19.90	21.70	42.00
		Limons (0.002 - 0.05 mm) (%)	9.80	72.70	41.70	47.10	64.80	36.80	51.80	50.60	53.70	26.30	30.40	7.10	52.90	19.80	26.10	87.20	32.50	31.40	28.20	17.00	44.10	49.40	62.60	19.10	32.20	18.80	10.40	40.60
		Sable (0.05-2 mm) (%)	64.80	9.00	27.60	12.10	19.00	26.10	23.80	2.60	27.60	58.60	30.80	82.90	3.80	72.70	59.30	7.60	44.80	50.10	36.60	54.50	19.20	24.80	19.20	65.30	16.80	61.30	67.90	17.40
	Méthode au granulomètre Laser	Argiles (< 0.002 mm) (%)	25.40	18.30	30.70	40.80	16.20	37.10	24.40	46.80	18.70	15.10	38.80	10.00	43.30	7.50	14.60	5.20	22.70	18.50	35.20	28.50	36.70	25.80	18.20	15.60	51.00	19.90	21.70	42.00
		Limons (0.002 - 0.05 mm) (%)	9.80	72.70	41.70	47.10	64.80	36.80	51.80	50.60	53.70	26.30	30.40	7.10	52.90	19.80	26.10	87.20	32.50	31.40	28.20	17.00	44.10	49.40	62.60	19.10	32.20	18.80	10.40	40.60
		Sable (0.05-2 mm) (%)	64.80	9.00	27.60	12.10	19.00	26.10	23.80	2.60	27.60	58.60	30.80	82.90	3.80	72.70	59.30	7.60	44.80	50.10	36.60	54.50	19.20	24.80	19.20	65.30	16.80	61.30	67.90	17.40
Argilosité	CEC (cmol+.kg-1)	5.34	9.87	10.12	9.29	1.20	6.00	5.78	6.56	10.48	5.18	13.21	3.94	3.47	0.50	1.74	1.99	4.54	2.69	7.64	22.34	18.72	17.47	21.44	13.18	14.19	21.40	21.88	16.76	
	ACEC	21.02	53.93	32.96	22.77	7.41	16.17	23.69	14.02	56.04	34.30	34.05	39.40	8.01	6.67	11.92	38.27	20.00	14.54	21.70	78.39	51.01	67.71	117.80	84.49	27.82	107.54	100.83	39.90	
	VBS (g/100g)	1.35	1.48	2.53	1.90	0.25	1.22	1.01	2.23	1.60	0.70	4.90	0.68	0.63	0.24	0.38	1.17	0.87	0.82	1.85	3.00	4.55	3.15	2.22	7.58	1.02	8.92	2.99	3.16	
	ACB	5.32	8.08	8.26	4.66	1.52	3.28	4.15	4.76	8.58	4.64	12.62	6.78	1.46	3.26	2.61	22.50	3.84	4.45	5.26	10.51	12.40	12.19	12.20	48.59	2.00	44.80	13.78	7.52	
Limites d'Atterberg	LL	29.78	51.36	40.24	37.90	37.60	51.30	44.79	58.27	27.46	29.29	50.54		52.92	35.49	39.06		42.98	49.29	39.08	38.83	44.46	44.69	57.99		53.23	40.88	44.22	39.76	
	LP	17.25	40.14	22.05	21.67	16.50	23.47	29.09	37.32	19.69	21.05	18.74		36.53	21.87	20.35		29.48	22.61	22.82	23.23	25.15	29.25	46.61		26.84	28.40	29.70	21.58	
	IP	12.53	11.22	18.20	16.23	21.10	27.83	15.70	20.95	7.77	8.23	31.80		16.39	13.62	18.71		13.49	26.68	16.26	15.60	19.31	15.44	11.38		26.38	12.48	14.52	18.18	
	Potentiel Hydroxide	6.99	6.39	5.23	6.19	5.06	5.54	5.45	4.19	8.45	5.91	8.68	7.33	3.95	6.17	6.08		7.63	6.89	4.23	6.55	8.39	5.11	6.29	5.90	8.26	5.92	7.56	7.85	7.18
Teneur en C	Taux de matière organique (%)	4.12	6.35	5.67	6.83	1.43		18.00	7.49	3.57	1.89	3.83	1.61	7.17	3.07	3.93		4.78	5.43	7.28	6.17	5.89	5.92	10.87	4.29	5.67	6.45			
	Moyenne	2714.97	2759.29	2507.48	2657.43	2681.48		2809.76	2699.76	2788.89	2805.56	2714.33	2658.53	2635.82	2724.93	2864.34	2821.21	2737.13	2885.15	2816.41	2514.07	2518.92	2574.77	2780.22	2660.78	2522.48	2409.85	2588.93		
Masse volumiques (kg.m ⁻³)	Pycnomètre à eau (séchage 50°C)	Moyenne	8.77	96.13	2.52	139.07	55.25		18.09	14.54	0.00	5.56	12.31	16.36	15.55	13.27	12.07	30.00	98.60	8.59	67.87	45.26	37.33	45.81	10.99	56.61	61.76	44.31	58.44	
		Ecart-Type	2681.55	2624.69	2692.33	2689.84	2671.52		2746.92	2659.06	2636.80	2630.53	2735.93	2667.84	2643.98	2652.13		2756.70	2691.37	2720.41	2621.36	2595.12	2551.31	2418.58		2579.44		2702.43		
	Pycnomètre à air (séchage air-libre)	Moyenne	1.77	1.51	7.06	9.18	2.81		6.56	1.51	1.15	0.82	3.85	4.59	3.50	4.46		4.22	2.63	2.89	1.47	13.83	8.23	5.67		1.57		4.43		
		Ecart-Type	2630.89	2755.74	2867.86	2827.02	2694.57	2940.88	2826.14	2838.89	2754.67	2705.97	2990.77	2671.87	2689.33	2659.56	2673.40		2834.31	2724.36	2869.21	2996.55	2749.63	2706.50	2545.90	2705.22	3067.48	2860.50	2928.96	
	Pycnomètre à air (séchage 50°C)	Moyenne	0.90	0.96	3.82	4.47	2.92	0.80	1.87	2.26	1.64	1.22	1.84	0.70	1.82	1.51	1.36		1.51	1.37	1.66	5.08	2.09	1.71	1.17	7.75	1.46	1.99	1.07	
		Ecart-Type																												
Sorption	Teneur en eau pour HR 80 % - Solution saline									1.86			5.02	0.54					1.25						5.79		5.87			
	Teneur en eau pour HR 80 % - DVS	2.55	2.74	4.26	3.92	0.54			2.67	2.48	2.81	2.12	5.90	1.57	1.51	0.47	0.76		1.94	1.36	4.20	5.61	7.21	5.80	5.73	2.76	7.61	6.35	5.93	

Figure 1-17: Représentation graphique des données de caractérisation des 28 terres.



1.4 ANALYSE APPROFONDIE DES TERRES CHOISIES

1.4.1 CHOIX DE TERRES POUR LA FABRICATION D'ÉCHANTILLON TERRE-CHANVRE

Les terres choisies doivent permettre, dans la suite de l'étude, de déterminer les conditions dans lesquelles le terre-chanvre ne remplit plus sa fonction. Cela peut par exemple se traduire par une tenue mécanique trop faible, où une conductivité thermique trop élevée. On parlera de caractéristiques limites, pouvant se traduire dans les caractéristiques des composants et/ou de la formulation.

Afin de représenter la variabilité des terres dans l'étude, et pouvoir ainsi fabriquer un nombre convenable d'échantillons par la suite, six terres ont été choisies et renommées selon les critères suivants :

- 61-REF (notée T1) = Terre de référence, déjà utilisée sur de nombreux chantiers, permettant de comparer l'ensemble des résultats à l'expérience existante sur le matériau.
- 50-LIEU-SABLE (notée T2) = Terre présentant une faible argilosité apparente, un faible taux d'argile et un fort taux de sable, permettant d'étudier les conditions limites de faisabilité d'un mélange terre-chanvre et ses performances en fonction de la granulométrie de la terre ;
- 56-SARZ (notée T3) = Terre présentant une argilosité apparente convenable, un taux d'argile moyen (plus faible que la référence), permettant aussi d'étudier les conditions limites de convenance d'une terre et les performances résultantes d'un terre-chanvre.
- 61-NOCE-3, 50-LIEU-ROUGE, 44-CHAT, (respectivement T4, T5 et T6) = Terres présentant une forte argilosité apparente et des taux d'argiles hauts, permettant d'étudier l'influence du type d'argile sur les performances d'un produit terre-chanvre.

Selon les résultats d'analyse granulométrique, la terre de référence est la terre contenant le plus d'argile dans notre étude. Elle reste une référence puisqu'elle a été validée par des maçons expérimentés. Les 6 terres T1 à T6 sont indiquées sur la figure 1.16.

1.4.2 CARACTÉRISTIQUES DES TERRES SÉLECTIONNÉES

L'objectif de ce paragraphe est d'approfondir l'étude des caractéristiques des terres sélectionnées. Premièrement, les courbes granulométriques, représentées en Figure 1-18, permettent d'avoir un aperçu plus précis de la répartition des tailles de granulats de chaque terre, avant leur tamisage à 2mm pour la fabrication de barbotine.

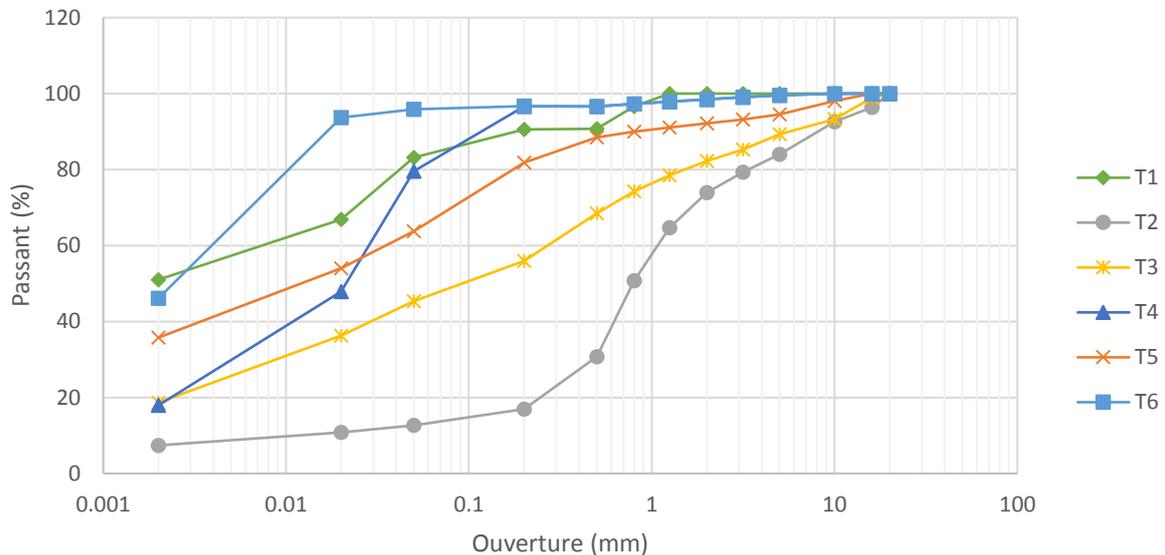


Figure 1-18: courbes granulométriques des terres sélectionnées.

Concernant la microstructure des fines de chaque terre, la Figure 1-19 présente des images MEB réalisées pour chacune des six terres. L'échantillon, les conditions ainsi que l'échelle des images sont présentées sur chacune d'entre elle. Dans l'ensemble des cas, les images illustrent la présence de plaquettes d'argile de différentes tailles (0,5µm – 3µm dans la plus grande dimension). Les morphologies observées sont majoritairement des plaques avec de fortes angularités, proches de la morphologie typique des kaolinites, des illites, ou des vermiculites. Il est plus difficile de repérer dans ces cas quels morphologies correspondent à quelles argiles, notamment parce que ces argiles sont altérées et peuvent donc présenter des structures amorphes, mais aussi du fait que les échantillons montrent principalement des agrégats. La quantification des espèces minéralogiques identifiées dans chaque terre est présentée dans le Tableau 1-9.

Les courbes issues des analyses DRX et ATG, ainsi que les résultats de composition chimique par ICP sont présentés en annexe n°1.1.4. Premièrement, l'ensemble des terres présentent en différentes quantités de l'illite et de la kaolinite. La seconde espèce argileuse la plus présente est la chlorite (seule la terre T6 n'en contient pas). Ensuite, la Pyrophyllite est observée dans les échantillons T4 et T6. Enfin, seule la terre T5 présente de la vermiculite. Le tableau présente aussi les espèces non argileuses identifiées : Quartz, Feldspath et d'autres minéraux tels que l'anatase, la calcite, la dolomite, l'albite et l'anorthite.

Il est à rappeler ici les différentes propriétés des argiles identifiées :

- Kaolinite : structure 1/1, argile neutre (non chargée), non gonflante
- Illite : structure 2/1, argile chargée, non gonflante
- Chlorite : structure 2/1, argile chargée, non gonflante
- Vermiculite : structure 2/1, argile chargée, gonflante
- Pyrophyllite : structure 2/1, argile neutre, non gonflante

Est reportée dans le Tableau 1-8 la comparaison des proportions d'argile dans la granulométrie de chaque terre entre mesure à la pipette ou calcul après essai DRX. Il est intéressant de noter que, malgré les méthodes de mesure et d'ajustement des quantifications d'espèces argileuses, d'importantes différences apparaissent. C'est le cas des terres T3, T6 et T1. Pour T3 et T6, les quantités d'argiles calculées après DRX sont plus importantes que celles mesurées par pipette. Or ces deux terres présentent une quantité importante d'Illite (respectivement 20% et 36%). C.W.Chen observe notamment que l'illite peut être difficile à défloculer [99], créant ainsi des agrégats qui sédimenteront rapidement, menant à une sous-estimation du passant à 2µm. À l'inverse, la proportion d'argile dans T1 a été surestimée. Ici, il est probable que certaines particules de quartz ou de Feldspath ont des dimensions inférieures à 2µm, menant lors des essais par sédimentation à une surestimation de la fraction argileuse.

Tableau 1-8: Comparaison des proportions d'argile dans les terres entre les mesures de granulométrie et les résultats de diffraction par rayon x.

Sample	Clay content	
	According to PSD	According to DRX
T2	10 %	11 %
T3	39 %	45 %
T4	18 %	16 %
T5	38 %	39 %
T6	47 %	74 %
T1	51 %	43 %

Tableau 1-9: Résultats des quantifications de phases minéralogiques

Sample		T2 (%)	T3 (%)	T4 (%)	T5 (%)	T6 (%)	T1 (%)
Clay minerals	Chlorite	1.0	6.0	4.0	0.2	-	8.0
	Illite	7.6	20.0	7.0	28.2	36.0	10.5
	Kaolinite	2.7	18.8	0.0	0.0	26.5	25.0
	Vermiculite	-	-	-	10.0	-	-
	Pyrophyllite	-	-	5.0	-	12.0	-
	Feldspath K	14.0	3.5	5.0	3.7	3.8	0.3
	Quartz	74.2	48.3	70.1	49.3	16.9	54.8
Other minerals	Anatase	0.1	0.6	0.6	0.5	1.0	-
	Calcite	0.2	0.0	-	7.0	0.0	0.0
	Anorthite	0.0	1.9	0.1	0.0	0.0	0.0
	Albite	0.0	1.0	8.3	0.0	3.3	1.5
	Dolomite	0.2	0.0	0.0	1.0	0.6	0.0
Total		99.9	100.1	100.1	100.0	100.0	100.0

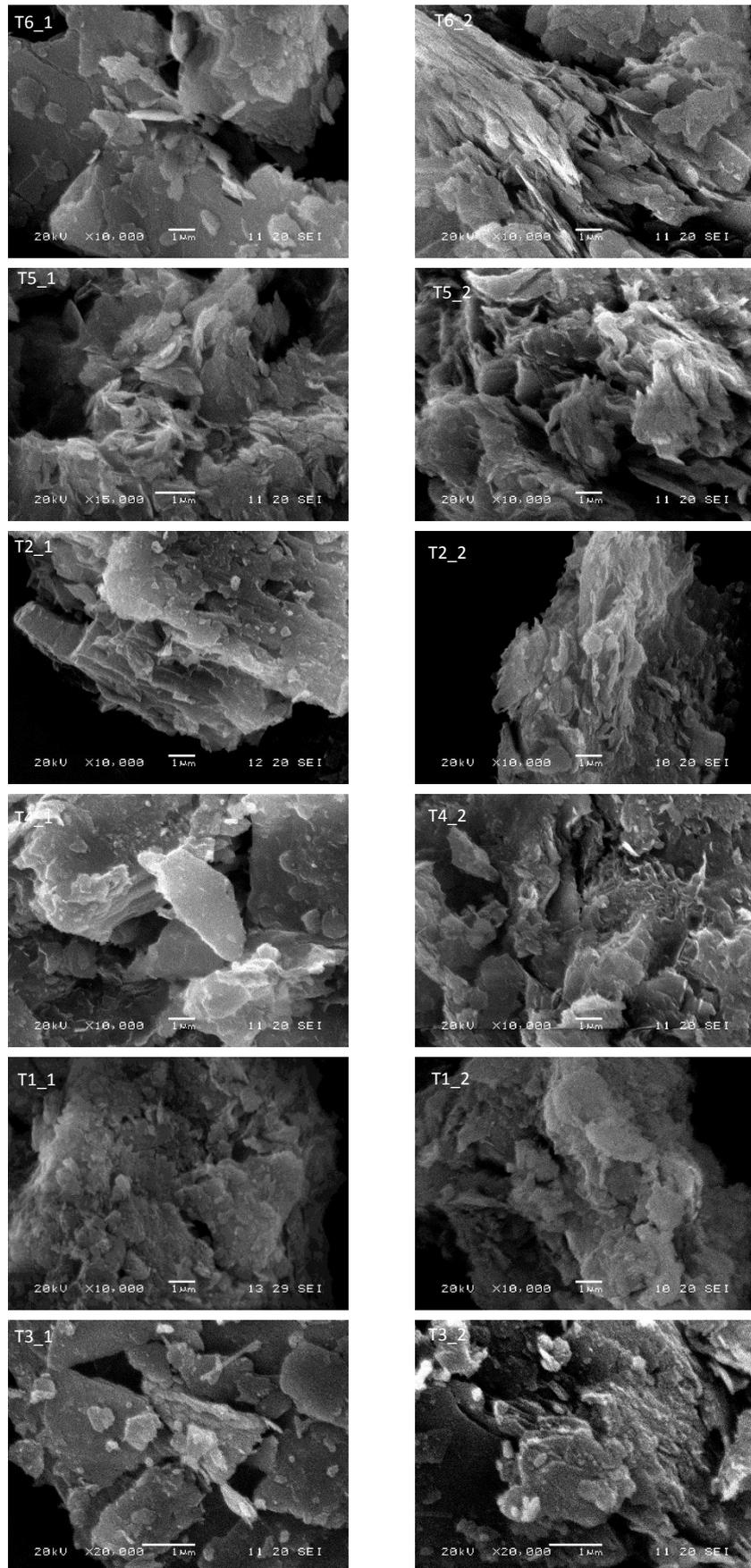


Figure 1-19: Image MEB des six terres à l'étude.

1.4.3 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, un travail de discussion sur les méthodes de caractérisation des terres pour la construction a été mené. La stratégie développée pour collecter des terres pouvant couvrir une grande plage de variabilité a amené à parcourir une zone géographique importante, répartie sur la région Bretonne et Normande. Ainsi, 28 terres ont été collectées. Afin de visualiser cette ensemble important d'échantillons, une matrice de consistance a été développée et utilisée. Celle-ci a permis de rassembler différentes caractéristiques géotechniques des terres sous une simple observation qualitative, et ainsi classer les différentes terres selon un degré d'attachement de ses grains.

Les méthodes de caractérisation choisies ont ensuite été utilisées pour étudier les 28 terres. Parmi celles-ci, 6 ont été choisies pour représenter l'ensemble. Elles se caractérisent notamment par une granulométrie très variable (taux d'argile de 10 à 50%, taux de sable de 3 à 83%), et une CEC allant de 4 à 22 $\text{cmol}^+.\text{kg}^{-1}$. Le caractère représentatif de ces terres est présenté sous la forme d'un graphique synthétique de données (Figure 1-17). Les résultats sont comparés aux données des sols de Bretagne : le degré de représentativité est bon. Les 6 terres ont fait l'objet d'études plus approfondies, notamment à travers des essais de diffraction par rayon X. Ceux-ci ont permis de définir et quantifier la nature minéralogique des argiles présents dans les terres choisies. Cette méthode a aussi permis d'avoir un autre angle de quantification du taux d'argile, notamment en observant la minéralogie du passant à 63 μm . À cette taille, d'autres minéraux hors argiles sont présents et perturbent ainsi la quantification du taux d'argile.

2 CHAPITRE 2 : CARACTÉRISATION DES CHÈNEVOTTES

2.1 GÉNÉRALITÉS ET CARACTÉRISATION DU CHANVRE

2.1.1 GÉNÉRALITÉS

L'histoire de la relation de l'homme avec cette plante est millénaire. Elle remonte à la révolution néolithique, lorsque les premiers sédentaires ont initié des travaux agricoles [100]. Avec le lin, le chanvre fait partie des premières plantes domestiquées et cultivées, notamment pour ses graines pouvant être utilisées lors de rituels [100] ou simplement pour la fabrication de vêtements [37,100].

Plus tard, au 1^{er} siècle après JC, Les Romains de la Gaule Transpadane (actuellement le Nord de l'Italie) décrivent les techniques de cultures et d'utilisation de la plante à travers les récits de Pline l'Ancien [101]. Il y est toujours question de textile, mais aussi de cordage et voilage.

En Europe, des sites historiques montrent la présence de cultures de chanvre à l'époque médiévale [102–104]. Les fibres sont appréciées pour leur résistance mécanique et leur durabilité [37]. Ces caractéristiques font des fibres de chanvre le matériau idéal pour la fabrication des cordages et voiles de navires [37,104].

La présence de bassins ou de rivières sur ces mêmes sites indique la technique utilisée pour extraire les fibres de la tige. Des bottes de chanvres étaient laissées dans l'eau entre 3 et 8 jours [104]: c'est le rouissage. Il est alors plus facile de séparer l'écorce et la fibre du reste de la tige. Le matériau utilisé dans notre étude, la chènevotte, est issu du corps de la tige. Il n'était peu ou pas valorisé à cette époque, et les méthodes d'extraction alors utilisées réduisaient la chènevotte en poussière [104].

Il faut attendre la période du bas Moyen Age au XIV^{ème} et XV^{ème} siècle pour voir le chanvre se développer de manière industrielle [37]. La plante est à cette période particulièrement utilisée pour le développement d'une flotte de bateau, mais aussi pour la fabrication de papier (écriture, cigarettes).

L'arrivée et le développement, sous l'impulsion de la colonisation, des fibres de coton puis des fibres pétrosourcées (Nylon et polyester) font apparaître une concurrence importante au chanvre, dont l'utilisation va décroître progressivement [37]. En France, 176000 ha étaient cultivés en 1840. En 1936, la surface n'est plus que de 3400 ha. Des réglementations strictes apparaissent pour limiter l'usage et la vente de la plante comme narcotique. Ces effets sont dus à la présence de THC (TétraHydroCannabinol). Le chanvre est soumis aux réglementations française et européenne autorisant dans l'Union Européenne uniquement la culture de variétés présentant un taux de THC inférieur à 0,2%.

Depuis les années 90, un renouveau du chanvre est observé en France. Cela résulte de l'augmentation du prix du pétrole et d'une prise de conscience environnementale. En 2003, la France produit 50% du chanvre européen. Une part non négligeable qui ne cesse d'augmenter puisqu'en 2016, environ 15000 ha de chanvre ont été plantés (+20% par rapport à 2015). Le chanvre est aujourd'hui valorisé totalement, et son intérêt dans les cultures est considérable. La culture du chanvre nécessite très peu d'intrants et constitue un bon précédent cultural grâce à sa racine pivotante. Au fur et à mesure de la croissance, la plante perd ses feuilles. Elle crée ainsi un paillis qui permettra le retour de 40% à 70% des nutriments au sol [105].

Le chanvre, i.e *Canabis Sativa L.* est une plante annuelle de la famille des *Cannabaceae*. Elle peut atteindre entre 2 et 4 mètres de hauteur, tandis que la tige a un diamètre variant entre 0,6 et 4,5 centimètres [37]. Ces simples caractéristiques dimensionnelles peuvent varier selon la date de semis, les densités de plantation, l'espèce plantée et le sol [106]. La Figure 2-1 présente les différentes parties caractéristiques d'un plant de chanvre [102].



Figure 2-1: Présentation des différentes parties d'une plante de chanvre: feuille, fleurs, tige et graine [4].

Cette plante est dite dicotylédone. Ce terme décrit étymologiquement les deux « pré-feuilles » ou cotylédon, présentes dans la graine et aux premiers jours de sa croissance. Les dicotylédones présentent en leur tige du cambium, responsable de la formation de bois (xylème) vers l'intérieur et du liber (phloème), responsable de la formation de fibres (formant l'écorce) vers l'extérieur. Une vue de la section de la tige avec ces différents composants est présentée en Figure 2-2. En terme de volume de chaque composant de la tige, l'épiderme et les fibres occupent seulement 10 % de la section, tandis que le xylème en occupe plus de 85 % [107]. La chènevotte, matière végétale principale de notre étude, est issue de cette partie de la tige.

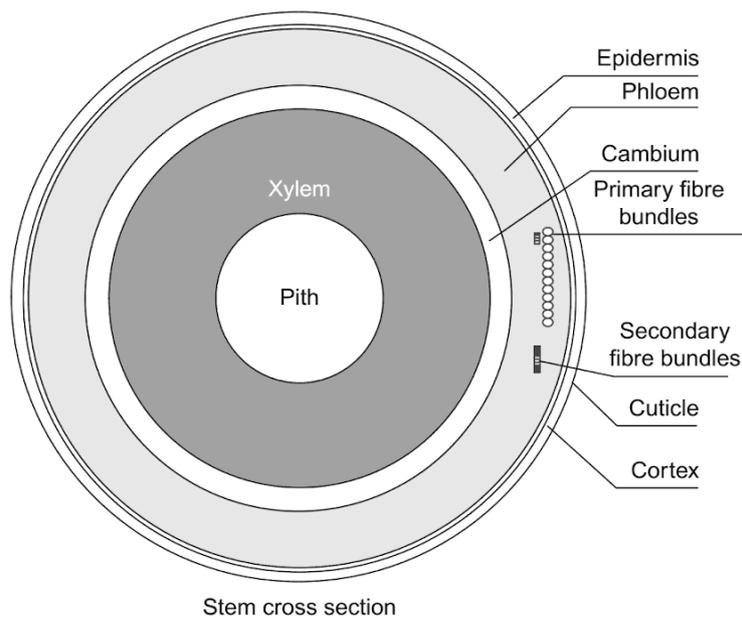


Figure 2-2: Section d'une tige de chanvre [8].

TECHNIQUES DE PRODUCTION DU CHANVRE

Différentes méthodes existent pour la production de la chènevotte. Elles se décomposent en plusieurs étapes, et chaque étape est différente en fonction de l'échelle de la production (industrielle ou artisanale).

La première étape de la méthode industrielle, le fauchage (Figure 2-3, gauche), consiste à couper les tiges de chanvre au ras du sol et de déposer les tiges au sol, en andains. Ensuite suit une phase de rouissage, combinant les actions de la pluie, de la lumière et des microorganismes provenant du sol et permettant la décomposition des pectines liant les fibres de chanvre entre elles. Ceci a pour but d'optimiser le défibrage ultérieur. Après 2 à 3 semaines de rouissage, les tiges sont mises en bales afin d'être transportées jusqu'à une chanvrière pour procéder à l'extraction des fibres (défibrage) grâce à l'action de broyeurs à marteaux ou à couteaux. La phase de rouissage peut être évitée selon la qualité de la fibre souhaitée et les marchés de ventes visés.



Figure 2-3: Gauche, Moisson du chanvre (crédits Philippe Lambert); Droite, ensilage du chanvre (crédits Laure Chazelas)

Concernant la production artisanale, deux méthodes peuvent être décrites. Celles-ci sont utilisées par les membres de l'association Chanvriers en Circuits Courts (3C) : la méthode utilisée par Eco-Pertica est très proche de la méthode industrielle. Le procédé de transformation utilisé est le suivant : les tiges de chanvre sont broyées à l'aide d'un bol broyeur, puis le broyat est passé sur une chaîne de tamis vibrants successifs, permettant à la fois de séparer la chènevotte de la fibre et d'obtenir plusieurs granulométries : fine, moyenne et grossière.

Enfin, la dernière méthode consiste à utiliser des machines d'ensilage (Figure 2-3, droite). L'ensilage considéré ici est une méthode de récolte utilisant une ensileuse (ou faucheuse-hacheuse-chargeuse) permettant comme son autre nom l'indique de faucher, hacher ou broyer l'ensemble de la plante (fibres et chènevottes ensemble) puis de charger le broyat dans une benne (Fig. 2-3). Ensuite, les longues fibres restantes ainsi que les chènevottes de grandes dimensions sont séparées du reste par l'utilisation d'un trommel.

Selon les méthodes de transformation décrites, 4 produits sont extraits de la plante. La Figure 2-4 présente l'ensemble de ces produits ainsi qu'une liste non exhaustive des domaines de valorisation correspondants. Considérer l'ensemble de ces produits rend compte de l'importante part de co-produits, ou de déchets lorsqu'une seule partie de la plante est exploitée. Par exemple, le chènevis (graine) et les fibres représentent une valeur financière importante en France, et le chènevis est le premier co-produit valorisé [108]. La chènevotte et la poussière sont ainsi des co-produits à valoriser, malgré leurs volumes beaucoup plus importants.

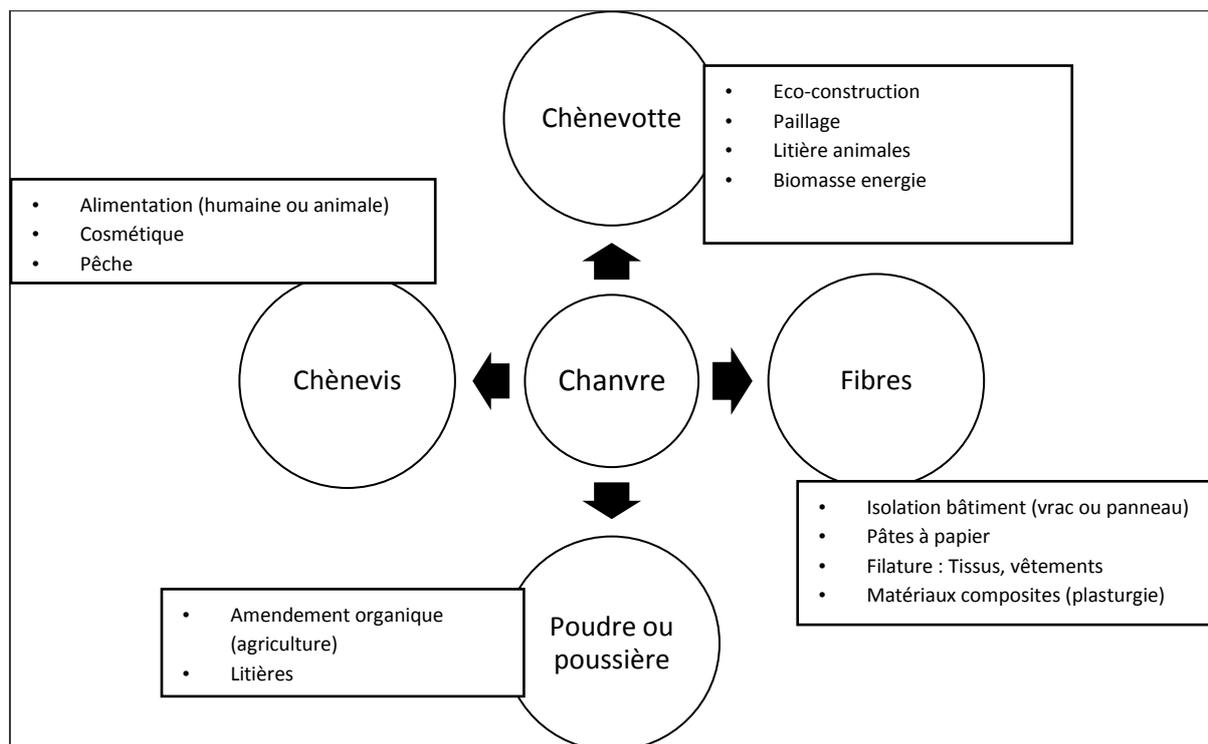


Figure 2-4: Présentation des produits issus du chanvre et de leur domaine de valorisation.

2.1.2 MICROSTRUCTURE ET ORIGINE DU POUVOIR ISOLANT THERMIQUE

Le xylème, partie de la plante dont sont extraites les chènevottes, est un tissu largement représenté dans les plantes et est organisé en différents types de cellules :

- Cellules conductrices de sève brute de 2 types -1) des vaisseaux qui peuvent être ponctués ou réticulés -2) des trachéides annelées ou spiralées
- Cellules fibreuses ligneuses
- Cellules parenchymateuses ligneuses

La Figure 2-5 présente des images réalisées au Microscope Électronique à Balayage (appareil JSM-IT100 de la marque JEOL) d'une particule de chènevotte, issue d'un chanvre utilisé durant cette étude.

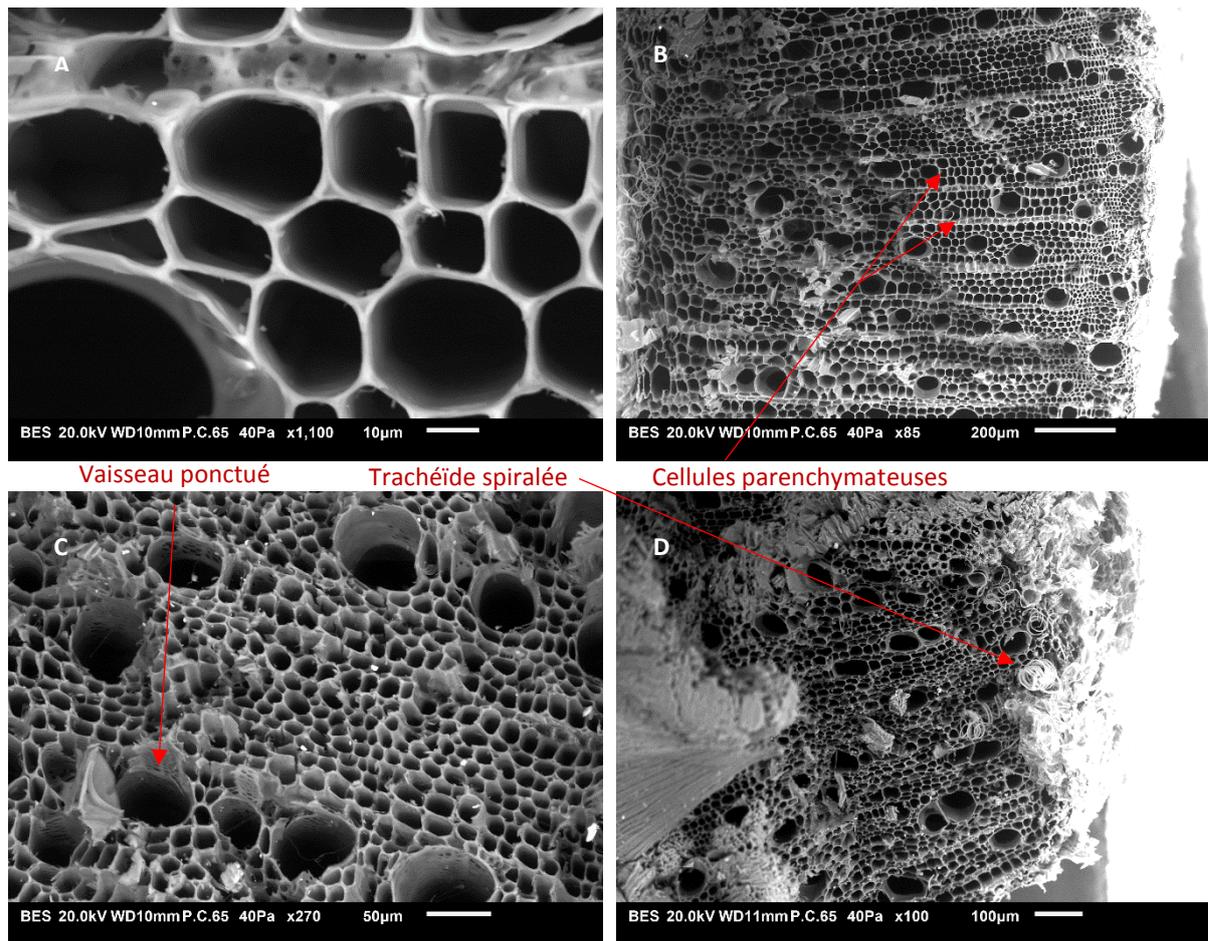


Figure 2-5: Vues à différents grossissements d'une coupe transversale de particule de chènevotte. Les conditions d'imageries sont présentées sous chaque image.

Les 4 images de la Figure 2-5 permettent d'observer la forme et la taille des principaux types de cellules présentes au sein d'une particule de chènevotte :

- Des cellules parenchymateuses, disposées en rangées bien alignées. Deux types de ces cellules sont visibles. En grande majorité, nous retrouvons des cellules avec un diamètre de l'ordre de 30 μm . Et intercalées toutes les 3-4 rangées de ces cellules, nous pouvons distinguer des cellules allongées avec une largeur de l'ordre de 10 μm et une longueur de l'ordre de 30-40 μm .
- Des vaisseaux ponctués et peut-être des trachéïdes spiralées, moins nombreux, de diamètre compris entre 40 et 50 μm .

Cette présentation de la structure des chènevottes rend compte de leur caractère hautement poreux. Ces pores, une fois la matière sèche, enferment de l'air. La structure et l'air enfermé forment alors un matériau léger et lui confèrent des propriétés d'isolation thermique qui peuvent être quantifiées par des mesures de conductivité thermique. La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1K par mètre. La Figure 2-6 présente les conductivités thermiques de nombreux matériaux de construction en fonction de leur masse volumique : matériaux conventionnels ou traditionnels, bio-sourcés ou non, du matériau porteur jusqu'au matériau de finition en passant par le matériau isolant. Selon cette même figure, la capacité d'un matériau à conduire la chaleur est directement liée à sa masse volumique, ou plutôt à sa fraction volumique solide. Pour un même volume, plus un matériau contient de solide, moins il est poreux, et moins il est isolant thermiquement. Ainsi, la structure alvéolée

d'une chènevotte optimise le volume pris par les parois, confortant l'idée que ce matériau est isolant. Selon la Figure 2-6, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité du matériau met en évidence une densité optimale. En effet, autour de 100 kg/m³, quelle que soit la nature du matériau, la conductivité est minimale. En dessous et au-delà de cette densité, la conductivité remonte, ce qui signifie que le pouvoir isolant thermique du matériau diminue.

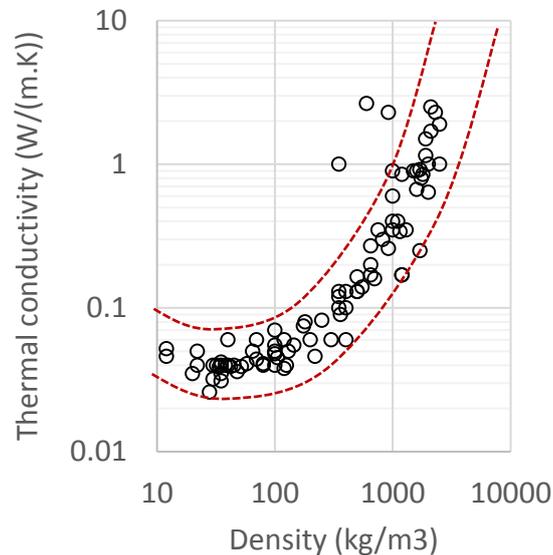


Figure 2-6: Conductivité thermique versus masse volumique de nombreux matériaux de construction. Données issues de « l'isolation thermique écologique » [109].

2.1.3 APPLICATIONS

La chènevotte, utilisée comme isolant, peut être mise en œuvre de différentes façons. Cette étude développe seulement des connaissances scientifiques sur l'utilisation de chènevotte mélangée à la terre pour réaliser de la terre allégée. Néanmoins, il existe des modes constructifs permettant d'utiliser la chènevotte en vrac. La mise en œuvre se fait ainsi par voie sèche. Il est alors possible d'utiliser les chènevottes comme matériau de remplissage, par exemple en les déversant entre lambourde dans un plancher perdu. Mais l'intérêt des chènevottes à être résistantes mécaniquement peut aussi être utilisé pour la réalisation de dalles sèches. Les chènevottes sont aussi déversées en vrac, tassées, puis la surface est aplanie pour recevoir directement un plancher.

Au final, l'utilisation d'un liant permet d'aller vers des modes constructifs nécessitant un matériau qui ne se déverse pas une fois sec, et présente une résistance mécanique suffisante pour s'auto-porter. C'est notamment le cas pour le remplissage de parois verticales ou obliques sans coffrages perdus.

2.1.4 DESCRIPTION DU MATÉRIAU UTILISÉ

Les chènevottes utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau 2-1. Deux chènevottes (C1 et C2) proviennent du même lot (même récolte, même parcelle). C1 est une chènevotte dite « moyenne ». C2 est une chènevotte dite « grossière ». Pour ces deux chènevottes, la production est artisanale. C3 est issue d'une production industrielle. Très peu d'informations de culture et de récolte sont connues sur cette dernière.

Tableau 2-1 : Caractéristiques de culture et de récolte des chènevottes étudiées.

	C1	C2	C3
Producteur	Eco-Pertica	Eco-Pertica	Chanvribât
Lieu	Basse-Normandie	Basse-Normandie	-
Variété	fedora17	fedora17	-
Densité semis (kg/ha)	50	50	-
Date de récolte	2013	2013	-
Technique de récolte	battu	battu	battu
Procédé de transformation	broyé + tamis	broyé + tamis	broyé

La Figure 2-7 illustre par des photos de vrac les trois chènevottes utilisées. L'observation visuelle d'une chènevotte permet une première caractérisation qualitative, c'est à dire :

- Avoir une première approche qualitative de la granulométrie (C3 paraît plus fine que C1 et C2)
- Détecter la présence de fibres (C2)
- Constaté des différences de couleurs. Une chènevotte sombre ou grisâtre a probablement un degré de rouissage plus important (C1 et C2 plus rouies que C3) [110]



Figure 2-7: Photos des chènevottes en vrac.

2.2 DÉFINITIONS ET MÉTHODES DE CARACTÉRISATION

Les principales méthodes de caractérisation de granulats végétaux ont été construites grâce à des travaux de la Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (RILEM) [111–113]. Ces méthodes sont ensuite reprises et décrites dans les documents de Construire en Chanvre [112]. Ce paragraphe reprend en partie ces documents pour décrire précisément les méthodes utilisées pour caractériser les chènevottes à l'étude. Notamment pour la granulométrie, l'absorption d'eau, la masse volumique apparente. Étant donné le caractère récent des études scientifiques sur les granulats biosourcés, ces méthodes peuvent évoluer et la variabilité des méthodes de mesure induit des variabilités dans les résultats obtenus. Ainsi, dans cette étude, la caractérisation des chènevottes à deux objectifs : 1) Optimiser

les protocoles de caractérisation en fixant précisément les paramètres de mesures afin de mieux rendre compte des différences dans les propriétés des chènevottes ; 2) Étudier l'influence de la variabilité des propriétés des chènevottes sur les performances d'un matériau terre-chanvre.

2.2.1 GRANULOMÉTRIE

Deux méthodes permettent aujourd'hui d'étudier la granulométrie des granulats végétaux : le tamisage et l'analyse d'image. V.Picandet et al. montrent que le tamisage discrimine les particules selon leur largeur [114]. Or la particule de chanvre a principalement une forme parallépipédique rectangle. De manière à pouvoir étudier la longueur et la largeur, la méthode par analyse d'image est préférée à celle du tamisage. Le protocole est le suivant :

- Quarter l'échantillon jusqu'à obtenir un échantillon d'environ 250 particules
- Peser l'échantillon
- Le disposer sur la surface vitrée du scanner et disperser les particules de façon à ce qu'aucune particule ne se chevauche
- Prendre l'image (résolution minimale de 600 DPI)
- Sur le logiciel Image J®, binariser l'image (noir et blanc) puis contraster l'image jusqu'à distinguer nettement le fond des particules (Figure 2-8)
- Afin d'éviter la comptabilisation des fibres et des poussières, une aire minimum de 0.08mm² et une largeur de 0.1mm sont fixées
- Le logiciel permet ensuite la détection de la plus grande et la plus petite dimension des particules (respectivement longueur et largeur)



Figure 2-8: Exemple de binarisation pour analyse d'image et mesure des longueurs et largeurs de chènevottes.

Trois différents échantillons par type de chènevotte ont été analysés, de manière à produire une caractérisation statistiquement robuste basée sur 700 à 850 particules. La méthode est satisfaisante puisqu'elle a permis d'atteindre, par exemple, un écart type sur les longueurs moyennes inférieur à 5%.

2.2.2 TAUX DE FIBRES ET TAUX DE POUSSIÈRES

Les méthodes de production des fibres de chanvre et de la chènevotte ne permettent pas des taux de pureté de 100%. Les chènevottes présentent un taux de fibres variable. Un des documents « bio-aggregates based building materials » de la RILEM [115] indique qu'un tamisage permet de séparer les fibres des chènevottes, les fibres se regroupant en boules à cause des vibrations. Le taux de fibres dans les chènevottes est ainsi mesuré en récupérant manuellement et en pesant l'ensemble des fibres ainsi regroupées. Ces mesures ont été faites en parallèle de la thèse par Eco-Pertica.

Concernant le taux de poussière, il est évalué par pesée des particules au passant à 0,2mm [112] lors du tamisage. Dans notre cas, les tamis à disposition permettent une mesure du passant à 0,25mm. On considère poussière toutes les particules fines, de nature organique ou minérale, dont le diamètre est inférieur à 0,25 mm.

2.2.3 MASSES VOLUMIQUES

Plusieurs types de masse volumique sont mesurables et permettent d'étudier la chènevotte et sa proportion dans un matériau composite. La Figure 2-9 est un schéma représentant des chènevottes disposées en vrac dans un volume donné. Y sont présentées les différentes fractions volumiques identifiables [116,117] comprises dans ce volume ainsi que les différents types de porosité et leurs dimensions :

- La fraction volumique constituée par les parois cellulaires végétales de la chènevotte ;
- La fraction volumique de l'air entre les particules, ou la porosité interparticulaire, qui est due à l'empilement vrac des chènevottes. Ces pores ont des dimensions de l'ordre du millimètre ;
- La fraction volumique de l'air dans les particules, ou la porosité intraparticulaire, avec des diamètres de pores allant généralement de 3 à 10 nm pour les mésopores, à 0,1-1 µm et 20-80 µm pour les macropores [116,118].

La masse volumique apparente, dont la mesure est définie dans les documents de la RILEM [111], est calculée en considérant le volume apparent occupé par une certaine masse de particules. Le volume apparent contient les particules, les pores inter et intraparticulaires.

La masse volumique particulaire tient compte de la masse et du volume des particules. Les pores interparticulaires ne sont ainsi pas comptés dans le volume. Le rapport sur les matériaux biosourcés pour le bâtiment de la RILEM de 2013 [113], indique la possibilité d'utiliser l'analyse d'image couplée à une mesure manuelle de la hauteur des particules. Le volume des particules est ensuite calculé en considérant une section rectangulaire constante le long des particules. Or, la section des particules est concave et non constante. Les résultats indiqués dans la littérature ne prennent pas en compte cette notion.

Enfin, la masse volumique des parois peut être mesurée au pycnomètre. Le volume considéré ne comprend donc ni les pores inter ni intraparticulaires. Les recommandations de la RILEM [112] proposent une mesure au pycnomètre, utilisant du toluène en fluide permettant de combler les pores. Dans cette étude, les mesures ont été réalisées au pycnomètre à gaz (argon), sur un appareil Pycnomatic Evo de la marque Thermoscientific. Les échantillons testés sont des poudres, broyées à l'aide d'un mini-broyeur mécanique équipé d'un tamis de 500µm. Le broyage permet notamment d'accéder aux porosités fermées. Concernant les chènevottes, deux méthodes de broyage ont été testées : 1) La chènevotte est broyée jusqu'à ce que l'ensemble des particules traverse le tamis ; 2) l'action 1 est répétée une deuxième fois.

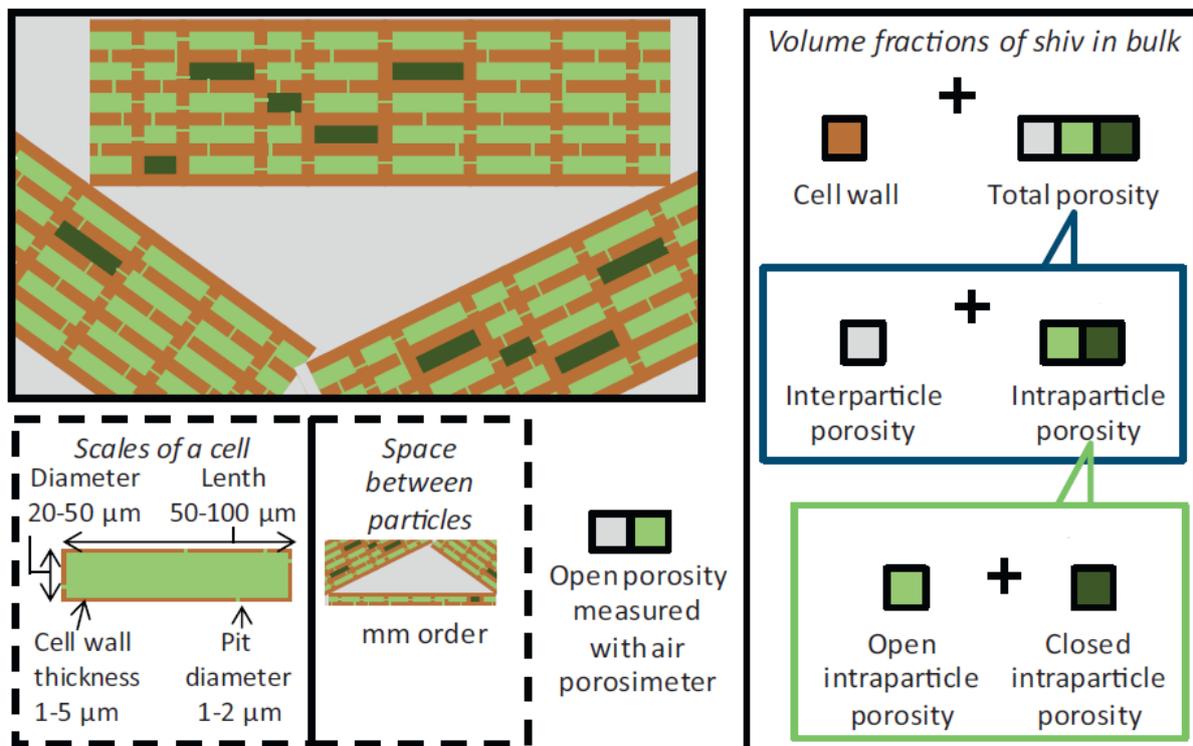


Figure 2-9: Représentation des différents types de fractions volumiques de chènevottes en vrac, comprenant les porosités inter et intra particulaires, ouvertes ou fermées [18].

2.2.4 COMPOSITION CHIMIQUE

Un compte rendu des différentes méthodes d'extraction des différents composés chimiques de plantes est établie dans le rapport RILEM cité précédemment [112]. Les méthodes décrites sont multiples et font notamment varier les paramètres suivants : Température de séchage, nature des solvants d'extraction, temps d'extraction, masse de l'échantillon testé. L'influence des différents paramètres sur les résultats est présenté par Krasznai [119]. L'auteur conclut que selon la méthode utilisée, les différents composants peuvent être sous-estimés ou surestimés. Dans cette étude, l'analyse des composants chimiques de nos matériaux végétaux sera réalisée d'après la méthode Van Soest [120–123]. 4 grandes familles de composés biochimiques sont distinguées : les extractibles en milieu neutre, les hémicelluloses, la cellulose et la lignine. La méthode est fondée sur l'insolubilisation successive des composés biochimiques recherchés dans les réactifs d'extraction utilisés. L'ensemble de la méthode ainsi que les solvants nécessaires à l'extraction de chaque composé biochimique sont décrits dans la Figure 2-10. L'appareil utilisé est de type fibertecTM8000 de la marque FOSS.

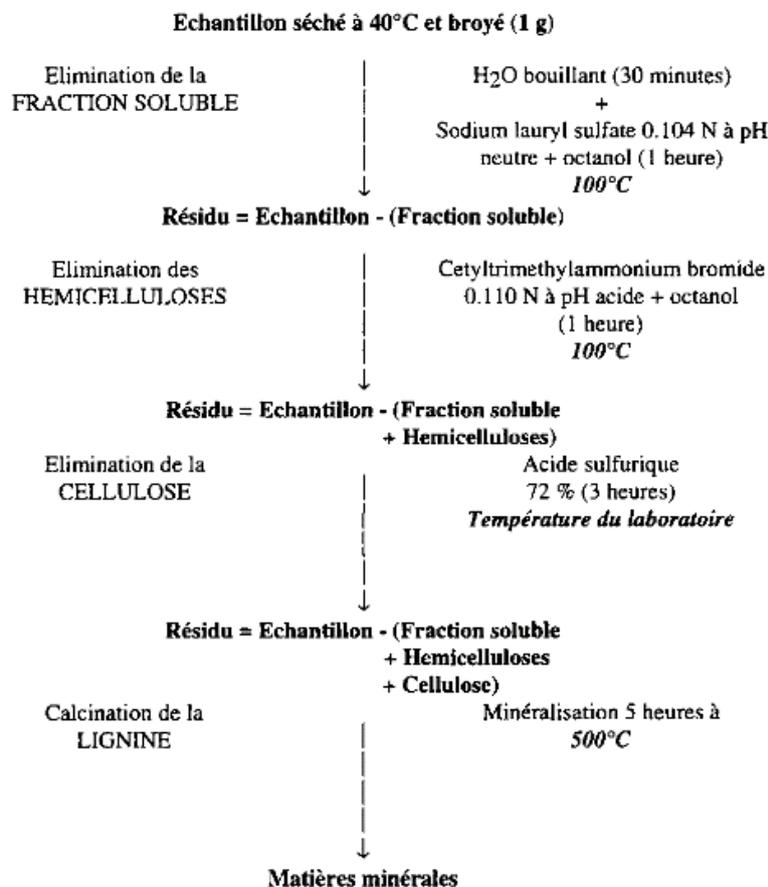


Figure 2-10: Technique d'extraction des composants biochimiques de matière organique, selon [123]

2.2.5 ABSORPTION D'EAU

La méthode de détermination de la capacité des chènevottes à absorber de l'eau liquide est aussi décrite dans les recommandations de la RILEM [124]. Dans notre cas, les différents échantillons testés ont été placés dans des tissus microporeux avant d'être immergés. Pour chaque essai, trois répétitions ont été réalisées. Le protocole d'essai est le suivant :

- La chènevotte est séchée à 60°C jusqu'à stabilisation de sa masse ;
- Des échantillons de 100g sont préparés et placés dans les tissus microporeux synthétiques fermés par un lien ;

- Les échantillons (1 par point de mesure, c'est à dire, un par durée d'immersion) sont immergés dans un bac d'eau et le chronomètre est déclenché ;
- À chaque durée d'immersion définie (1, 2, 10, 30 et 60 minutes, puis 24 et 48 heures), l'échantillon est sorti du bac et essoré durant 1 min 30 et enfin pesé ;
- Le gain de masse correspond à l'absorption de l'échantillon.

2.3 RÉSULTATS

Dans le cadre du projet ECO-TERRA, 19 chènevottes différentes ont été caractérisées. Parmi celles-ci figurent les 3 chènevottes présentées dans cette étude (C1, C2 et C3). 18 des 19 chènevottes proviennent de chanvriers ou d'agriculteurs, disposant d'un outil de transformation. Ces producteurs font partie de l'association Chanvriers en Circuits Courts (3C). La production des chènevottes est artisanale et suit les définitions décrites dans le paragraphe traitant des techniques de production du chanvre. C1 et C2 font partie des 18 chènevottes artisanales. C3 est issue d'une production industrielle. Plusieurs paramètres tels que la granulométrie, le taux de poussières, la masse volumique apparente et enfin l'absorption d'eau ont été étudiés.

2.3.1 GRANULOMÉTRIE

La Figure 2-11 présente la répartition granulométrique des 3 chènevottes à l'étude. Y sont représentées les longueurs (l) et les largeurs (L) des particules. C1 et C3 présentent des largeurs comparables entre 0.2 et 4mm, mais des longueurs différentes. C2 a une largeur supérieure aux autres, entre 0.4 et 9mm. Les longueurs des chènevottes C1 sont comprises entre 2 et 25mm, lorsque les longueurs des chènevottes C3 sont légèrement inférieures (entre 1.5 et 20mm) et les chènevottes C2 peuvent aller jusqu'à 45mm.

Les trois chènevottes présentent ainsi trois granulométries différentes : C1 est dite « standard », C2 est dite « grossière » et C3 est dite « fine ».

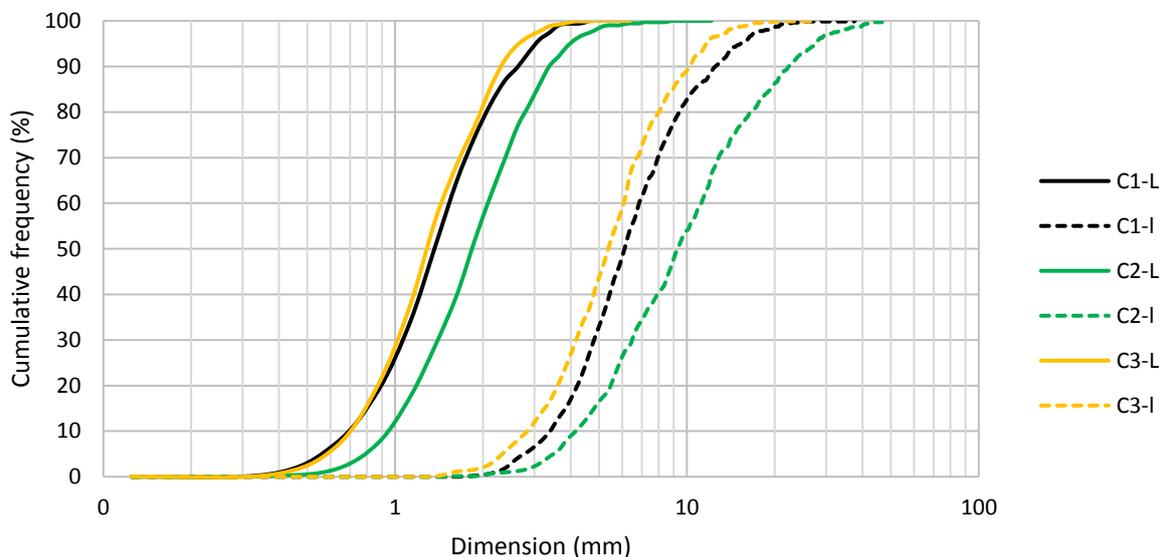


Figure 2-11 : Longueur (l) et Largeur (L) des chènevottes C1, C2 et C3 par analyse d'image.

Les Figure 2-12 et Figure 2-13 présentent une comparaison des dimensions moyennes et des élongations des chènevottes produites par les Chanvriers en Circuits Courts et étudiées dans le projet Chanvrisol (19 chènevottes), aussi piloté par Eco-Pertica. L'élongation se définit comme le rapport de la longueur sur la largeur des particules. Les chènevottes de notre étude, placées en rouge sur chaque graphique, tracent des zones

permettant d'observer leur représentativité de la variabilité de l'ensemble des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les longueurs des chènevottes C1, C2 et C3 varient entre 6 et 11.6mm tandis que les longueurs de l'ensemble des chènevottes varient entre 4.3 et 18mm. De même, les largeurs de nos trois chènevottes varient entre 1.5 et 2.2mm tandis que celles des autres chènevottes varient entre 1.1 et 2.2mm. Pour finir, les élongations des trois chènevottes étudiées dans la thèse varient entre 4.2 et 5.7 mm lorsque l'ensemble des chènevottes varient entre 3.9 et 8.3mm.

Ainsi, la représentativité des échantillons choisis est estimée correcte étant donné que seulement 4 chènevottes sur 19 présentent des longueurs ou des largeurs non couvertes par nos 3 chènevottes. Concernant l'élongation, seulement 5 chènevottes présentent des plus grandes ou plus petites que C1, C2 et C3.

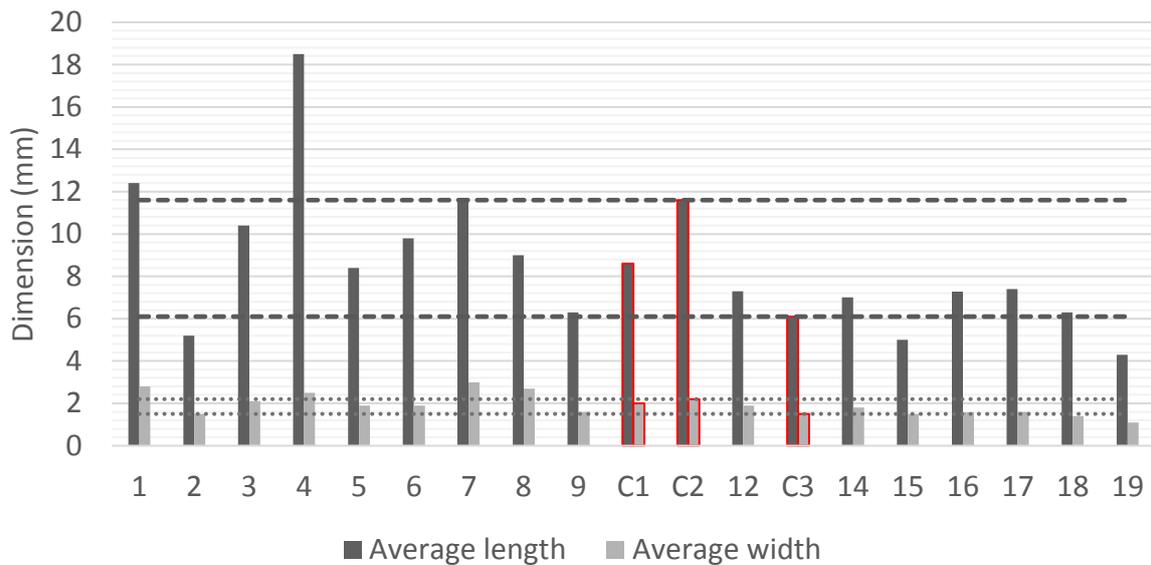


Figure 2-12: Longueur et largeur moyennes des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont encadrées en rouge, leurs zones de représentativité de leur variabilité sont en traits pointillés.

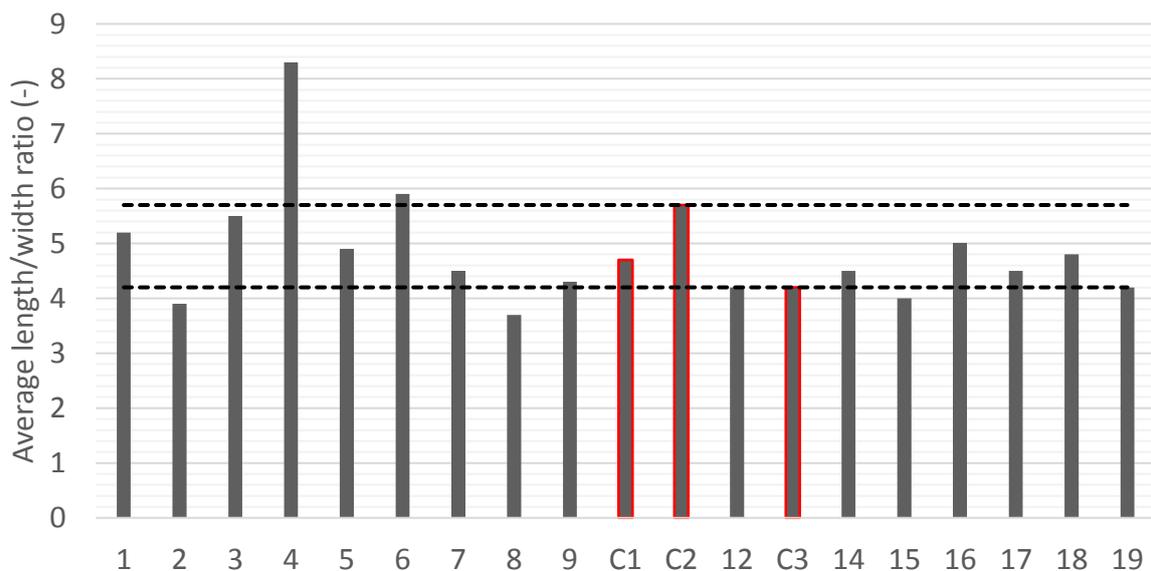


Figure 2-13: Élongation moyenne des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité de leur variabilité est en traits pointillés.

2.3.2 TAUX DE FIBRES

Les taux de fibres des trois chènevottes à l'étude sont présentés en Figure 2-14. Ce taux varie entre 1,2 et 6,2% en fonction des chènevottes. Sont aussi représentées les répartitions entre fibres courtes (<1 cm) et fibres longues (>1 cm). C2 contient le plus grand taux de fibre et la plus grande part de fibres longues. C3 présente un taux de fibres relativement élevé (4,2%) dont très peu de fibres longues (<1%). Cette dernière est issue de la filière industrielle.

Ainsi, la présence de fibres n'est pas directement liée à la technicité industrielle mise en œuvre pour la production de la chènevotte. En revanche, plusieurs paramètres liés au choix de la méthode de production peuvent être relevés :

- La méthode d'extraction des fibres. Dans notre cas, seul le broyage mécanique a été utilisé.
- Le tamisage. C1 et C2 sont issues du même lot mais de différents tamis. Il apparaît alors que durant le procédé de production, une partie des fibres restent accrochées aux chènevottes grossières.

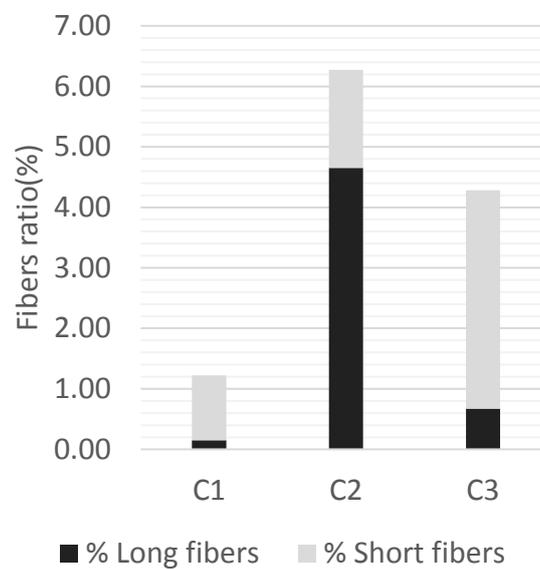


Figure 2-14: Taux de fibres des chènevottes à l'étude, incluant la répartition entre fibres longues et fibres courtes.

2.3.3 TAUX DE POUSSIÈRES

Les taux de poussières de C1, C2 et C3 sont comparés aux taux de poussières des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts en Figure 2-15. 4 chènevottes (sur 19) des Chanvriers en Circuits Courts présentent des taux de poussières très importants, jusqu'à 8%. Les chènevottes à l'étude varient seulement entre 0.1 (plus basse valeur de l'ensemble) et 0.7%. Cependant, le taux de représentativité de la variabilité du taux de poussière des chènevottes C1 à C3 reste élevé.

Les procédés de production de chènevottes artisanaux ou industriels incluent souvent des systèmes d'extraction des poussières. Il est possible que pour certaines des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts le système d'extraction soit manquant ou non efficace.

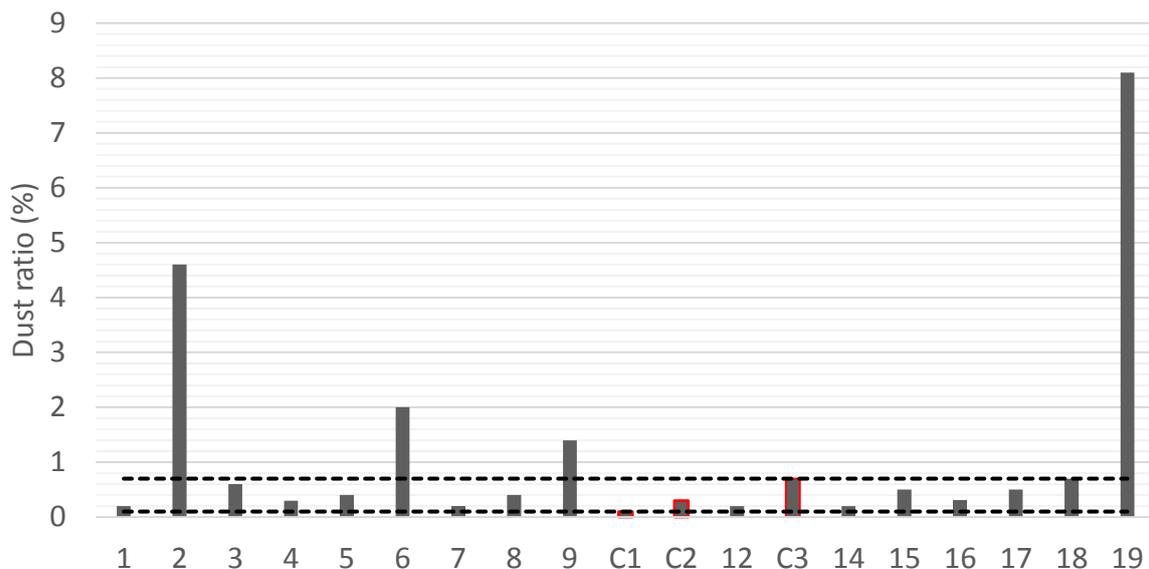


Figure 2-15: Taux de poussières des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.

2.3.4 MASSES VOLUMIQUES

Les valeurs de masse volumique apparente des chènevottes à l'étude sont présentées en Figure 2-16, et comparées aux valeurs des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Ici, seulement une chènevotte dépasse le cadre représenté par C1, C2 et C3. La chènevotte n°2 atteint effectivement 156 kg/m^3 , alors que les autres chènevottes ont une masse volumique apparente variant entre 55 et 122 kg/m^3 .

On constate ici un lien entre masse volumique et taux de fibres. La chènevotte C2 présente un fort taux de fibres longues, tandis que C3 en contient peu (Figure 2-14). Or ici, C2 présente une faible masse volumique apparente, contrairement à C3. Il apparaît ainsi que la masse volumique apparente peut être inversement proportionnelle au taux de fibres longues. Les fibres longues, ou la laine de chanvre, ont une masse volumique aux alentours de 30 à 40 kg/m^3 , donc bien plus faible que la chènevotte.

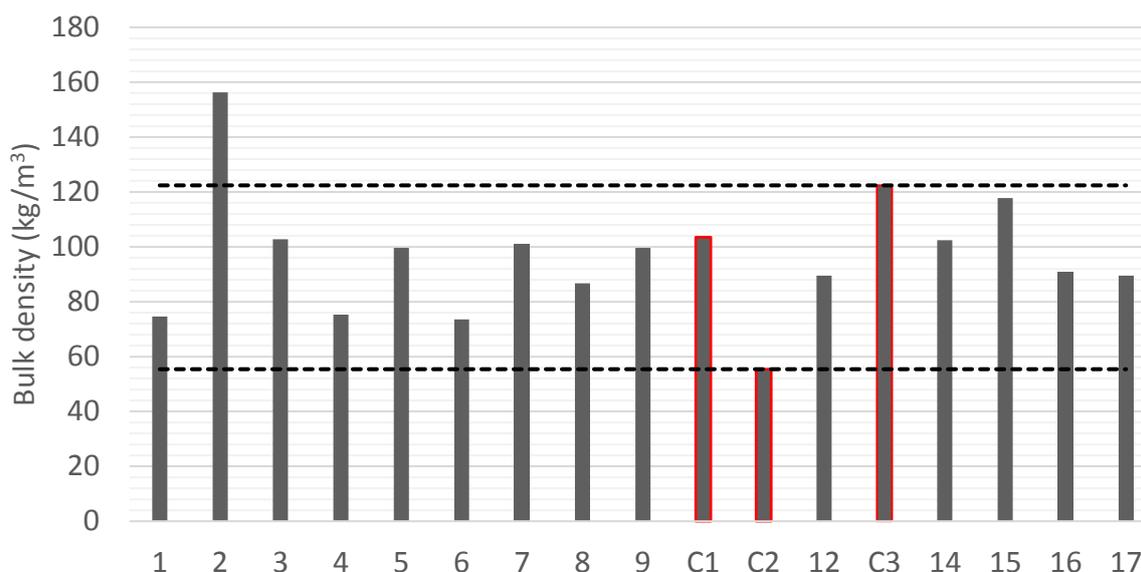


Figure 2-16: Masse volumique apparente des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.

Les résultats de masse volumique des parois sont présentés en Figure 2-17. Concernant les chènevottes, la méthode de broyage est indiquée par leur chiffre (1 : un broyage avec tamis de 500 μm ; 2 : 2 broyages avec tamis de 500 μm) après la référence de la chènevotte. Les résultats des chènevottes sont ici comparés à d'autres végétaux, broyés selon la méthode 1, disponibles au laboratoire lors des essais.

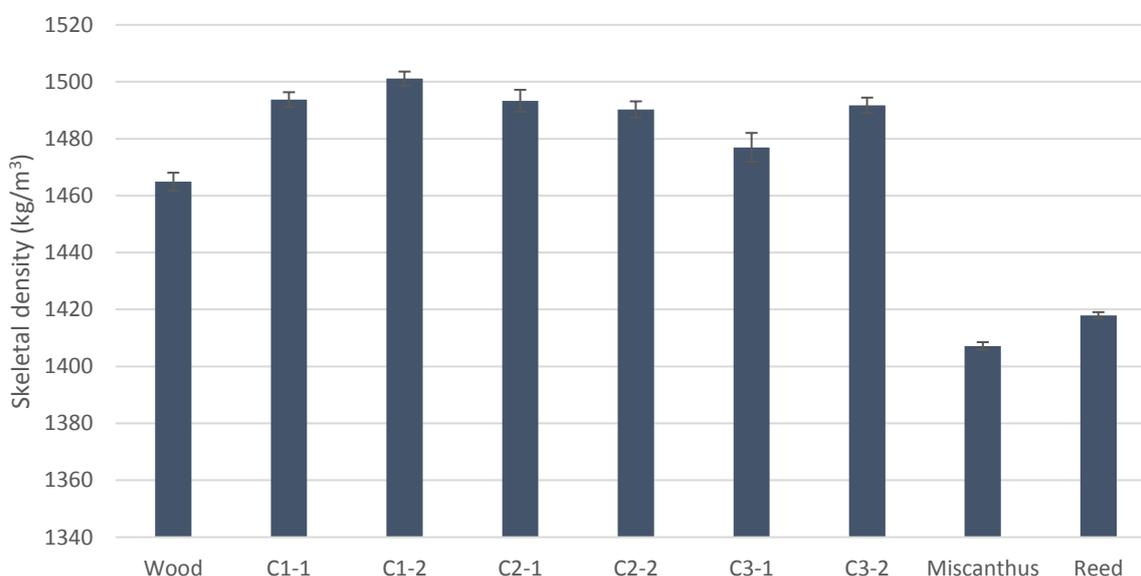


Figure 2-17: Masse volumique des parois des chènevottes à l'étude, présentés avec deux niveaux de broyage différents. Comparaison avec trois autres matériaux végétaux disponibles.

La Figure 2-17 permet de constater que premièrement, le nombre de broyages a relativement peu d'effet sur la valeur de masse volumique mesurée. En effet, pour les chènevottes C1 et C2, la différence observée est du même ordre de grandeur que l'écart type. Deuxièmement, C1, C2 et C3 ont des valeurs très proches. Le type de chanvre ne semble pas influencer la masse volumique des parois. Enfin, miscanthus et roseau présentent des masses volumiques de parois plus faibles que celles du chanvre. Le bois d'arbre présente au final une masse volumique

de parois très proche de celle des chènevottes. En moyenne, pour les 3 chènevottes broyées 2 fois, la masse volumique des parois est égale à 1490 kg/m³.

2.3.5 COMPOSITION CHIMIQUE

La Figure 2-18 illustre les résultats de détermination de la composition biochimiques des chènevottes.

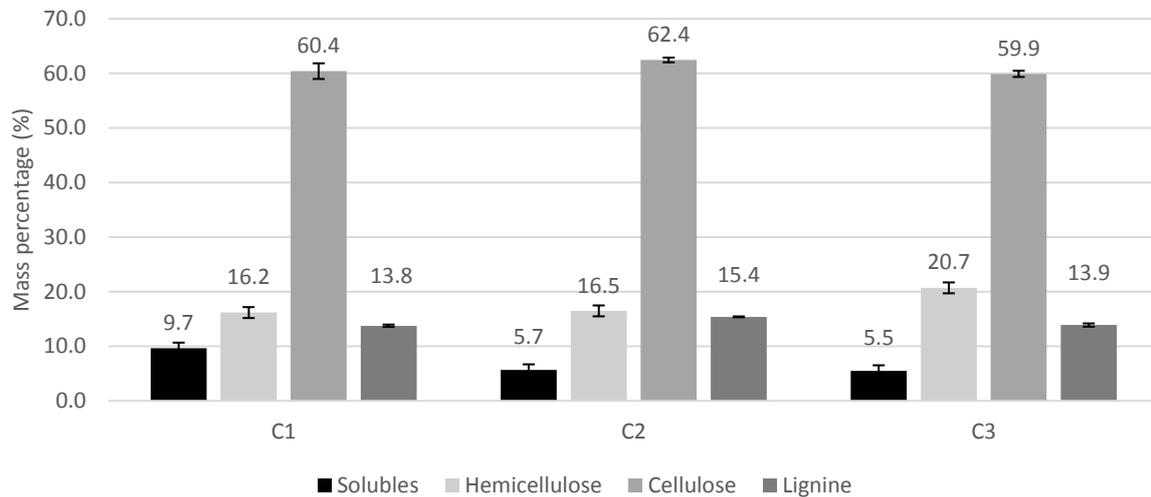


Figure 2-18: Pourcentages massiques des différents composés chimiques des chènevottes, dosés avec la méthode de Van Soest.

Pour l'ensemble des résultats, une bonne répétabilité est observée. Néanmoins, il apparaît qu'il y a une légère différence entre C1 et C2 : les pourcentages de solubles (mesure la plus précise des 4 mesures de l'essai) diffèrent de 4%. Or ces 2 chènevottes sont issues du même lot de production, donc des mêmes plantes. C3 a une composition biochimique légèrement différente. Mais, considérant l'erreur de mesure supérieure à 4% (différences entre C1 et C2), aucune conclusion ne peut être tirée sur la variabilité biochimique des chènevottes. Cette variabilité paraît inférieure à la dispersion des résultats.

Dans la littérature sur le lin, il apparaît que l'espèce, la variété, les variables agricoles comme la qualité du sol, les conditions climatiques, la maturité ou encore le rouissage peuvent affecter la composition chimique de la plante [125]. Mazhoud [126] propose un état de l'art sur la composition chimique des chènevottes et montre que la cellulose peut varier de 36 à 76%, l'hémicellulose de 8 à 37% et la lignine de 3 à 28%. Cette variabilité paraît très élevée. Dans cet état de l'art, les différentes méthodes d'extraction des composés biochimiques, ajoutées à la dispersion des résultats sur une même méthode, sont sûrement supérieures aux variabilités réelles.

Ensuite, les résultats montrent que le xylème du chanvre est principalement composé de cellulose (60%). Puis l'hémicellulose et la lignine sont présentes à des taux proches, variant entre 15 et 20%. Pour finir, les composés solubles représentent moins de 10% de la masse du xylème.

2.3.6 ABSORPTION D'EAU

Les résultats d'essais d'absorption d'eau sont présentés en Figure 2-19.

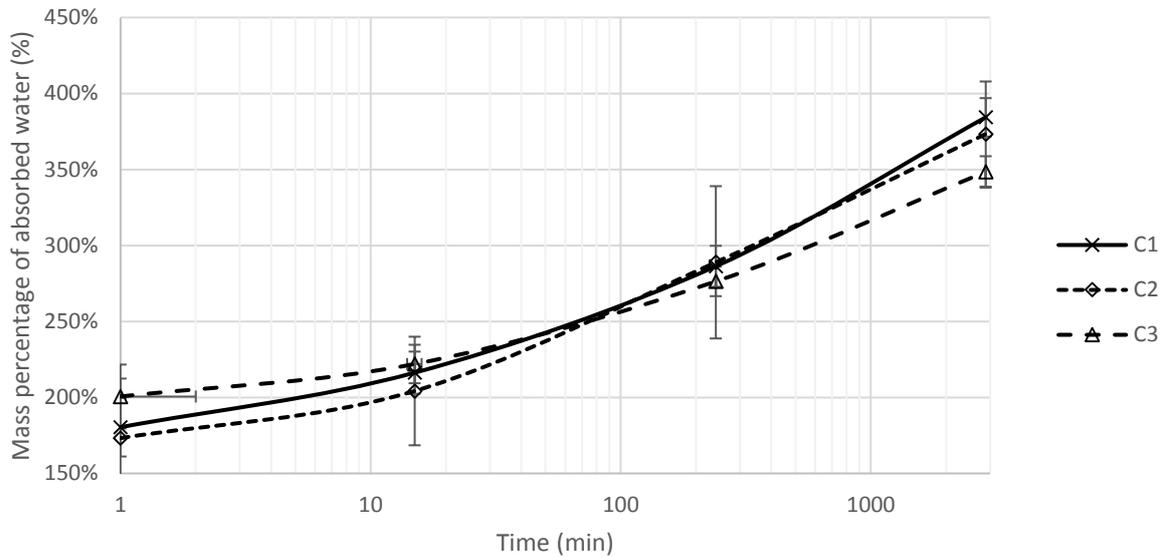


Figure 2-19: Cinétiques d'absorption des chènevottes

L'observation des cinétiques d'absorption permet notamment de noter que les chènevottes dépassent 250% d'absorption d'eau après environ une heure d'immersion. C1 et C2 ont des cinétiques très proches, ce qui suggère que la granulométrie n'influence pas l'absorption d'eau liquide. En revanche, C3 présente une absorption d'eau généralement plus faible à long terme, mais plus rapide à court terme. Après 48h d'immersion, C1 et C2 sont respectivement à 384% et 373% alors que C3 est à 348%.

Une durée de 48h d'absorption permet ainsi de distinguer les comportements de différentes chènevottes. La Figure 2-20 compare ainsi nos résultats à ceux des chènevottes des chanvriers en circuit court. Ici, 6 chènevottes ne sont pas comprises dans le cadre illustrant la représentativité issue de nos chènevottes, soit un pourcentage de représentation relativement bas de 65%.

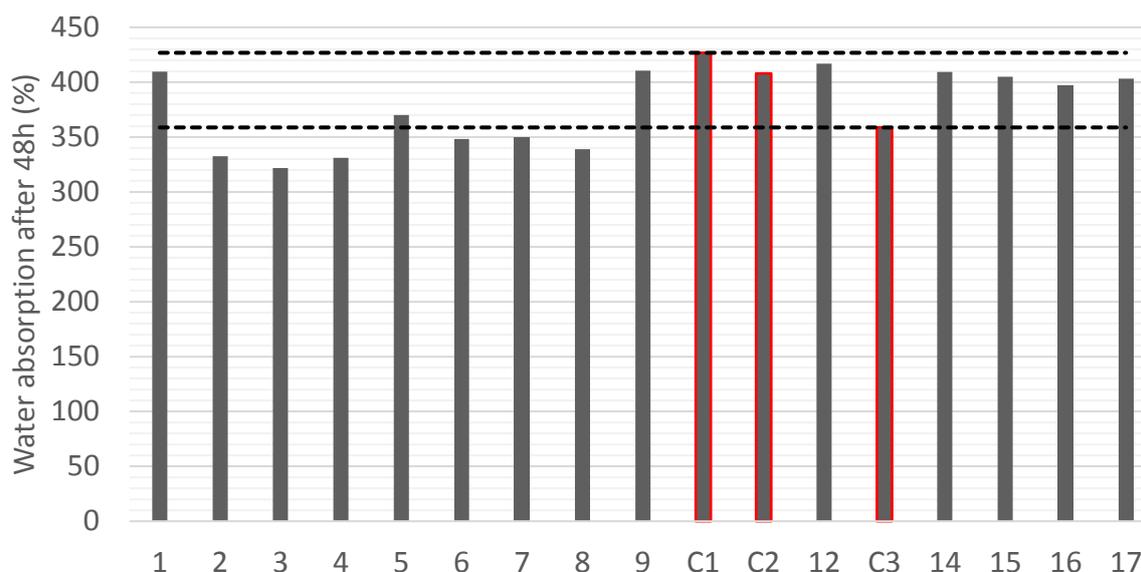


Figure 2-20: Absorption d'eau des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts. Les chènevottes à l'étude sont en rouge, leur zone de représentativité est en traits pointillés.

2.4 CONCLUSION

Dans cette partie de la thèse, un travail de caractérisation des particules de chanvre a été réalisé. Trois chènevottes différentes, C1, C2 et C3 (dont C1 et C2 étant issues du même lot) ont été analysées. La granulométrie, les taux de fibres et de poussières, la masse volumique apparente, la composition biochimique et enfin la capacité d'absorption d'eau ont été mesurés. Les résultats de caractérisation de ces trois chènevottes ont ensuite été comparés aux 17 chènevottes d'une étude menée en parallèle dans le cadre du projet Chanvrisol. En conclusion, C1, C2 et C3 sont différentes entre elles et même si elles ne représentent pas l'ensemble des chènevottes des Chanvriers en Circuits Courts, elles représentent bien les chènevottes qui seraient utilisées par les applicateurs. En effet, une chènevotte trop poussiéreuse ou trop grossière ne serait pas utilisable dans un terre-chanvre.

3 CHAPITRE 3 : MÉTHODE DE FABRICATION D'ÉCHANTILLONS TERRE-CHANVRE

3.1 INTRODUCTION

La terre crue issue de ressources locales diffère en fonction du gisement mobilisé. Cela n'a pas empêché le déploiement de la construction en terre crue, qui représente à ce jour 15% du bâti national [39]. Les professionnels adaptent les formulations et techniques de mise en œuvre au gisement disponible. Par exemple, dans le Perche, les planchers en torchis récupérés par Eco-Pertica n'ont pas toujours le même taux de fibre. Ce taux de fibre fut ajusté en son temps par les artisans, selon la terre utilisée, en vue d'éviter la fissuration par retrait. Toutes les variabilités ne sont pas acceptables pour autant, car par exemple si une terre n'est pas assez argileuse, elle n'offrira peut-être pas assez de cohésion pour la technique visée. L'exigence est le résultat, c'est à dire d'aboutir à un ouvrage qui rend la fonction voulue de manière durable. Les guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue [50] font ainsi régulièrement référence à des essais performantiels, qui permettent de valider sur site que la réalisation avec les ressources choisies est conforme aux attentes. D'un point de vue scientifique, il est intéressant de comprendre les liens entre les variabilités du liant et les performances que l'on peut atteindre au sens large (thermique, hygrothermique, mécanique, acoustique, environnementales). Cette compréhension permet d'éclairer le savoir-faire des professionnels et d'expliquer certains comportements observés ou mal compris.

Dans le cadre de la terre allégée, il serait par exemple utile de comprendre le lien entre les caractéristiques d'une terre et son comportement rhéologique sous forme de barbotine, puisque les professionnels travaillent la terre sous cette forme et testent leur barbotine. Par ailleurs, il serait utile d'évaluer s'il est possible d'identifier des familles de terre qui semblent mieux adaptées au terre allégée. Ce travail doit être réalisé avec précautions et doit être couplé à l'expérience de chantier ou l'observation de bâtiments existants. En effet, les analyses d'Aubert sur les terres utilisées pour réaliser des adobes (technique traditionnelle de construction en maçonnerie de brique de terre crue) dans des édifices patrimoniaux [127] montrent qu'il est difficile de déterminer une classe de convenance des terres pour une technique donnée. Notre travail vise à apporter de premières briques de connaissance dans ce sens. Le développement du terre-chanvre étant relativement récent, les connaissances scientifiques permettant d'avoir un mélange parfaitement adapté à telle ou telle mise en œuvre sont en développement. Par exemple, ces mêmes guides de bonnes pratiques [50] parlent de terre argileuse, sans indiquer de définition quantitative ou de méthode d'identification d'une terre argileuse. Remarquons ici l'importance du savoir-faire des artisans sachant mettre en œuvre de manière adaptable ce matériau en fonction des conditions particulières de chaque chantier.

Ce chapitre présente la fabrication des échantillons de terre-chanvre. Or, plusieurs paramètres peuvent affecter la représentativité de ces échantillons réalisés en laboratoire.

3.2 PARAMÈTRES DE REPRÉSENTATIVITÉ

3.2.1 APPLICATIONS

Aujourd'hui, les « bétons bio-sourcés », à savoir le mélange d'un liant minéral et de granulats végétaux, ont différentes applications et peuvent être mis en œuvre de différentes manières. Construire en chanvre a publié en 2012 des règles professionnelles [128] relatant la composition, les performances attendues, la confection et l'exécution de mélange chaux-chanvre pour enduit, isolation de mur, sol ou toiture [128]. De même, le guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue [50] propose des analyses des constituants, des méthodes de fabrication de la barbotine, des techniques de mise en œuvre, des performances attendues ainsi que des moyens de contrôle de la qualité durant la mise en œuvre d'une terre allégée. Il apparaît alors que les formulations ainsi que les techniques de mise en œuvre proposées dans ces documents sont nombreuses :

- Par banchage (Figure 3-1):
 - o A) En construction neuve, structure bois à montants simples ou doubles noyés dans un remplissage terre-chanvre
 - o B) En rénovation, doublage intérieur d'un mur existant
- Par projection (Figure 3-2):

- A) En doublage d'un mur existant, épaisseur de matériau inférieure à 6 cm
- B) En doublage d'un mur existant, ajout d'une ossature légère pour des épaisseurs supérieures à 6 cm

En fonction de chacune d'entre-elles, les attentes en terme de performances en tant qu'isolant ne sont pas les mêmes.

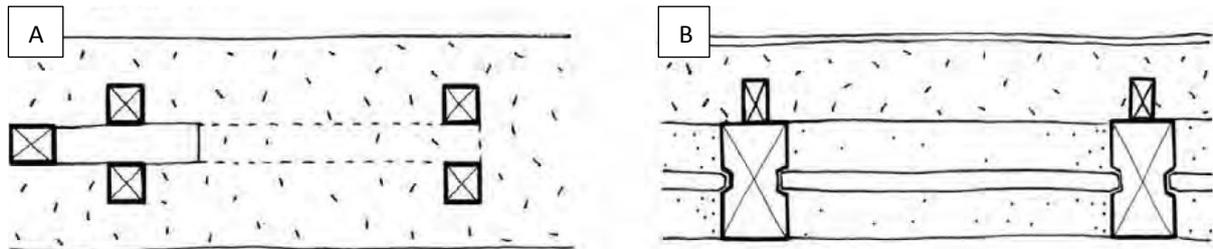


Figure 3-1 : Remplissage par banchage. Schéma en coupe en situation de construction neuve et rénovation [50].

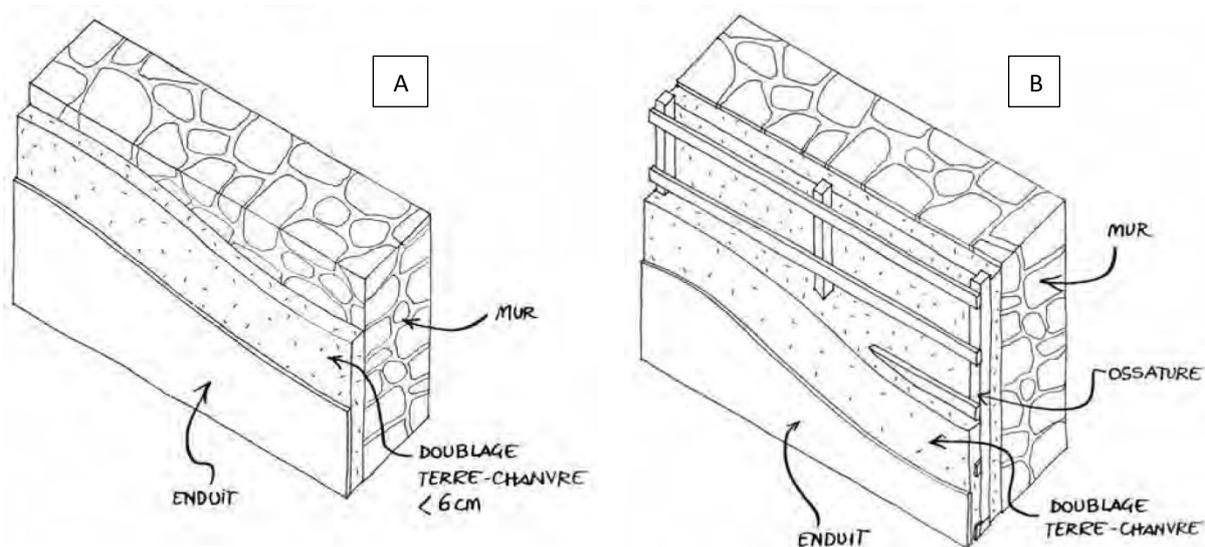


Figure 3-2: Principales techniques de projection de terre-chaux. A) doublage inférieur à 6mm, B) doublage supérieur à 6mm [2].

3.2.2 MÉLANGE DES CONSTITUANTS

Plusieurs méthodes permettent de mélanger les différents constituants d'un béton biosourcé. Les documents relatifs au chaux-chaux citent l'utilisation de la bétonnière ou d'un malaxeur [129–132]. D'autre part, les guides de bonnes pratiques évoquent séparément le mélange de la terre et de l'eau, et le mélange de la barbotine avec les granulats végétaux. La barbotine peut être fabriquée « dans une baignoire ou une cuve, à la main, à la bétonnière ou au malaxeur planétaire, au malaxeur de peinture, à la tonne à lisier, en malaxeur en tonneau. » [133]. La terre étant faite d'un ensemble de différentes tailles de mottes (voir chapitre 1), il s'agit d'ajouter suffisamment d'eau et d'utiliser une méthode de mélange convenable afin d'assurer la dispersion des particules de terre dans l'eau. Sachant que la dispersion des argiles dépend de leur nature [71], il apparaît essentiel d'utiliser une méthode permettant d'éviter les mottes. Il s'agit principalement de se placer à une teneur en eau au-dessus de la teneur en eau de saturation de la terre, et de laisser un temps pour que l'eau pénètre les mottes.

Concernant le mélange des granulats au liant, de même que pour le chaux-chanvre, le mélange peut s'effectuer à la bétonnière ou à l'aide d'un malaxeur. En projection, le mélange peut être réalisé puis pompé directement. Ou encore, la barbotine et les chènevottes peuvent être pompés séparément et se mélangent alors sur le mur.

En laboratoire, les mélanges de chaux-chanvres sont réalisés au malaxeur, à la bétonnière ou encore au malaxeur à train valseur [11–13]. Les travaux de recherche sur la terre allégée mentionnent des mélanges au malaxeur ou à la bétonnière [14–16].

La technique de mélange utilisée peut affecter l'enrobage des granulats par la barbotine, ou du moins l'homogénéité du mélange. Dans le cas du chaux-chanvre, certains auteurs mentionnent la séparation de l'eau de pré-mouillage des granulats et de l'eau de gâchage [136]. Pour la terre allégée, cette étape n'est pas nécessaire sachant que le liant ne réalise pas de prise chimique au cours du séchage. Brouard, dans sa thèse, a testé le mélange de l'eau et des particules avant d'ajouter la terre et confirme que cette méthode n'est pas adaptée car elle empêche un mouillage optimal des argiles [137], ce qui est aussi mentionné par les guides de bonnes pratiques de construction en terre crue [50].

3.2.3 ÉNERGIE DE COMPACTAGE

Lorsque la mise en œuvre est réalisée par banchage, le processus est le suivant :

- 1) À la main ou à l'aide d'un seau, le mélange est déversé dans la banche
- 2) Le mélange est soit compacté directement après avoir été déversé [133], soit après avoir atteint une couche d'une certaine épaisseur [28]. Le niveau de compactage est variable, mais il peut atteindre jusqu'à de l'ordre de 40% de la masse volumique libre de la chènevotte.
- 3) Les précédentes étapes sont répétées jusqu'à atteindre le haut de la banche, puis la banche suivante est placée.
- 4) Le décoffrage peut s'effectuer directement ou après 48 à 72h selon les conditions [133].

Ici, le compactage est réalisé soit à la main, soit en utilisant un outil adapté (type bâton avec un embout plat). Ainsi, l'énergie de compactage peut être dépendante des personnes mettant en œuvre. Par ailleurs, le mélange est généralement plus compacté en partie haute de banche qu'en partie basse. Réduire la hauteur de banche améliore l'homogénéité du mélange sur le mur. Dans le cas d'une projection, le mélange n'est pas compacté manuellement. Seulement, la distance entre le mur et la lance impacte directement la masse volumique du matériau [138]. Elfordy évoque notamment l'effet de rebondissement lorsque la lance est trop proche ou de pertes de vitesses lorsque la lance est trop loin du mur. L'auteur montre ainsi qu'il existe un optimum entre masse volumique et distance au mur.

En laboratoire, certains travaux présentent un compactage à la main [14, 16], lorsque d'autres utilisent une machine de compression pour la fabrication des échantillons [13–15]. L'énergie de compactage influe sur la masse volumique et la distribution des pores du matériau. Aussi, le choix de l'épaisseur des couches à compacter et l'énergie nécessaire à le faire influe sur l'homogénéité de l'échantillon [136].

3.2.4 CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES

Selon les domaines d'études des performances (mécanique ou hygrothermique), les géométries des échantillons adaptées sont différentes. La littérature sur les adobes fournit des informations sur les effets des dimensions des échantillons lors d'essais de résistance en compression. Tout d'abord, l'élanement doit être entre 1 et 2. Un rapport d'élanement inférieur à 1 révèle d'importants effets de plateaux qui conduisent à une surestimation de la résistance à la compression [139]. Si le même rapport est supérieur à 2, les échantillons peuvent être soumis à un effet de flambement [140]. Il semble qu'une forme cylindrique donne des résultats mécaniques qui s'adaptent mieux aux modèles constitutifs de contrainte-déformation [139]. Aubert et al. ont la même conclusion en observant qu'un adobe avec un rapport d'aspect de 2 présente une courbe contrainte-déformation correspondant à ce que l'on attend des modèles [140]. Seulement, les effets de la géométrie sur le

comportement mécanique dépendent du matériau en lui-même, notamment de sa masse volumique et sa microstructure. Néanmoins, les cubes sont utilisés pour la caractérisation mécanique dans de nombreuses études, notamment sur le chaux-chanvre [20–23]. Les cubes présentent notamment l’avantage de permettre une étude complète du comportement mécanique : l’aspect cubique donne la possibilité de réaliser des essais de compression dans différentes directions. Youssef [142] présente par exemple des résultats sur des mélanges chaux-chanvre montrant qu’entre cubes et cylindres la limite d’élasticité ne change pas mais que le module d’élasticité est grandement influencé.

3.2.5 TENEUR EN EAU FINALE

Les performances mécanique et hygrothermique des matériaux de construction terre varient avec leur teneur en eau. Des études ont notamment montré l’importante variation du comportement mécanique de la bauge (technique traditionnelle de construction terre en mur monolithique) en fonction de sa teneur en eau [80,145]. Concernant le comportement hygrothermique, la littérature montre une variation importante de la conductivité thermique du chaux-chanvre en fonction de l’humidité relative et de la température ambiante [136,146].

3.2.6 MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

La masse volumique des bétons bio-sourcés est choisie en fonction de l’application souhaitée. Selon Construire en Chanvre, la masse volumique d’un chaux-chanvre en parois verticales doit être aux alentours de 400 kg.m⁻³ [128]. Côté terre-chanvre, la pratique de chantier montre que les masses volumiques varient typiquement entre 200 et 400 kg/m³ pour des parois verticales. L’application à la truelle, pour la réalisation de « correcteurs thermiques » permet d’atteindre 700 à 900 kg/m³. Enfin, en deçà de 200 kg/m³, on parle généralement de chanvre stabilisé.

Le Tableau 3-1 présente les plages de masses volumiques des matériaux terre allégée et chaux-chanvre faisant l’objet d’études scientifiques.

Tableau 3-1: Plages de masses volumiques de betons bio-sourcés de de différentes études

Sources	Matériau	Plage de masse volumique [kg.m⁻³]
<i>Busbridge [28]</i>	Terre-chanvre	318 - 635
<i>Mazhoud [126]</i>	Terre-chanvre	370 - 615
<i>Brouard [137]</i>	Terre allégée	300 -930
<i>Volhard [49]</i>	Terre allégée	300-1200
<i>Degrave-Lemeurs [117]</i>	Terre-chanvre	192-347
<i>Collet [143]</i>	Chaux-chanvre	382-414
<i>Tronet [141]</i>	Chaux-chanvre	614-849
<i>Youssef [142]</i>	Chaux-chanvre	564-869
<i>Glé [117]</i>	Chaux-chanvre	180-474
<i>Niyigena [147]</i>	Chaux-chanvre	420-514

3.3 CADRE D’ÉTUDE ET MÉTHODE DE FABRICATION

Cette étude s’intéresse particulièrement aux formulations et méthodes de mises en œuvre adaptées aux parois verticales, mises en œuvre directement sur chantier. Dans ce cadre, deux types de méthode de mise en œuvre sont possibles : remplissage d’un coffrage autour d’une structure bois ou en doublage d’un mur existant, projection directe ou sur ossature bois en doublage d’un mur existant [49,148].

3.3.1 FABRICATION DE LA BARBOTINE

Trois méthodes ont été utilisées pour réaliser les différentes barbotines nécessaires à la fabrication des échantillons. Pour chacune de ces méthodes, les mélanges de terre et d’eau ont été réalisés au malaxeur à

mortier, durant un temps minimum de 10 minutes. Avant tamisage, le mélange est laissé à reposer au minimum 24h.

A. Méthode « type chantier »

- 1) Mélange de la terre brute et de l'eau selon une proportion visée et connaissant la teneur en eau de la terre brute
- 2) Tamisage à 2mm et mesure de la teneur en eau après tamisage
- 3) Ajout/Retrait d'eau en fonction d'un test du gant réalisé par un artisan expérimenté

B. Méthode à seuil de cisaillement estimé fixé

- 1) Mélange de la terre brute et de l'eau de façon à obtenir une suspension dense
- 2) Tamisage à 2mm
- 3) Ajout/Retrait d'eau pour atteindre un seuil de cisaillement visé

C. Méthode à teneur en eau fixée

- 1) Mélange de la terre brute et de l'eau de façon à obtenir une suspension dense
- 2) Tamisage à 2mm
- 3) Ajout/Retrait d'eau pour viser une teneur en eau donnée

La méthode B évoque une mesure du seuil du cisaillement. La méthode utilisée ici a été développée durant l'étude et est présentée dans le Chapitre 4 (section 4.5.1.2). De même, la méthode C évoque une mesure (estimative) de la teneur en eau, réalisable sur chantier. Cette méthode de mesure est présentée ci-dessous.

La Figure 3-3 illustre le mélange au malaxeur et le tamisage. Lorsqu'une grande quantité de barbotine est préparée, deux tamis successifs (6mm et 2mm) peuvent être utilisés pour faciliter le tamisage.



Figure 3-3: a) Mélange de la terre brute et de l'eau, b) tamisage, c) Refus du tamis de 6mm, d) Refus du tamis de 2mm.

3.3.2 MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA TENEUR EN EAU

Une méthode simple de détermination de la teneur en eau d'une barbotine a été développée durant cette thèse, notamment pour faciliter la fabrication d'échantillons et être utilisable sur chantier par la suite. Deux niveaux d'utilisation de cette méthode sont présentés. Un premier niveau, sans aucun prérequis, et un second niveau, nécessitant au préalable la mesure de la masse volumique particulière de la terre. Dans les deux cas, le protocole d'essai est le même :

Matériel nécessaire

Une balance (capacité ≥ 5 kg, précision = 5 g) et un tube de mesure de 2 L.

Précautions

- Le protocole présenté est adapté aux barbotines tamisées à 2 mm.
- Les barbotines sont préparées au moins 15 min avant toute mesure afin d'éviter les mottes de terre non mouillées.
- Toujours mélanger la barbotine au moins 2 min avant toute mesure pour assurer son homogénéité.

Protocole

- 1) Mesure de masse volumique
 - a. Tarer le récipient de mesure sur la balance
 - b. Verser 2 L de barbotine
 - c. Peser la masse m de la barbotine ajoutée
 - d. Calculer sa masse volumique
- 2) Estimation de teneur en eau, selon 3 possibilités
 - a. Utiliser l'abaque de la Figure 3-4 si la masse volumique particulière n'est pas connue. Le trait plein représente la teneur moyenne en eau et les traits en pointillés représentent la teneur minimale et maximale en eau.
 - b. Utiliser l'abaque de la Figure 3-5 si la masse volumique particulière est connue. Les courbes représentent les masses volumiques particulières par pas de 50 kg/m³.
 - c. Utiliser directement l'équation 3-1 pour déterminer la teneur en eau de la barbotine testée.

La teneur en eau est calculée selon l'équation suivante :

$$w = \frac{m - V \times \rho_e}{V \times \rho_e} \times \frac{V \times \rho_w}{m - V \times \rho_w} \quad 3-1$$

Avec m , V , ρ_e , ρ_w respectivement la masse et le volume de l'échantillon de barbotine, la masse volumique particulière de la terre et la densité de l'eau.

La teneur moyenne en eau peut être calculée à partir d'une masse volumique particulière moyenne de la terre de 2650 kg/m³. Comme le montre le Chapitre 1, d'autres terres ont été étudiées et cela a montré que leur masse volumique peut varier de 2400 à 3000 kg/m³. Cette variation conduit aux courbes de teneur en eau minimale et maximale.

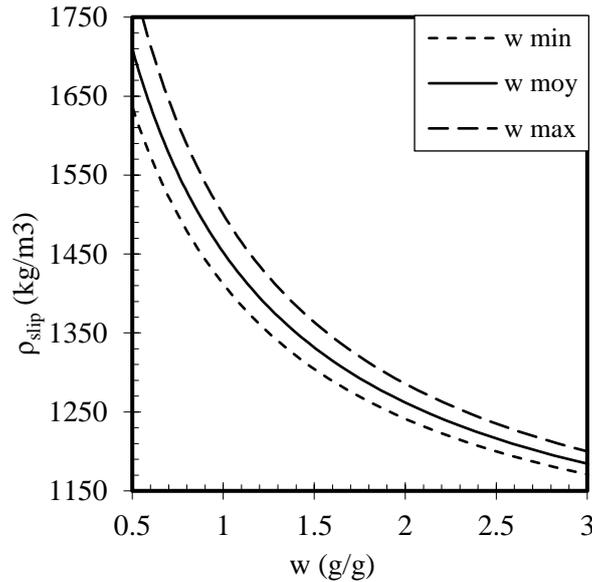


Figure 3-4: Abaque de détermination de la teneur en eau par masse volumique. Est utilisée la masse volumique particulaire moyenne.

Afin de vérifier la validité de cette méthode, les six barbotines utilisant les six terres choisies sont testées à différentes teneurs en eau. Le protocole indiqué ci-dessus est utilisé pour déterminer la masse volumique de la barbotine. Puis un échantillon est prélevé et placé en étuve à 105°C afin de mesurer la teneur en eau (méthode gravimétrique). La Figure 3-5 présente l'abaque utilisable lorsque la masse volumique particulaire de la terre est connue. Sur cette même figure, la comparaison des points expérimentaux et des courbes permet une comparaison entre, respectivement, la mesure de teneur en eau par séchage en étuve et par mesure de masse volumique.

En dehors du point T1 (1.98 ; 1290) s'éloignant de manière importante de la courbe, la majorité des points expérimentaux présentent une erreur maximale de $\pm 50 \text{ kg/m}^3$.

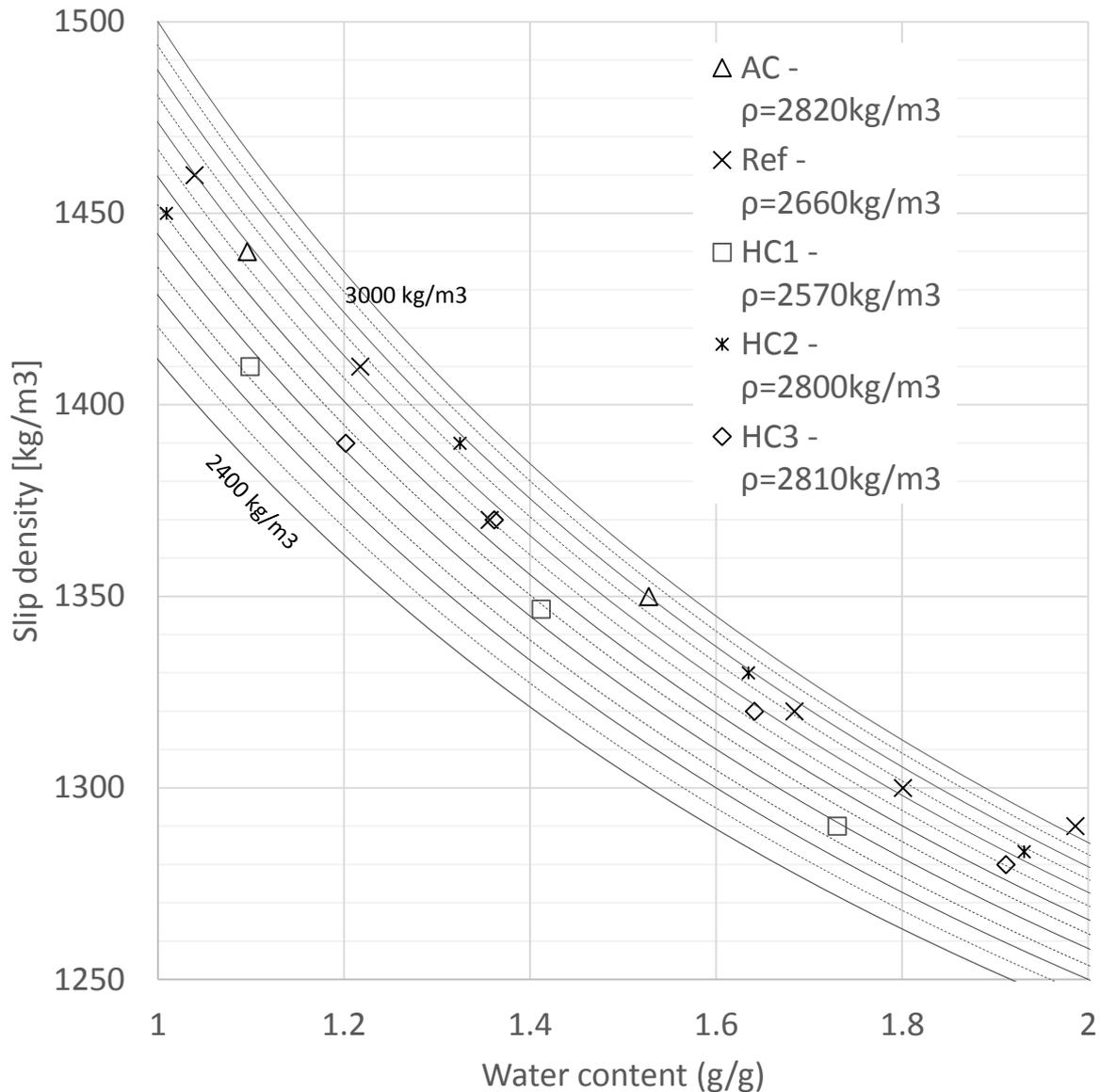


Figure 3-5: Abaque de détermination de la teneur en eau par masse volumique (Masse volumique particulière de la terre connue). Les points expérimentaux des barbotines à l'étude sont représentés.

3.3.3 FABRICATION DU MÉLANGE TERRE-CHANVRE

Suivant la méthode utilisée pour la fabrication de barbotine, deux méthodes pouvaient être utilisées pour le mélange de cette barbotine avec les chènevottes :

- Premièrement, une méthode « type chantier » (notée X1), utilisée après une fabrication de barbotine (A), où le chanvre est mélangé à la barbotine selon un rapport massique chanvre sur barbotine choisi ;
- Deuxièmement, une méthode développée pour cette thèse (notée X2), utilisée suite à une fabrication de barbotine (B) ou (C), où le chanvre est mélangé à la barbotine selon un rapport massique chanvre sur terre.

La Figure 3-6 présente une photo d'un mélange type réalisé au malaxeur.



Figure 3-6: mélange de chènevotte et de barbotine.

3.3.4 FABRICATION DES ÉCHANTILLONS MOULÉS

Une fois le mélange terre-chanvre réalisé, trois types d'échantillons ont été fabriqués : des cubes de 10 cm de côté et des cylindres de 16*32 cm. Les cubes ont été réalisés dans des moules fabriqués en contreplaqué marine. Les cylindres ont été réalisés dans des moules en carton (usuels pour la fabrication d'éprouvettes bétons).

La méthode choisie pour contrôler l'homogénéité et la masse volumique de nos échantillons est la suivante :

- 1) Choix d'une masse volumique humide à atteindre
- 2) Division en 5 parts égales de la masse totale nécessaire à remplir le moule
- 3) Remplissage du moule en 5 couches, compactées manuellement

Concernant le démoulage, les cubes sont démoulés directement après la fabrication. Les cylindres sont démoulés entre 48 et 72h après la fabrication. Puis les échantillons sont placés dans une pièce à 23°C et 60%HR jusqu'à stabilisation de leur masse.

3.3.5 FABRICATION DES ÉCHANTILLONS PROJETÉS

La Figure 3-7 illustre la manière dont sont produits les échantillons de terre-chanvre projeté. La lance est placée à environ 1 mètre de la surface. Le remplissage se fait en trois à quatre passes. Les cadres remplis sont ensuite séchés à l'air libre, puis le matériau est redécoupé en cubes (10 cm de côté) à l'aide d'une scie sur table équipée d'un disque diamant.



Figure 3-7: Fabrication d'échantillon de terre-chanvre par projection.

3.4 FORMULATIONS

Une première formulation de référence est réalisée en utilisant les méthodes de fabrication de barbotine et de mélange « type chantier ». Y sont utilisés la terre de référence et le chanvre C1. C'est une formulation très proche de ce qui est actuellement utilisé sur différents chantiers de l'entreprise Eco-Pertica depuis plusieurs années. Ensuite, six études d'influence de la variabilité des composants sur les performances d'un matériau terre-chanvre sont proposées à travers différentes formulations. Pour chacune d'entre elles, le paragraphe suivant s'attache à décrire les éléments utilisés et l'objectif visé. Les proportions massiques des composants sont reportées en graphique dans la Figure 3-8. Chaque graphique intègre la formulation de référence et les autres formulations par étude. Les points ci-dessous énumèrent les différentes variables sur lesquelles jouent chaque formulation. Les caractéristiques de l'ensemble des formulations, ainsi que les méthodes de fabrications utilisées sont regroupées dans le Tableau 3-2.

3.4.1 VARIABILITÉ DE LA TERRE

Le Chapitre 1 présente la terre comme un matériau complexe et hautement variable. Il paraît ainsi non trivial d'étudier l'influence de chaque paramètre de composition de la terre sur les performances du terre-chanvre. Deux approches différentes ont été ici choisies pour étudier l'influence du type de terre :

- La terre est ici utilisée comme liant. Or les composants principaux permettant la cohésion au sein du matériau terre sont les particules fines, et notamment les argiles. Une première approche consiste à simuler différentes terres, à différents teneurs en argile, par l'ajout de sable dans une seule terre. Par rapport à la référence (T1), deux formulations avec deux différents ajouts de sable ont été réalisées : en pourcentage de la masse de terre brute, il y a un ajout de 20% (T1C1(S1)) et un ajout de 200% (T1C1(S2)). La Figure 3-8 permet de visualiser l'impact de l'ajout de sable sur la granulométrie et le taux d'argile de la terre. Ces deux formulations sont présentées en Figure 3-9A ;

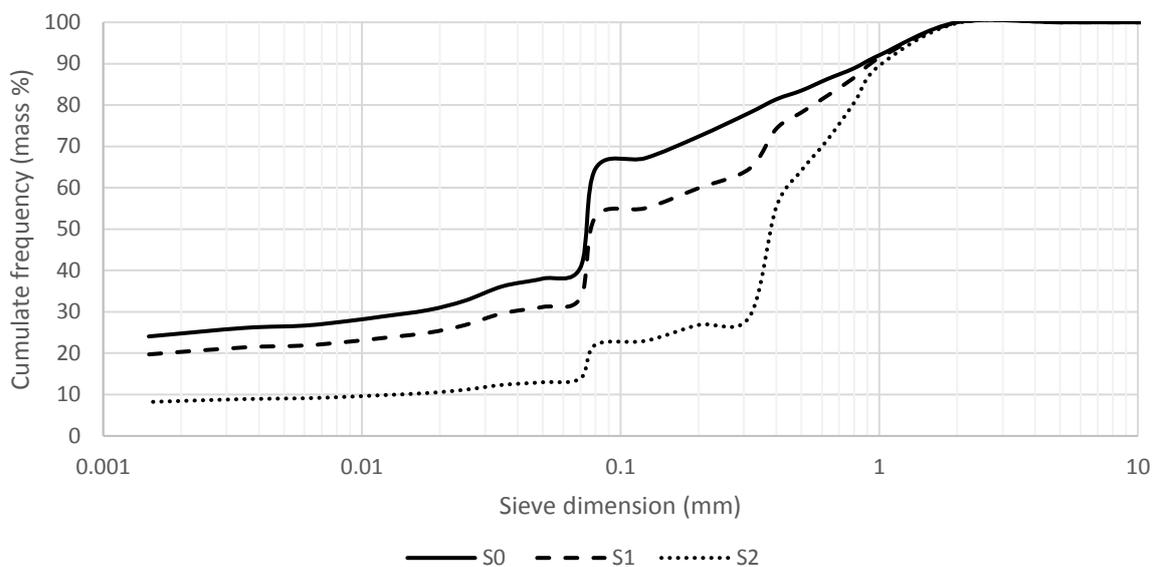


Figure 3-8: impact des ajouts de sable sur la granulométrie des terres utilisées en barbotine. S0 correspond à la granulométrie de la terre brute après tamisage à 2mm.

- Afin de jouer sur l'ensemble des paramètres de compositions de la terre, les terres étudiées plus spécifiquement lors du chapitre 1 sont utilisées pour réaliser différentes formulations. Pour ce faire, les différentes barbotines sont préparées à teneurs en eau équivalentes. Ce sont les formulations T2-W, T3-W, T4-W, T5-W et T6-W, présentés en Figure 3-9B. Le graphique montre que la formulation T2-W ne présente pas les mêmes proportions que les autres formulations. En effet, à la teneur en eau souhaitée, la barbotine sédimente de manière importante, faussant la prise d'échantillon pour mesure de teneur en eau ou même le prélèvement pour fabrication de mélange terre-chanvre.

3.4.2 INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU

Dans une autre approche d'étude d'influence de la terre, nous avons utilisé une analyse rhéologique pour définir les barbotines T2-Y, T3-Y, T4- Y, T5-Y et T6-Y, fabriquées à seuil de cisaillement estimé équivalent. Elles sont présentées en Figure 3-9B.

3.4.3 VARIABILITÉ DU CHANVRE

Les trois chanvres C1, C2 et C3 sont utilisés pour la réalisation de différentes formulations. Ils donnent respectivement les formulations T1C1, T1C2 et T1C3. Ces formulations sont présentées en Figure 3-9C.

3.4.4 TENEUR EN CHANVRE

Le rapport « chanvre/terre » (C/T) est maintenu pour la majorité des formulations à 0.8. Ici, nous le faisons varier à 0.9 pour une formulation (T1C1(F)), tandis qu'une autre intègre le rapport C/T et un ajout de sable à la barbotine (T1C1(F+S1)). Ces formulations sont présentées en Figure 3-9D.

3.4.5 MÉTHODE DE MIS EN ŒUVRE

Ici, une formulation projetée a été réalisée en utilisant la terre de référence (T1) et la chènevotte C1 (Figure 3-7). Les proportions de matériaux sont calculées d'après les débits de chanvre et de barbotine. Ainsi, un rapport C/T de 0.56 est observé, avec une teneur en eau de barbotine mesurée à 1.8. Cette formulation, notée T1C1(P) est présentée en Figure 3-9D (échantillon D).

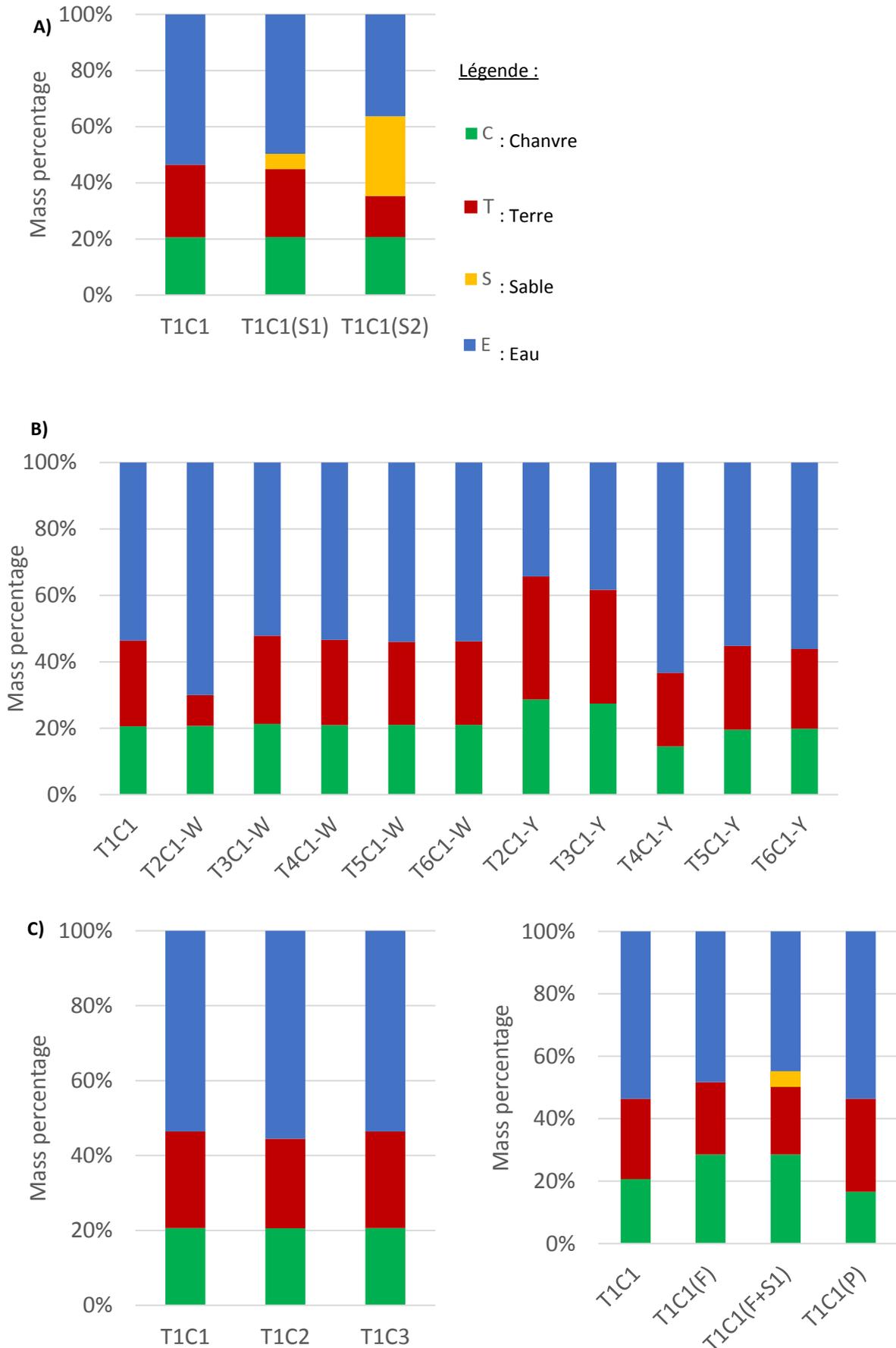


Figure 3-9: Représentation graphique des formulations terre-chanvre réalisées. a) influence du taux de sable. b) influence du type de terre à teneur en eau équivalente ou seuil de cisaillement estimé équivalent, c) influence du type de chanvre, d) influence du taux de chanvre et de la méthode de mise en œuvre.

3.5 CARACTÉRISATION PHYSIQUE

3.5.1 SÉCHAGE

Le séchage d'une partie des formulations stockées à 23°C et 60%HR a été suivi. Dans ces conditions, la masse des échantillons est stabilisée après 50 jours. Les formulations T1C1, T1C2, T1C3, T1C1(F), T1C1(F), T1C1(F+S1) et T1C1(F+S2) présentent des cinétiques de séchages semblables.

3.5.2 ASPECT

La Figure 3-11 présente les cubes de l'ensemble des formulations après séchage. Les particules de chènevotte apparaissent correctement enrobées de terre, et les échantillons sont visuellement homogènes. Seuls les formulations T2C1-W/Y présentent des chènevottes peu enrobées. La terre utilisée dans ce cas ne possède que très peu de fines (10% d'argiles et 7% de limons), rendant difficile la capacité d'enrobage des chènevottes par la terre. De plus, cette même formulation est très fragile. Les échantillons s'effritent facilement lors de leur manipulation. Cette terre, au caractère peu cohésif, n'est clairement pas adaptée pour faire de la terre-allégé. Dans la suite de cette thèse, les échantillons T2C1-W/Y seront malgré tout caractérisés.

Seule la formulation T1C3 présente des moisissures apparues au cours du séchage. Leur croissance stoppe une fois la masse de l'échantillon stabilisée. La caractérisation chimique de la chènevotte C3 n'est que très peu différente des 2 autres chènevottes de l'étude (chapitre 2). Par contre, son observation visuelle (couleur assez jaune) laisse suggérer qu'elle n'a pas subi une période importante de rouissage [149,150]. Il est décrit dans la littérature [149] que le rouissage dégrade les sucres (principalement les pectines) permettant les liens entre xylème (dont les chènevottes sont issues) et phloème (dont les fibres sont issues). Or, ces sucres sont de potentielles sources de nourriture pour différents types de moisissures [116]. D'autre part, une autre possibilité serait liée à la présence d'éventuels micro-organismes dans la chènevotte.

3.5.3 MASSE VOLUMIQUE, FRACTIONS VOLUMIQUES SOLIDES ET POROSITÉ

Les dimensions finales, après séchage, des échantillons sont mesurées au pied à coulisse. Les masses volumiques, fractions volumiques solides et porosités totales sont ensuite calculées à partir de ces dimensions et des masses mesurées après séchage à l'étuve à 40°C. Les valeurs moyennes par formulation sont reportées dans le Tableau 3-2. Ainsi, les masses volumiques varient entre 232 et 402 kg/m³. La Figure 3-10 illustre cette plage de variation et la compare aux plages de masses volumiques de différents matériaux de construction [151]. La figure montre que seuls le chaux-chanvre et le terre-paille se situent sur des masses volumiques équivalentes. Des essais supplémentaires pourraient être nécessaires pour déterminer les limites du terre-chanvre en terme de formulation : peut-on descendre à des masses volumiques plus faibles tout en restant mécaniquement viable ?

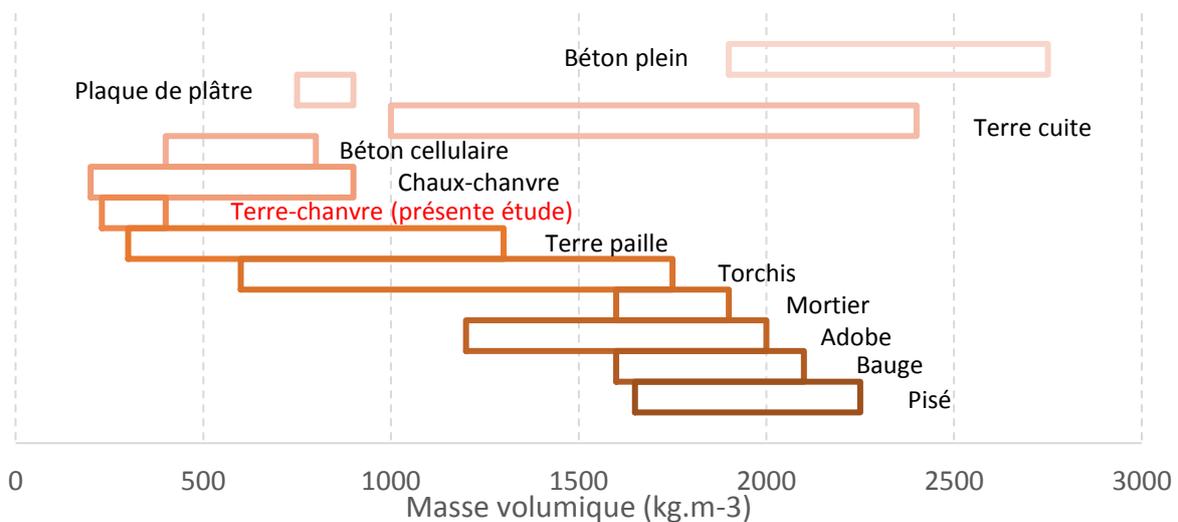


Figure 3-10: Plage de masses volumiques de différents matériaux de construction, dont la présente étude.

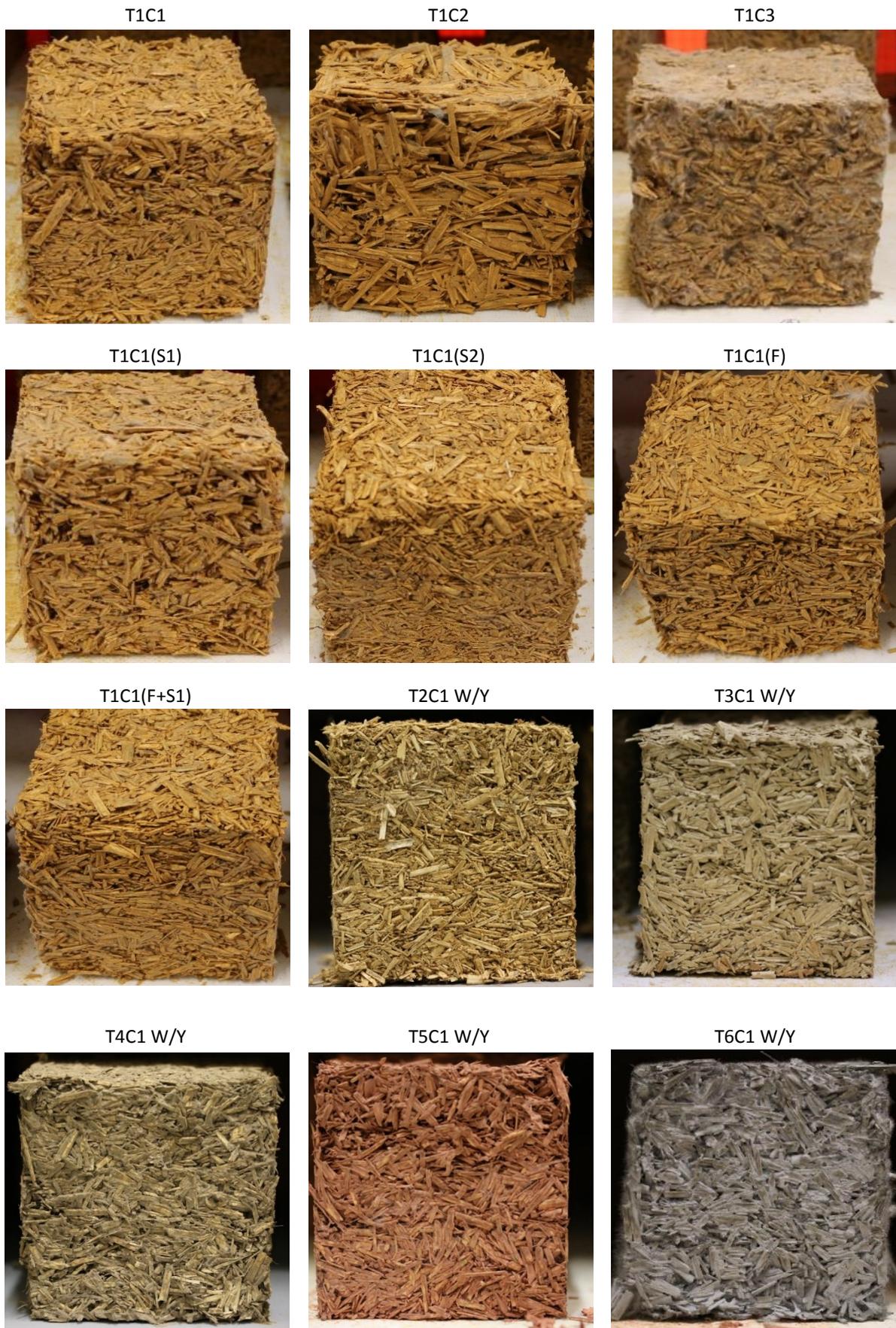


Figure 3-11: Aspect visuel de cubes des différentes formulations réalisées.

Tableau 3-2: Paramètres de fabrication et caractéristiques physiques des formulations réalisées.

GROUPE	NOMENCLATURE	TYPE DE BARBOTINE	TYPE DE MÉLANGE	W	C/T	POURCENTAGE MASSIQUE (FABRICATION)				FRACTION VOLUMIQUE (APRÈS SÉCHAGE)			ρ (KG.M ⁻³)
						Chanvre	Terre	Sable	Eau	Chanvre	Terre (+sable)	Porosité	
RÉFÉRENCE	T1C1	A	X1	2.08	0.80	0.21	0.26	0.00	0.54	0.10	0.07	0.82	341
COMPORTEMENT ARGILEUX	T1C1(S1)	A	X1	1.68	0.70	0.21	0.24	0.05	0.50	0.10	0.08	0.82	351
	T1C1(S2)	A	X1	0.84	0.48	0.21	0.15	0.28	0.36	0.09	0.10	0.81	401
TYPE DE TERRE	T2C1-W	C	X2	7.65	2.22	0.21	0.09	0.00	0.70	0.11	0.03	0.86	232
	T3C1-W	C	X2	2.51	0.80	0.21	0.27	0.00	0.52	0.09	0.06	0.85	286
	T4C1-W	C	X2	2.14	0.81	0.21	0.26	0.00	0.53	0.09	0.06	0.85	295
	T5C1-W	C	X2	2.20	0.84	0.21	0.25	0.00	0.54	0.09	0.06	0.85	290
	T6C1-W	C	X2	2.15	0.84	0.21	0.25	0.00	0.54	0.10	0.06	0.84	305
	T2C1-Y	B	X2	0.94	0.77	0.29	0.37	0.00	0.34	0.09	0.06	0.84	301
	T3C1-Y	B	X2	1.33	0.80	0.27	0.34	0.00	0.38	0.10	0.07	0.84	314
TENEUR EN EAU	T4C1-Y	B	X2	2.94	0.66	0.15	0.22	0.00	0.63	0.09	0.08	0.83	342
	T5C1-Y	B	X2	2.50	0.76	0.20	0.25	0.00	0.55	0.09	0.07	0.84	303
	T6C1-Y	B	X2	2.34	0.83	0.20	0.24	0.00	0.56	0.09	0.06	0.85	295
TYPE DE CHANVRE	T1C2	A	X1	2.32	0.86	0.21	0.24	0.00	0.56	0.11	0.07	0.83	333
	T1C3	A	X1	2.08	0.80	0.21	0.26	0.00	0.54	0.11	0.07	0.82	344
TENEUR CHANVRE EN	T1C1(F)	A	X1	2.08	1.23	0.29	0.23	0.00	0.48	0.10	0.04	0.86	286
	T1C1(F+S1)	A	X1	1.68	1.07	0.29	0.22	0.05	0.45	0.09	0.05	0.86	232
PROJECTION	T1C1(P)	A	Projection	1.80	0.56	0.29	0.22	0.05	0.45	-	-	-	

4 CHAPITRE 4. INFLUENCE DE LA VARIABILITÉ DES TERRES SUR LE COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES BARBOTINES

Ce chapitre fait en partie l'objet d'une traduction de l'article « Methods to evaluate earth slip cohesion to build with light earth” T.Vinceslas et al. - 2019

4.1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, l'une des principales difficultés liées au développement et aux études scientifiques portant sur la terre allégée est la variabilité de ses composants bruts : les terres, notamment, varient en composition et en comportement, même sur de courtes distances. Nous sommes confrontés à cette problématique dès la fabrication de la barbotine et ses conséquences en terme d'ouvrabilité et de tenue mécanique à l'état frais. Il s'agit donc, dans un premier temps, de comprendre le comportement rhéologique de suspensions de terre dans l'eau, ainsi que l'influence de la variabilité de la terre sur ce comportement.

Une barbotine est un mélange de particules fines (argile et limon), de particules grossières (sable) et d'eau. Une telle suspension granulaire se comporte comme un matériau à seuil, avec un seuil de cisaillement dépendant, en première approche, du comportement cohésif de l'argile et du limon, de la distribution granulométrique et de la fraction volumique solide. Ce seuil peut donc a priori permettre d'évaluer la cohésion interne des barbotines, en fonction de leur teneur en eau. Ainsi, connaître le comportement rhéologique d'une barbotine doit permettre d'en déduire la formulation possible du mélange de terre allégée : une barbotine dont la cohésion est élevée permettra de formuler une terre allégée avec une fraction volumique élevée de granulats végétaux. Ceci conduira à de bonnes propriétés d'isolation à l'état sec, tout en préservant une tenue du mélange acceptable, à l'état frais comme à l'état durci.

Les tests géotechniques standards développés dans le Chapitre 1 tels que la distribution granulométrique, les limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène (MBV) ou la capacité d'échange de cations (CEC) [1–4] nous permettent aussi d'estimer approximativement le comportement cohésif et physique des sols. Le premier sujet d'étude de ce chapitre consiste à évaluer les propriétés rhéologiques de barbotines en fonction du type de terre et de la teneur en eau. Un modèle est ensuite proposé pour tenter d'associer les paramètres géotechniques des terres au comportement rhéologique des barbotines.

Aujourd'hui, les maçons expérimentés en construction terre caractérisent qualitativement les terres utilisées sur site. Deux tests utilisés sur chantier peuvent être considérés comme des essais de rhéologie : le test de "la boule", qui consiste à évaluer le comportement d'une terre à l'état plastique [156] en la modelant sous forme de boule et en la faisant simplement tomber sur le sol, et le test du "gant". Ce dernier est jusqu'à présent le test le plus répandu pour la caractérisation des barbotines, fabriquées pour les constructions en terre allégée. Les artisans trempent et soulèvent la main du mélange et évaluent comment la barbotine reste collée sur leur main, le résultat ressemblant à un gant. La Figure 4-1 montre les trois possibilités qualitatives et présente (Figure 4-1b) un exemple de barbotine bien formulée, c'est-à-dire avec une teneur en eau satisfaisante. Cette technique simple est intéressante car elle implique plusieurs phénomènes, tels que la cohésion interne à la barbotine et sa masse volumique. Ce test a fait ses preuves et est à l'origine de nombreux chantiers de terre allégée réussis par des artisans qualifiés. Cependant il dépend de l'artisan et n'est que qualitatif. Il ne permet pas vraiment de comparer les terres entre elles, et potentiellement amène à écarter des terres qui pourraient être éligibles pour la fabrication de terre allégée. En outre, il ne permet pas de comprendre les paramètres quantitatifs formulant une barbotine « éligible » pour un mélange conforme pour la construction. Le second sujet d'étude de ce chapitre est donc de compléter cette analyse qualitative par une caractérisation quantitative du comportement rhéologique des barbotines, en fonction de leur teneur en eau, avec des tests qui doivent néanmoins pouvoir être effectués sur chantier, c'est-à-dire rester simples, rapides, robustes et peu coûteux.



Figure 4-1: Le test du "gant" réalisé sur chantier. a) la barbotine est trop fluide, la main transparait clairement à travers ; b) la formulation de la barbotine est correcte lorsqu'elle forme un gant parfait sur la main, sans transparence de celle-ci ; c) la barbotine est trop grasse lorsque les doigts sont palmés et le gant trop épais.

À ce jour, malgré quelques études sur le sujet [5–10], on ne trouve pas d'études comparatives sur l'évolution du comportement rhéologique des différentes terres en fonction de leur teneur en eau. De plus, encore moins d'études traitent du développement de tests de caractérisation rhéologique simples [161–164].

L'objectif principal de ce chapitre est donc de lier les caractéristiques géotechniques et le comportement rhéologique des barbotines, puis d'évaluer différentes méthodes de mesure de ce comportement, afin de trouver un test, suffisamment bon marché et robuste pour faciliter le développement des constructions en terre allégée. Dans un premier temps, la mesure du comportement des barbotines, à partir de 6 terres de natures très distinctes, est réalisée avec un rhéomètre de laboratoire équipé d'une géométrie Vane, comme c'est généralement l'usage pour les matériaux à seuil de la construction [165–168], en faisant varier la teneur en eau. Les résultats de ces mesures sont utilisés à la fois pour la première partie de ce chapitre et comme valeurs référence pour la validation de tests rhéologiques « de chantier ». Certains de ces tests ont été spécifiquement développés pour cette étude et d'autres sont issus de la littérature [13-16] :

- L'essai d'étalement est un essai utilisé dans la caractérisation du coulis de ciment ou des bétons autoplçants [167] ;
- Le cône de Marsh est utilisé pour la caractérisation des boues de carrière [12, 19] ;
- Les coupelles de viscosité sont utilisées dans les industries de l'huile et de la peinture [170] ;
- Un essai d'écoulement au cône a été développé. C'est une adaptation du plan incliné proposé par Coussot [161] pour l'étude de la stabilité des sols ;
- Un essai de plaque immergée a aussi été spécifiquement développé pour cette étude. Il est dérivé de l'essai à la plaque [21, 22] utilisé pour la caractérisation sur site des bétons autoplçants [18, 22–24].

4.2 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES BARBOTINES

4.2.1 DÉFINITIONS ET PRINCIPES RHÉOLOGIQUES

La rhéologie est connue sous le nom de science de la déformation et de l'écoulement de la matière, et l'accent mis sur l'écoulement signifie qu'elle s'intéresse à la relation entre la contrainte de cisaillement (τ en Pa) et le taux de déformation ($\dot{\gamma}$ en s^{-1}). La courbe mettant en relation ces deux paramètres s'appelle un rhéogramme. La Figure 4-2 présente des rhéogrammes types, définissant des familles de comportements rhéologiques. Ces dernières sont nommées selon les modèles correspondant à l'expression du comportement observé.

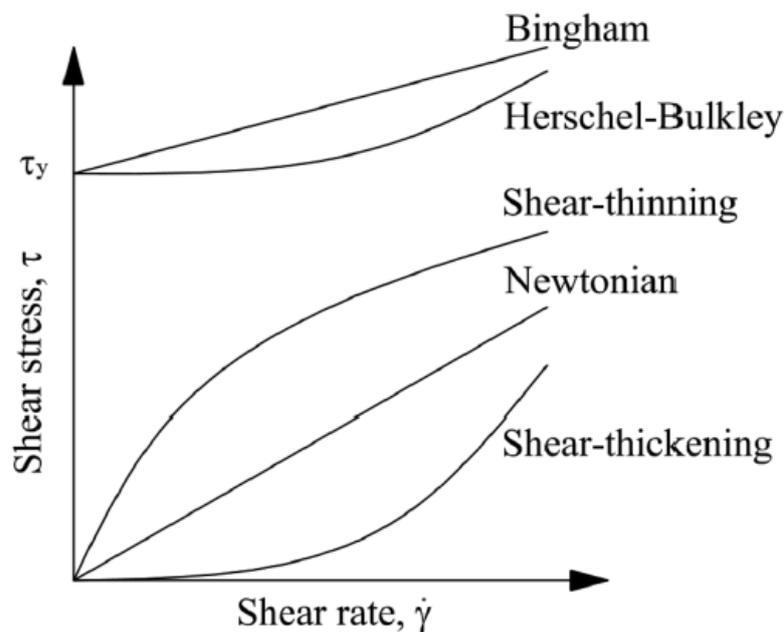


Figure 4-2: Rhéogrammes types de différents comportements rhéologiques observables [175].

Les matériaux granulaires pour la construction (barbotines, matériaux cimentaires) sont des fluides à seuil, c'est-à-dire qu'ils ne s'écoulent que si une contrainte suffisante, appelée contrainte seuil, leur est appliquée. Pour ces matériaux, l'évolution de leur contrainte d'écoulement en fonction du taux de cisaillement est généralement modélisée par des modèles de type Bingham ou Herschel-Bulkley (Figure 4-2). Dans ce cas, les propriétés d'écoulement du matériau sont caractérisées par deux paramètres principaux : le seuil de cisaillement (illustré par le seuil de cisaillement stationnaire τ_y sur la Figure 4-2) et un paramètre caractérisant la viscosité (par exemple le paramètre de consistance K dans la loi de Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$) [176]. Dans le cas des matériaux granulaires comme les boues, les barbotines ou les pâtes cimentaires, il faut distinguer le seuil de cisaillement stationnaire ou dynamique, obtenu en prenant l'ordonnée à l'origine du rhéogramme (Figure 4-2) et le seuil de cisaillement quasi-statique, obtenu par exemple lors d'un essai au scissomètre (Figure 4-3) [165]. Dans notre étude c'est ce seuil, appelé τ_0 , qui est caractérisé et mesuré. En effet les vitesses d'application et d'écoulement de la barbotine sont suffisamment faibles pour s'affranchir des mesures de viscosité. De plus, la caractérisation doit nous permettre d'évaluer la cohésion une fois en place de la barbotine, et sa capacité à ne pas s'écouler sous l'action du poids propre du mélange de terre allégée. Nous sommes donc en conditions statiques.

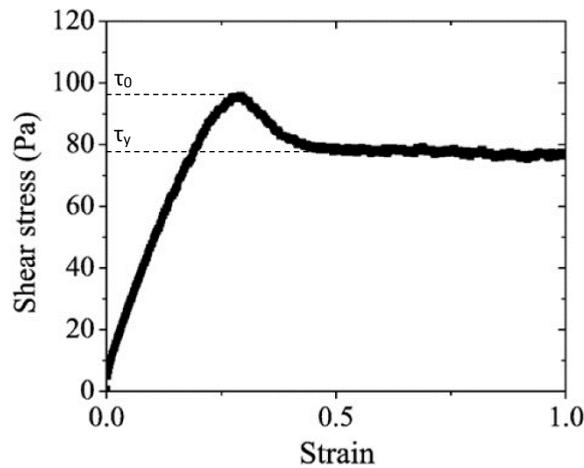


Figure 4-3: Courbe type contrainte déformation d'un essai au rhéomètre à bas régime, soit 0,01 s-1. [165]

4.2.2 PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES INFLUENÇANT LA RHÉOLOGIE

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, les barbotines sont composées de différentes tailles de granulats (argiles, limon et sable), de matière organique et d'eau. Les composants colloïdaux interagissent avec l'eau, par exemple par l'intermédiaire des couches d'argiles chargées. Le comportement d'une boue peut être très différent de celui d'une suspension de particules sans forces internes ayant pourtant la même fraction volumique solide. Lorsque des solides fins sont présents en quantité suffisante dans le mélange, ils provoquent une déviation du comportement par rapport à celui d'un liquide pur. Le fluide passe, par exemple, d'un comportement newtonien à un comportement de type Bingham. Le comportement rhéologique des suspensions de terre est donc généralement influencé par plusieurs facteurs : la fraction volumique solide et/ou la teneur en eau, la distribution granulaire et la morphologie des particules, l'activité ionique, la microstructure et l'agencement volumique des fines, le pH et la température.

Plusieurs études traitent de l'effet de la formulation (fraction solide et teneur en eau) sur les propriétés rhéologiques de l'argile naturelle. Ces études montrent notamment que le seuil de cisaillement augmente avec l'augmentation de la fraction volumique solide [27–30]. La Figure 4-4 illustre ce phénomène et sa dépendance à différentes natures de terres.

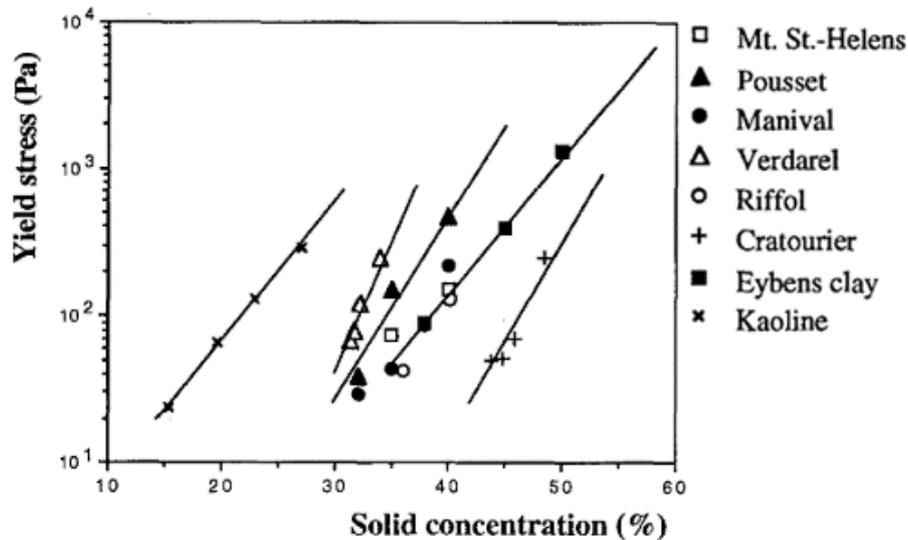


Figure 4-4: Seuil de cisaillement en fonction de la fraction volumique solide de différentes suspensions de terre [177].

En revanche, peu d'études ont évalué les effets de la fraction argileuse sur les propriétés rhéologiques de mélange sable-limon-argile. Marr et Parker montrent que le seuil de cisaillement augmente avec la diminution de la teneur en eau et l'augmentation de la fraction argileuse [181]. Ilstad et al. observent quant à eux une évolution exponentielle du seuil de cisaillement en fonction du rapport argile/sable [182].

La Figure 4-5 présente la relation entre granulométrie et comportement rhéologique d'un sol d'après Jeong et ses coauteurs [183]. Pour une même fraction volumique solide, les terres à granulométrie grossière ont un faible seuil de cisaillement, alors que les terres fines (dont le diamètre de granulat moyen est inférieur à $63\mu\text{m}$) ont un seuil de cisaillement élevé.

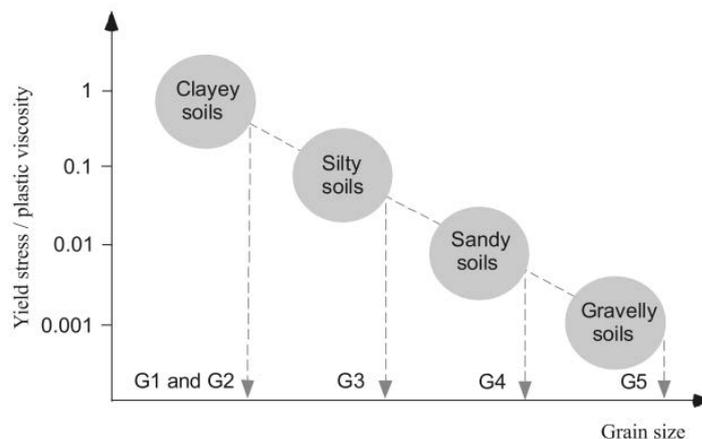


Figure 4-5: Rapport seuil de cisaillement et viscosité en fonction de la taille moyenne des particules. G1 indique une argile à faible activité ; G2, argile à haute activité. G3, terres limoneuses ; G4, terres sableuses ; G5, terres graveleuses [184].

L'augmentation de la taille moyenne des particules accentue la dispersion des résultats, rendant alors difficile la description du comportement rhéologique et l'adaptation d'un modèle approprié. Le changement de taille des particules peut ainsi produire une transition entre différents régimes rhéologiques [183]. La composition minéralogique de la fraction argileuse peut aussi avoir une influence significative sur les propriétés rhéologiques des suspensions de terre, notamment en terme de structuration au repos : plus l'activité argileuse est forte, plus le matériau a un comportement thixotrope à court terme [185].

La taille des particules d'argile est quant à elle variable en fonction de l'espace interfoliaire (Chapitre 1). La taille de cet espace varie lui-même en fonction des cations y étant adsorbés [35, 36]. Avec ces phénomènes, Williams, Neznayko et Weintritt [186] montrent que plus une terre a une activité argileuse forte, plus le seuil de cisaillement de cette terre mise en suspension est affecté par les cations adsorbés dans les couches interfoliaires.

Selon les paramètres évoqués précédemment, la microstructure de la barbotine c'est à dire l'assemblage des particules d'argiles dans la suspension, se présente de différentes manières [38–41]. La Figure 4-6 présente ces différents assemblages, en nommant les différents phénomènes et leur influence sur les propriétés rhéologiques de la suspension. Par exemple, une floculation ou un regroupement des particules feront croître le seuil de cisaillement, alors qu'une dispersion des particules le feront décroître.

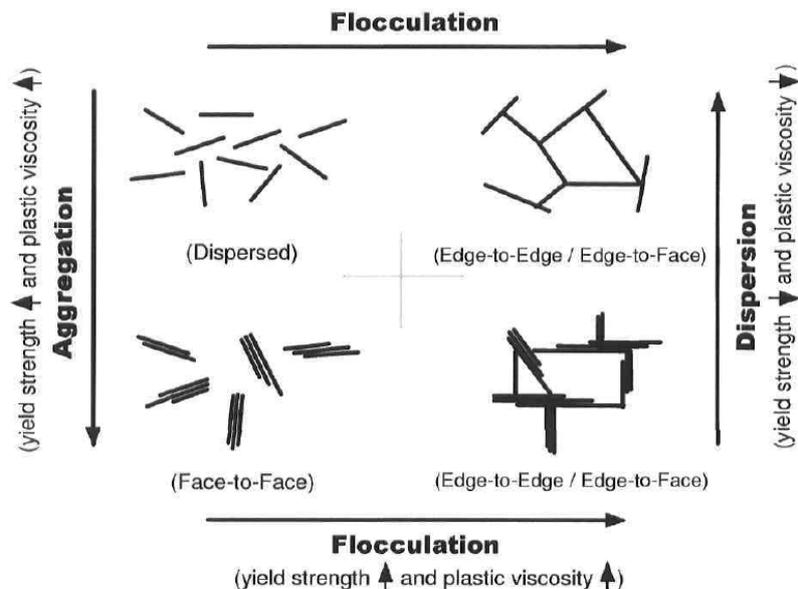


Figure 4-6: Représentation schématique des propriétés rhéologiques en fonction de l'association des particules d'argiles en suspension [187–190].

Les conditions extérieures peuvent aussi influencer sur la rhéologie des matériaux, comme l'ont montré Coussot et Piau [177]. C'est pourquoi tous nos essais ont été réalisés à des températures ambiantes comprises entre 15 et 25°C, pour lesquelles peu de différences sont mesurées dans la littérature.

Ainsi dans cette partie, après avoir décrit les matériaux étudiés nous caractérisons le comportement rhéologique de nos barbotines par la mesure du seuil de cisaillement. Compte-tenu des résultats de la littérature évoqués ci-dessus, une analyse des liens potentiels entre les caractéristiques intrinsèques de la barbotine (formulation, activité argileuse, distribution granulaire) et sa cohésion (seuil d'écoulement) est proposée.

4.3 MATÉRIAUX

4.3.1 ÉCHANTILLONS À L'ÉTUDE

Les échantillons sont fabriqués à partir de terre brute :

1. La terre est mélangée avec une petite quantité d'eau (rapport massique 1:1) ;
2. Le mélange est réalisé avec un malaxeur à mortier pendant 5 minutes ;
3. La barbotine est tamisée à l'aide d'un tamis à mailles carrées de 2 mm ;
4. La barbotine est maintenue au repos pendant 24 heures afin d'assurer la dilution de toutes les mottes de terre ;

5. La barbotine est mixée avec un malaxeur à pales pendant 1 minute ;
6. La teneur en eau est mesurée par séchage au four d'un échantillon de barbotine (à 105°C, jusqu'à stabilisation de la masse, selon XP CEN ISO/TS 17892-1).
7. La formulation de la barbotine est modifiée afin de viser une certaine teneur en eau (par décantation ou séchage à 40°C pour la faire baisser ; par simple ajout d'eau pour l'augmenter)

Le protocole ci-dessus permet d'obtenir une barbotine à une teneur en eau connue. Pour chaque terre différentes dilutions sont ainsi réalisées afin d'observer le comportement rhéologique en fonction de la teneur en eau (ou de la fraction volumique solide).

4.4 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES BARBOTINES EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION

4.4.1 MESURES AU RHÉOMÈTRE

Pour la validation des différentes méthodes de mesures expérimentales et l'implémentation du modèle, les valeurs de seuil de cisaillement ont été mesurées à l'aide d'un rhéomètre équipé d'une géométrie Vane. Les mélanges sont versés dans un récipient cylindrique et vigoureusement mélangés à la main juste avant l'essai pour éviter les biais induits par la thixotropie et la ségrégation au sein du matériau. La température de la barbotine est mesurée. Ces précautions sont prises pour éviter le biais de mesure qui pourrait être dû aux variations de température, à la sédimentation ou à la structuration qui se produisent dans les barbotines au repos. L'appareil est un rhéomètre QC Anton Paar Rheolab. Les quatre pales de la géométrie Vane mesurent 6 cm de hauteur et 4 cm de diamètre. La procédure de mesure est similaire à celle utilisée dans la littérature [165,172]. Une déformation croissante est appliquée à l'échantillon à un taux de cisaillement de 0,01 s⁻¹ pendant 400 s. Avec un taux de cisaillement aussi faible, les effets de viscosité sont négligeables et le seuil de cisaillement peut être déduit de la valeur du couple maximal mesuré (Figure 4-7 et équation 4-1). Chaque mesure de seuil de cisaillement a été effectuée au minimum trois fois.

La Figure 4-7 présente trois courbes brutes obtenues lors d'un essai sur la barbotine de référence. On observe ici une bonne répétabilité (écart type de 1.4%) entre les trois couples maximaux. Ces valeurs maximales permettent de calculer la contrainte seuil en utilisant l'équation 4-1 :

$$\tau_0 = \frac{M}{2\pi r^2 \left(h + \frac{2r}{3} \right)} \quad 4-1$$

Avec M le couple, r le rayon de l'outil utilisé et h la hauteur de ce même outil.

Lors de nos mesures, une attention particulière a aussi été portée aux limites de la géométrie Vane. Pierre et al [191] définissent un rapport v qui indique la position verticale de stabilité/instabilité par rapport à la surface de cisaillement décrite par la géométrie Vane en rotation (équation 4-2).

$$v = \frac{1}{h_c} \frac{\sqrt{3}\tau_0}{\rho g} \quad 4-2$$

Avec h_c , la hauteur de l'outil, τ_0 et ρ respectivement le seuil de cisaillement de la pâte et sa densité. Si ce rapport est proche ou supérieur à 1, le matériau testé est trop rigide pour s'écouler. De plus, si la terre testée présente un comportement de gonflement, des espaces vides autour de l'outil peuvent apparaître. Les barbotines testées montrent des seuils de cisaillement allant d'environ 0 à environ 850 Pa, avec des fractions volumiques solides évoluant de 0.11 à 0.8. Le rapport v (équation 4-2) a été calculé pour chaque mesure au rhéomètre. Quel que soit le type de terre, la limite de $v = 1$ est atteinte pour un seuil de cisaillement de 495 Pa. La variabilité constatée des mesures confirme ce phénomène : pour des seuils mesurés inférieurs à 495 Pa, l'écart type maximum est de 5% et au-dessus de 495 Pa, l'écart type peut atteindre 95%.

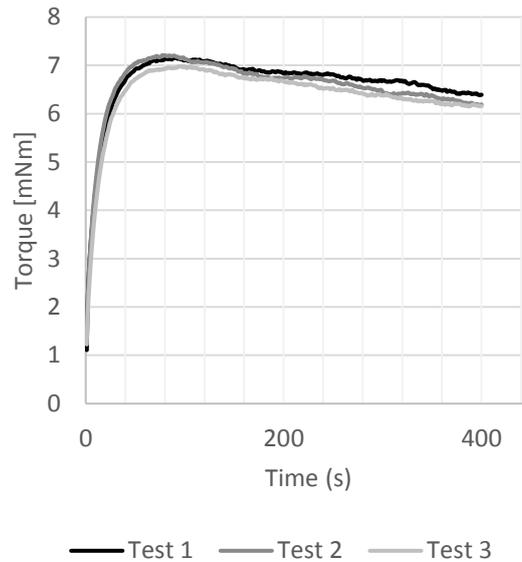


Figure 4-7: Courbes brutes d'essais réalisés sur une barbotine de terre (T1).

4.4.2 RÉSULTATS ET ANALYSE DES COMPORTEMENTS RHÉOLOGIQUES DES DIFFÉRENTES TERRES

La Figure 4-8 présente la première campagne menée afin de mesurer pour les six terres sélectionnées l'influence de la teneur en eau (i.e. l'influence de la fraction volumique solide, Figure 4-9) sur le seuil de cisaillement. La plupart des terres présentent des courbes d'allure similaire : le seuil augmente de manière exponentielle lorsque la teneur en eau diminue. En revanche, pour un seuil visé, les teneurs en eau des barbotines varient fortement en fonction de la terre utilisée : par exemple la terre T2 aura un seuil de 20 Pa pour une teneur en eau de 0.4 alors que pour viser le même seuil, la terre T4 aura une teneur en eau de 1.9. Ces résultats sont importants pour la formulation sur chantier : une terre plus cohésive permettra de formuler des mélanges terre/chanvre avec moins d'eau et plus de chènevotte, conduisant à de meilleures propriétés d'isolation thermique.

À droite, dans la Figure 4-8, est rappelée la granulométrie des terres utilisées pour fabriquer les barbotines. Il est ici remarquable que l'ordre dans lequel se trouve les courbes de seuil de cisaillement (à gauche sur la Figure 4-8), n'est pas directement lié au taux d'argile mesuré par granulométrie. En revanche, si l'on prend les résultats de DRX (Chapitre 1), on constate que l'ordre des courbes de seuil de cisaillement correspond mieux aux taux d'argile estimé par la DRX. C'est notamment le cas de T6, qui n'a pas le plus haut taux d'argile selon la granulométrie, mais est la terre la plus argileuse selon la DRX.

4.4.3 VERS UNE MODÉLISATION DU SEUIL DE CISAILLEMENT

La Figure 4-8 présente les résultats des essais au rhéomètre de 5 des 6 barbotines, conjointement avec leur modèle exponentiel respectif. Le modèle est de type $\tau_0 = ae^{bx}$, avec a et b les paramètres du modèle. La barbotine T4 présente une évolution du seuil de cisaillement en fonction de la teneur en eau proche de la barbotine T1, elle n'est pas représentée ici. Différentes tendances sont constatées. Par exemple, les courbes T6 et T5 se croisent. Les autres courbes présentent des évolutions plutôt similaires mais dans des gammes de teneurs en eau différentes. Les coefficients de détermination de ces différents modèles exponentiels varient entre 0.89 et 0.96.

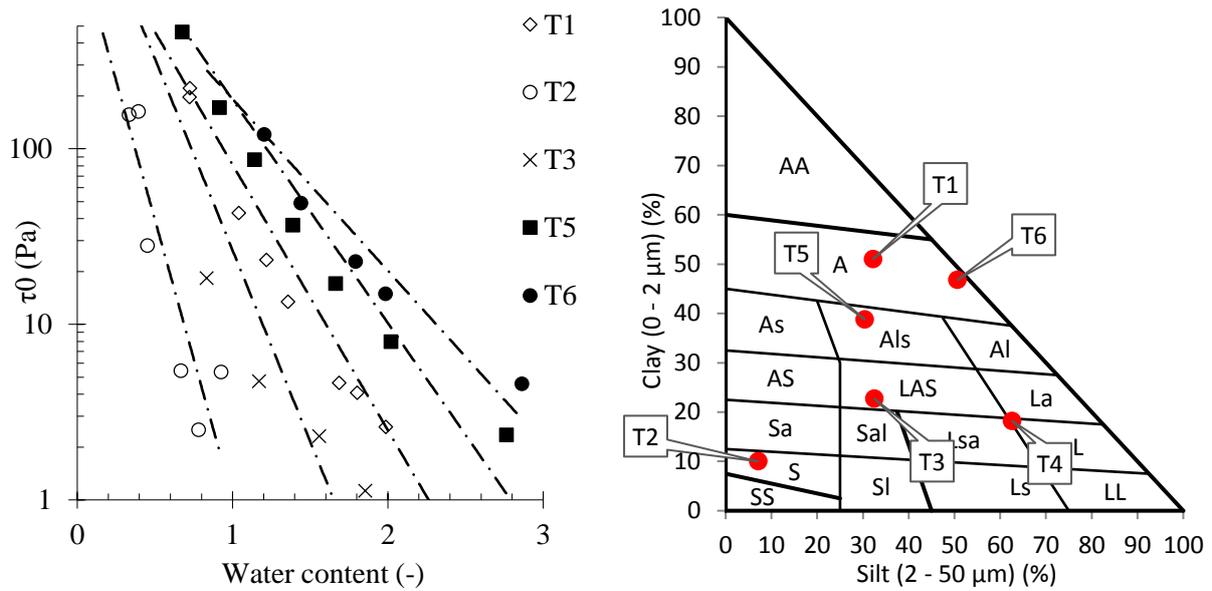


Figure 4-8: Gauche, Points expérimentaux et modélisation (en tirets) selon une exponentielle des courbes seuil de cisaillement vs teneur en eau des barbotines. Droite, textures des terres utilisées.

La modélisation par une exponentielle n'a en revanche pas de sens physique : c'est un modèle purement phénoménologique. Flatt et ses coauteurs proposent une méthode de modélisation du seuil de cisaillement de suspensions granulaires [43, 44] en fonction de la fraction volumique solide de la suspension : le YODEL (pour Yield stress MODEL) se présente par exemple de la manière suivante :

$$\tau_0 = m_1 \frac{\Phi(\Phi - \Phi_0)^2}{\Phi_{max}(\Phi_{max} - \Phi)} \quad 4-3$$

Avec Φ la fraction volumique solide de la suspension testée, Φ_0 la fraction volumique minimale ou seuil de percolation, Φ_{max} la fraction volumique maximale ou « maximum packing ». Ces deux paramètres dépendent de la forme et de la distribution granulométrique des particules en suspension. Par exemple, Flatt et Bowen [43, 44] proposent les valeurs de $\Phi_0 = 0.026$ et $\Phi_{max} = 0.57$ pour une suspension de poudre d'alumine. « m_1 » est un paramètre lié au forces interparticulaires. Comme décrit dans le Chapitre 1, les particules d'argile présentent différents types d'interactions sans contact. Dans le cas de Flatt et al, utilisant des suspensions de poudres, les interactions entre particules dépendent des surfaces des contacts entre particules, de la granulométrie, du rayon moyen des particules et des forces d'interaction de type Van Der Waals. La fonction suivante est présentée pour le calcul de m_1 :

$$m_1 = \frac{1.8}{\pi^4} G_{max} a^* u_{k,k} \left(\frac{f_{\sigma,\Delta}^*}{R_{v,50}^2} \right) \quad 4-4$$

Avec G_{max} la force d'attraction maximale interparticulaires, a^* le rayon de courbure des points de contact, $f_{\sigma,\Delta}^*$ une fonction permettant la prise en compte de la granulométrie, normalisé par la fonction $u_{k,k}$ dans le cas de sphères mono disperses, et $R_{v,50}$ le rayon moyen des particules. Dans cette formule, et dans le cas où principalement des forces de Van der Waals sont à l'œuvre, G_{max} se calcule de la sorte :

$$G_{max} = \frac{A_0}{12H^2} \quad 4-5$$

Où A_0 est la constante d'Hamaker et H la distance minimale entre les particules.

Lecompte et al. et Perrot et al. mettent en œuvre le YODEL pour la modélisation du comportement rhéologique de pâtes cimentaires [166,168]. Dans ce cas, le paramètre m_1 devient :

$$m_1 = m \frac{A_0 a^*}{R_{v,50}^2 H^2} \quad 4-6$$

Avec m un pré-facteur dépendant de la granulométrie.

Au début de ce chapitre a été présenté la forte influence de la granulométrie sur le comportement rhéologique, et notamment l'effet de particules grossières comme le sable sur le seuil de cisaillement. Or, malgré la prise en compte de cette granulométrie dans le paramètre m_1 , les fractions volumiques considérées sont celles de l'ensemble du spectre granulaire. Mahaut et al. [165], et Perrot et al. [172] prennent en compte une granulométrie bi-phasée dans le cas de matériaux cimentaires. Cela permet notamment d'inclure le seuil de cisaillement d'une pâte de ciment seule dans une suspension contenant un volume connu de sable. Le seuil de cisaillement de l'ensemble (ciment-eau-sable) est corrigé en utilisant l'équation 4-7.

$$\tau_0 = \tau_0^{CP} \cdot \sqrt{\frac{1 - \Phi_s}{(1 - \Phi_s / \Phi_{smax})^{2.5 \Phi_{smax}}}} \quad 4-7$$

Avec τ_0^{CP} le seuil de cisaillement de la phase cimentaire (ciment+eau), Φ_s la fraction volumique de sable dans l'ensemble et Φ_{smax} la fraction volumique maximale du sable seul.

Ainsi, afin de séparer directement la participation du sable et celle des fines (limon et argile dans notre cas) dans le seuil de cisaillement d'une barbotine, les équations 4-3 et 4-7 sont assemblées pour obtenir l'équation 4-8.

$$\tau_0 = m_1 \frac{\Phi_f (\Phi_f - \Phi_{f0})^2}{\Phi_{fmax} (\Phi_{fmax} - \Phi_f)} \times \sqrt{\frac{1 - \Phi_s}{(1 - \Phi_s / \Phi_{smax})^{2.5 \Phi_{smax}}}} \quad 4-8$$

Avec Φ_f la fraction volumique d'argile et de limon, Φ_{f0} la fraction volumique de percolation des fines, Φ_{fmax} la fraction volumique maximale des fines et Φ_{smax} la fraction maximale de sable

L'équation 4-8 est utilisée pour modéliser les résultats des 6 terres. Pour ce faire, la fraction volumique de percolation des fines a été fixée à 0.026. Connaissant la granulométrie des terres, les fractions volumiques de fines et de sable sont connues pour les différentes teneur en eau testées. Ainsi, m_1 , Φ_{fmax} et Φ_{smax} sont des paramètres d'ajustement du modèle. Dans un second temps, les valeurs obtenus pour ces paramètres sont comparées aux caractéristiques géotechniques des terres.

Afin d'optimiser les trois paramètres du modèle, le logiciel d'optimisation Sidolo, développé à l'Université Bretagne Sud a été utilisé. La méthode ainsi que des exemples d'utilisation sont présents dans la littérature [45, 46]. Les paramètres trouvés, correspondant à chaque barbotine, sont présentés sous forme de tableau en annexe n°0. La Figure 4-9 présente les corrélations trouvées après optimisation des paramètres du modèle. Les résultats expérimentaux et les valeurs calculées par le modèle sont proches dans l'ensemble. Le coefficient de corrélation

a été calculé pour chaque modélisation. Il varie entre 0.98 et 0.99. Comme les mesures ne sont pas parfaitement fiables au-dessus de 500 Pa, les points de seuil de cisaillement supérieurs à cette valeur ne sont pas représentés : la valeur du seuil tend vers l'infini à l'approche de la fraction solide maximale dans le cas du modèle alors que dans la réalité, l'empilement granulaire n'est plus saturé en eau et son comportement devient frottant, comme montré par Perrot et al. [172].

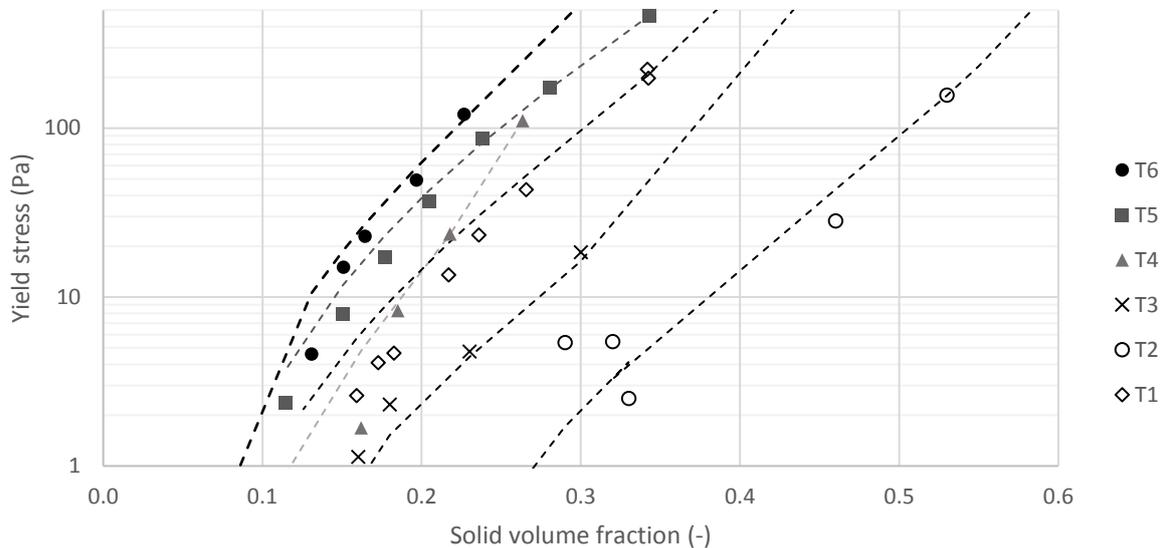
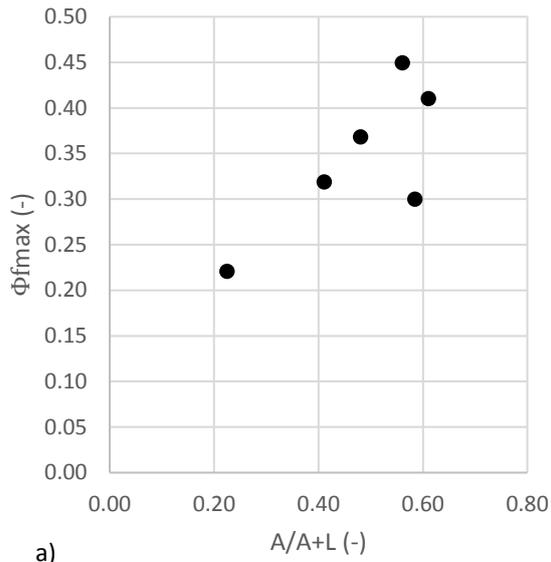
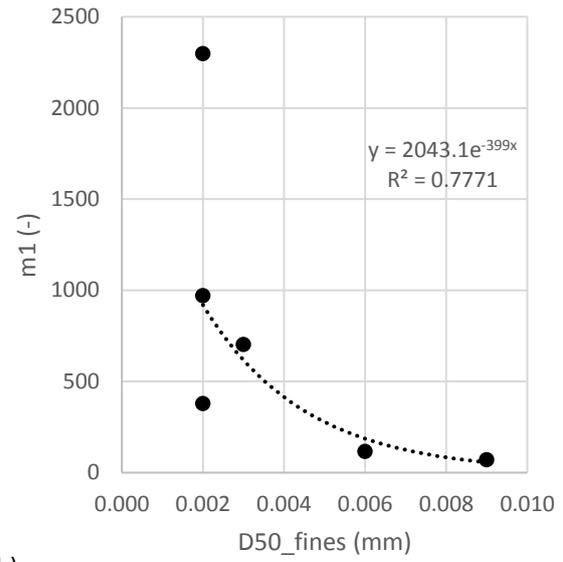


Figure 4-9: Points expérimentaux et modélisation (en tirets) selon le YODEL des courbes seuil de cisaillement vs fraction volumique solide des barbotines.

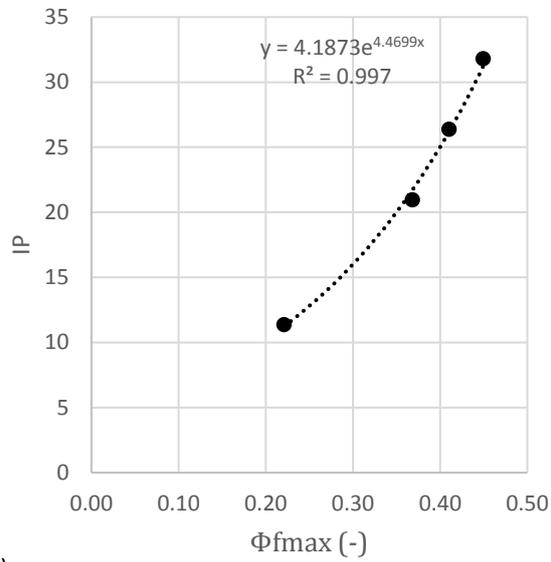
La Figure 4-10 présente quelques corrélations potentielles entre les paramètres du modèle et les caractéristiques géotechniques. Premièrement, pour l'ensemble des terres, le Φ_{smax} a été laissé libre et présente une variation moyenne dans les résultats (entre 0.5 et 0.56). Bien que la granulométrie de nos terres soit très variable, il est probable que l'empilement granulaire des particules grossières (sable) varie très peu. En revanche, le Φ_{fmax} varie de manière importante (entre 0.22 et 0.45). Il apparaît que ce paramètre varie plus facilement avec la granulométrie, et probablement l'activité des particules fines. La Figure 4-10a présente le lien entre Φ_{fmax} et la fraction argileuse des fines (rapport argile sur argile + limon). La corrélation n'est pas évidente, mais il apparaît que le paramètre Φ_{fmax} augmente avec la fraction argileuse. La problématique est complexe car, selon le types d'argiles et leurs interactions, l'association des plaquettes d'argiles peut se faire de différentes manières et ainsi créer différents types d'empilements granulaires. De plus, nous utilisons ici un modèle considérant des particules sphériques, alors que les argiles sont majoritairement parallélépipédiques. Selon la Figure 4-10c, Φ_{fmax} est en revanche très bien corrélé à l'indice de plasticité des terres. On retrouve des corrélations entre propriétés rhéologiques et limites d'Atterberg dans la littérature [9, 35]. Comme indiqué en Chapitre 1, les limites d'Atterberg représentent déjà une caractérisation rhéologique des terres prenant en compte plusieurs caractéristiques tels que la granulométrie et l'activité argileuse. Pour finir, la Figure 4-10b présente un lien entre le paramètre m_1 et la taille moyenne de la fraction argile + limon. m_1 semble augmenter fortement avec la diminution de la taille moyenne des particules fines. Ce phénomène correspond à la description faite par l'équation 4-8 (évolution en $1/R_{50}^2$). Seulement, il est encore difficile de lier les paramètres rhéologiques à l'activité argileuse (CEC). La granulométrie est ici un paramètre d'ordre 1 dans l'interaction entre les particules, devant l'activité argileuse.



a)



b)



c)

Figure 4-10: Corrélations entre paramètres du YODEL et caractéristiques géotechniques : a) Fraction volumique solide maximale des fines vs fraction argileuse des fines ; paramètre m1 vs taille moyenne des fines ; Indice de plasticité vs fraction volumique maximale des fines.

4.5 PROPOSITION DE MÉTHODES DE MESURE DU SEUIL DE CISAILEMENT SUR SITE

4.5.1 MÉTHODES EXISTANTES ET DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES DE MESURE DU SEUIL DE CISAILEMENT APPLICABLES SUR CHANTIER

4.5.1.1 ESSAI D'AFFAISSEMENT/ D'ÉTALEMENT

Les essais d'affaissement et d'étalement (slump test ; spreading test) sont largement utilisés dans l'industrie de la construction pour évaluer l'ouvrabilité des mortiers et bétons. Il s'agit de verser et de compacter la pâte cimentaire dans un tronc de cône (Figure 4-11) et de mesurer l'affaissement ou le diamètre d'étalement après soulèvement du contenant pour estimer son ouvrabilité [47, 48]. Les géométries les plus couramment utilisées pour ces essais sont le cône d'Abrams ASTM ($H_0=300\text{mm}$, $R_{0\text{max}}=100\text{mm}$, $R_{0\text{min}}=50\text{mm}$) et le minicône ASTM ($H_0=50\text{mm}$, $R_{0\text{max}}=50\text{mm}$ et $R_{0\text{min}}=35\text{mm}$). Pour les pâtes fluides telles que les barbotines ici étudiées, un récipient cylindrique peut également être utilisé. Dans la présente étude, le cylindre et le cône ont tous deux été testés, avec des rapports d'aspect et des volumes différents :

- Un cylindre d'un rayon R_0 de 27 mm et d'une hauteur H_0 de 90 mm, pour un volume V de 0.206 dm³ et un rapport d'aspect de 1.67 ;
- Un cône avec $H_0 = 150$ mm, $R_{0\text{max}} = 100$ mm, $R_{0\text{min}} = 50$ mm, pour un volume V de 2.75 L et un rapport d'aspect moyen de l'ordre de 1.

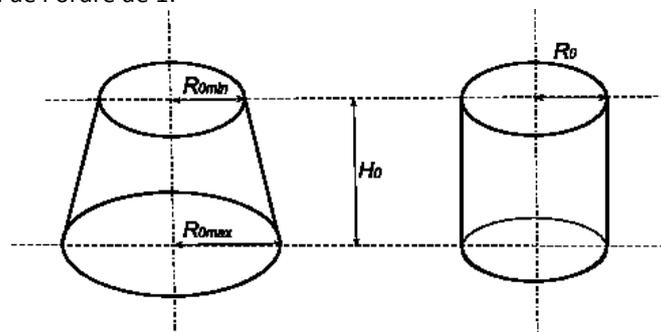


Figure 4-11: Formes initiales pour l'essai d'affaissement/d'étalement.

Des formules analytiques reliant l'affaissement et l'étalement au seuil de cisaillement d'une suspension granulaire ont été proposées dans la littérature [17, 49]. Quatre comportements d'écoulement distincts peuvent être observés lors du levage du contenant :

- Pas d'affaissement : théoriquement, si l'on suppose que la pâte subit uniquement une déformation élongationnelle et que le critère de Von Mises est appliqué, il existe un seuil de cisaillement critique, égal à $\sqrt{3}\rho g H_0$, pour lequel aucun écoulement ne sera observé. Les simulations numériques et les résultats expérimentaux de Roussel et Coussot sur le cône d'Abrams et le minicône ASTM [167] confirment cette valeur de seuil critique. Au-delà de ce seuil, la pâte est trop rigide pour céder sous son propre poids. Ce type d'essai n'est donc plus adapté et pour mesurer un seuil, l'écoulement doit être forcé, par exemple par un essai d'écrasement (squeeze flow) [198] ou un essai de chute (dropping test) [156].
- Affaissement, sans étalement : la forme finale est proche de la forme initiale, les variations de contrainte et de déformation dans le sens radial sont faibles, ce qui donne une forme finale légèrement en tonneau. Dans ce cas, en considérant une déformation purement élongationnelle, Roussel et Coussot [167] et Pierre, Lanos et Estellé [197] appliquent à la pâte un critère de Von Mises qui conduit à l'expression analytique du seuil de cisaillement τ_0 en fonction de la valeur de l'affaissement S (ou de la hauteur finale H) :

$$\tau_0 = \frac{\rho g H}{\sqrt{3}} = \frac{\rho g (H_0 - S)}{\sqrt{3}} \quad 4-9$$

Cette expression théorique n'est valable que si l'on suppose une hauteur initiale élevée par rapport au rayon initial de l'échantillon. Roussel et Coussot [167] montrent qu'il est précis pour un seuil de

cisaillement sans dimension ($\tau'_0 = \frac{\tau_0}{\rho g H_0}$) supérieur à 0.45, c'est-à-dire un affaissement sans dimension $S' = \frac{S}{H_0}$ inférieur à 0.22.

- Étalement (écoulement en cisaillement pur, avec une hauteur finale $H \ll$ rayon final d'étalement R) : dans ce cas, Roussel et Coussot [167] proposent une formule reliant la limite élastique et le rayon d'étalement (R) :

$$\tau_0 = \frac{225\rho g V^2}{128\pi^2 R^5} \quad 4-10$$

Avec V le volume de pâte, ρ sa densité et R le rayon final d'étalement

- Étalement, avec un cône ou un cylindre résiduel (mélange d'affaissement et de régime d'étalement) : Pierre, Lanos et Estellé [197] proposent une formulation analytique pour ce régime intermédiaire. Ils supposent que la partie supérieure de l'échantillon, qu'ils appellent "chapeau", et la zone centrale de la partie inférieure ne sont soumises qu'à un écoulement élongationnel (équation 4-10). En revanche, ils considèrent un cisaillement pur dans la zone d'étalement de la partie inférieure, ce qui les amène à considérer la racine positive d'un polynôme du second degré :

$$\tau_0 = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 + 4aV_0}}{2a} \right)^2 \quad 4-11$$

Avec :

$$a = \frac{\pi R_0^2 \sqrt{3}}{\rho g} \quad 4-12$$

$$b = \left[\frac{8\pi}{15} (R - R_0)^{5/2} + \frac{4\pi}{3} R_0 (R - R_0)^{3/2} + \pi R_0^2 (R - R_0)^{1/2} \right] \sqrt{\frac{2}{\rho g}} \quad 4-13$$

Dans cette équation, R est le rayon final d'étalement, R_0 est le rayon du « chapeau », V_0 est le volume initial de l'échantillon, ρ est la masse volumique de la pâte.

Selon Roussel [167], l'angle de mouillage du matériau sur la surface solide influence le seuil de cisaillement mesuré. L'amélioration du mouillage de la surface (soit un angle de mouillage Θ proche de 0) pourrait théoriquement fournir une mesure infiniment petite du seuil de cisaillement. De plus, un certain glissement pourrait se produire à l'interface, en raison de la propriété lubrifiante bien connue des suspensions argileuses. Afin d'examiner ces phénomènes possibles, deux cas de rugosité de surface ont été testés, l'un avec du papier de verre, l'autre avec une surface mélaminée. De plus, comme indiqué plus haut (Figure 4-11), l'influence de la géométrie (forme et rapport d'aspect) a été évaluée.

4.5.1.2 PLAQUE IMMERGÉE

Un essai de plaque a été développé dans les années 1980 par Lombardi pour évaluer la cohésion de pâtes cimentaires [199]. Il s'agit d'une plaque métallique carrée, munie d'une balance qui mesure le poids de la pâte restant à la surface de la plaque après immersion dans la pâte. Sonebi, Svermova et Bartos [171] l'utilisent sur des coulis de ciment mais ne proposent pas de relation entre la masse résiduelle de pâte et le seuil de cisaillement. Cependant, la connaissance de la masse M et de l'aire de la plaque A devrait théoriquement permettre d'estimer un seuil de cisaillement :

$$\tau_0 = \frac{Mg}{A}$$

4-14

Dans la pratique, les résultats sont très variables : lorsque la plaque sort du mélange, des tensions de surface à l'interface fluide/air retiennent une partie de la matière dans la suspension, comme montré par Maillard et al [200] dans leur étude sur l'enduction par trempage. Par conséquent, l'équation 4-14 n'est plus valide.

Par ailleurs, un essai de plaque « statique » a été développé par Amziane, Perrot et Lecompte [173] afin de mesurer l'évolution du seuil de cisaillement d'une pâte cimentaire au repos.

Dans la présente étude, afin d'estimer au mieux le seuil de cisaillement et de s'affranchir des effets du temps de repos (ségrégation, thixotropie) et d'évaluer les effets de tension de surface à la sortie de l'outil, la plaque a été mise en mouvement et pesée à l'aide d'un capteur de force de 10N de capacité pendant l'immersion et jusqu'à sa sortie complète de la pâte (Figure 4-12.I). La plage de validité de mesures de l'essai dépend du capteur de force et de la géométrie de la plaque. Dans le cas présent, nous avons choisi de maximiser la surface de contact en utilisant une plaque cylindrique recouverte de papier de verre, en contact avec la pâte sur ses faces extérieure et intérieure (Figure 4-12.II). La tôle cylindrique utilisée a une hauteur de 100 mm, un diamètre de 150 mm et une épaisseur de 4 mm plus le papier de verre. Avec une telle géométrie, le seuil de cisaillement maximal mesurable est de 100 Pa. Ainsi, la différence avec les travaux de Sonebi, Svermova et Bartos [171] est que dans le cas présent, un petit actionneur soulève la plaque, à une vitesse de 2,5 mm/s, jusqu'à la sortie complète, avec une mesure continue du poids apparent de la plaque. Juste avant l'essai, la barbotine est vigoureusement mélangée à la main pour éviter les effets de thixotropie ou de sédimentation, le capteur de force est taré pour annuler le poids de la plaque, et la plaque est immédiatement immergée. Ensuite, le moteur commence à soulever la plaque. Le capteur de force ne mesure qu'un poids apparent de matière, renommé W' , qui s'oppose à la montée de la plaque ($W' = W +$ poussée d'Archimède), Figure 4-12-I.

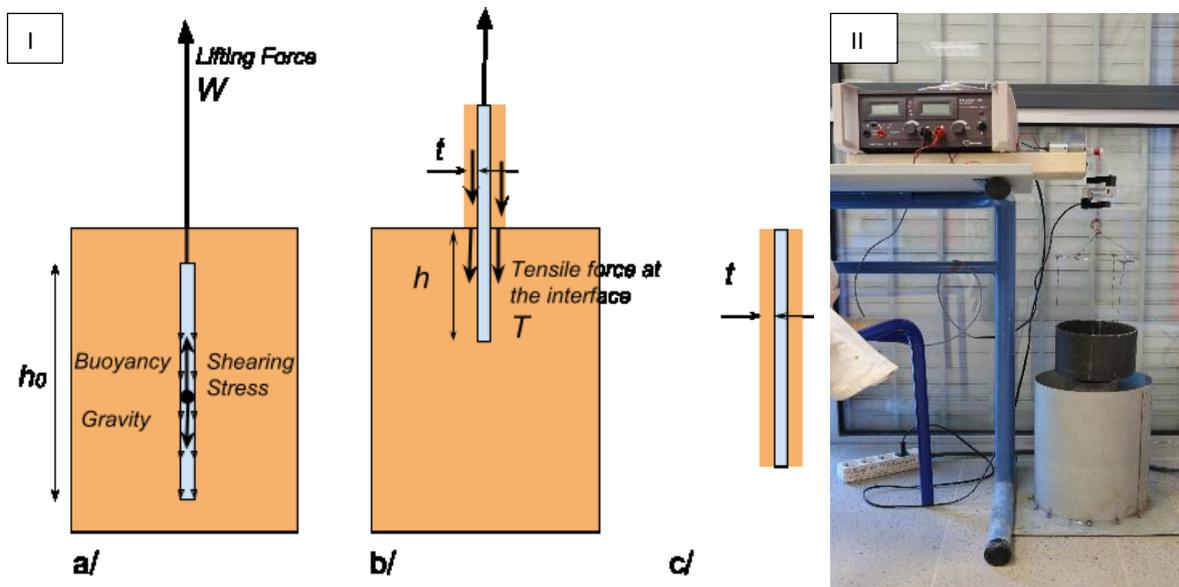


Figure 4-12 I) Le test d'immersion : a/ état initial ; b/ dispositif partiellement sorti ; c/appareil totalement sorti. II) Le dispositif expérimental développé pour l'essai.

Le cadre théorique est le même que pour l'essai de plaque d'Amziane, Perrot et Lecompte [173]. Trois phases distinctes doivent être prises en considération (Figure 4-12-I) :

- Le cylindre est totalement immergé et est soulevée par le moteur :

Dans ce cas, la barbotine est en écoulement le long de la plaque et sollicite la contrainte seuil, dépendante de la charge apparente :

$$\tau_0 = \frac{W + \rho g V_0 - M_0 g}{A_0} = \frac{W'}{A_0} \quad 4-15$$

Avec A_0 , V_0 et M_0 respectivement la surface, le volume et la masse de la plaque cylindrique et ρ la densité de la suspension.

- Le cylindre est partiellement sorti :

La partie immergée supporte la même charge de cisaillement que dans le premier cas, et la partie extérieure supporte le poids de la barbotine restant sur la surface de la plaque. De plus, la poussée d'Archimède de la partie extérieure de la plaque n'existe plus, et une tension de surface T à l'interface fluide/air s'oppose à la montée du dispositif :

$$W = \frac{\tau_0 A_0 h}{h_0} + \rho g t A_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) + T - \rho g V_0 \frac{h}{h_0} + M_0 g \quad 4-16$$

$$W' = \frac{\tau_0 A_0 h}{h_0} + \rho g t A_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) + T + \rho g V_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) \quad 4-17$$

Avec h_0 la hauteur de la tôle, h la hauteur immergée, t l'épaisseur de la barbotine restant sur la partie extérieure, ρ la densité de la barbotine et T la force de traction à l'interface fluide/air. Dans une première approximation, la tension de surface est estimée en considérant un simple critère de Von Mises :

$$T = 2\sqrt{3}\tau_0 t p_0 \quad 4-18$$

Avec p_0 le périmètre du cylindre.

Cela donne une estimation analytique du seuil de cisaillement lorsque le cylindre est partiellement sorti :

$$\tau_0 = \frac{W' - \rho g \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) (V_0 + t A_0)}{A_0 \frac{h}{h_0} + 2\sqrt{3}\tau_0 t p_0} \quad 4-19$$

- Le cylindre est complètement sorti :

Nous pesons la barbotine restant à la surface du cylindre, et nous prenons en compte la disparition de la poussée d'Archimède. On peut déduire l'épaisseur t moyenne de pâte restant sur la plaque en utilisant cette mesure de poids et la densité de la barbotine :

$$t = \frac{W - M_0 g}{\rho g A_0} = \frac{\frac{W'}{\rho g} - V_0}{A_0} \quad 4-20$$

Où A_0 et V_0 sont respectivement la surface et le volume de la plaque, et ρ est la densité de la barbotine. Comme Maillard et al [200] l'ont montré, cette épaisseur ne peut pas être directement liée au seuil de cisaillement du fluide. L'effet de la gravité, de la viscosité de la pâte et éventuellement les effets capillaires donnent d'autres formules analytiques pour t . Maillard et al [200] constatent que, approximativement, l'épaisseur t avec de faibles vitesses et peu d'effets capillaires (seuil de cisaillement supérieur à 25 Pa) peuvent être exprimés pour les fluides à seuil comme :

$$t \approx 0.3 \frac{\tau_0}{\rho g}$$

4-21

C'est moins d'un tiers de l'épaisseur maximale que la tôle pourrait théoriquement soulever si la pâte sollicitait la totalité du seuil de cisaillement (équation 4-14).

Les mesures de force et de position du cylindre par rapport à la surface du mélange sont utilisées pour calculer le seuil de cisaillement lorsque la tôle est totalement ou partiellement immergée. La Figure 4-13 montre les résultats avec les données brutes W' (Figure 4-13a) et l'estimation du seuil de cisaillement (Figure 4-13b) en utilisant les équations 4-15 4-16 et 4-19 :

- La première phase de la courbe est proche d'une mesure au rhéomètre : une phase élastique puis une phase plastique avec un maximum sont observées.
- La deuxième phase présente une valeur de seuil de cisaillement variable. Il semble que l'effet de bord à l'interface fluide/air n'est pas négligeable et affecte la mesure lorsque la plaque est majoritairement en dehors du fluide.

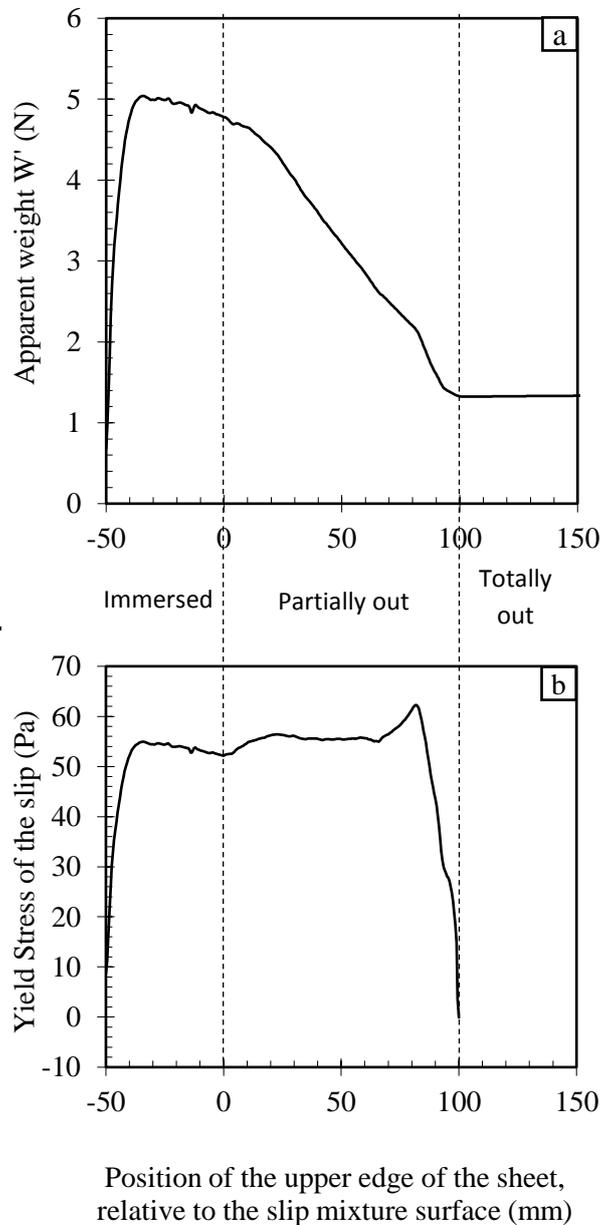


Figure 4-13 Résultats typiques des mesures sur plaque immergée (a) : données brutes, (b) : estimation du seuil de cisaillement

4.5.1.3 CÔNE À PAROI RUGUEUSE

Cet essai est inspiré des travaux de Coussot, qui avait étudié la stabilité de boues et de sols via un essai de plan incliné [11, 27]. Le principe de cet essai est d'évaluer les caractéristiques d'écoulement en surface libre de suspensions assimilables à des fluides à seuil, en mesurant l'épaisseur d'équilibre de la suspension sur un plan d'une pente donnée, sous un régime d'écoulement permanent. Dans la pratique, il s'agit d'une pente plane infinie sur laquelle un mélange est versé assez lentement pour éviter les effets d'inertie et pour obtenir une hauteur de matériau uniforme. Un flux de matériau à peu près constant est imposé puis progressivement arrêté. Compte tenu de l'écoulement libre à la surface de l'outil, un simple équilibre des forces conduit à un calcul du seuil de cisaillement.

Afin de faciliter l'utilisation sur le terrain d'un tel essai, un nouvel essai a été conçu. L'atout principal d'un cône, par rapport à un plan, est que la pente est imposée par sa forme.

Tous les paramètres géométriques sont décrits dans la Figure 4-14 (gauche). Une mesure du seuil de cisaillement est obtenue à partir des étapes suivantes :

- Le cône, préalablement muni d'un papier de verre rugueux et fermé dans sa partie inférieure, est rempli de barbotine ;
- La partie inférieure est libérée et le fluide s'écoule ;
- La pâte résiduelle est pesée lorsque l'écoulement s'arrête (Figure 4-14, droite).

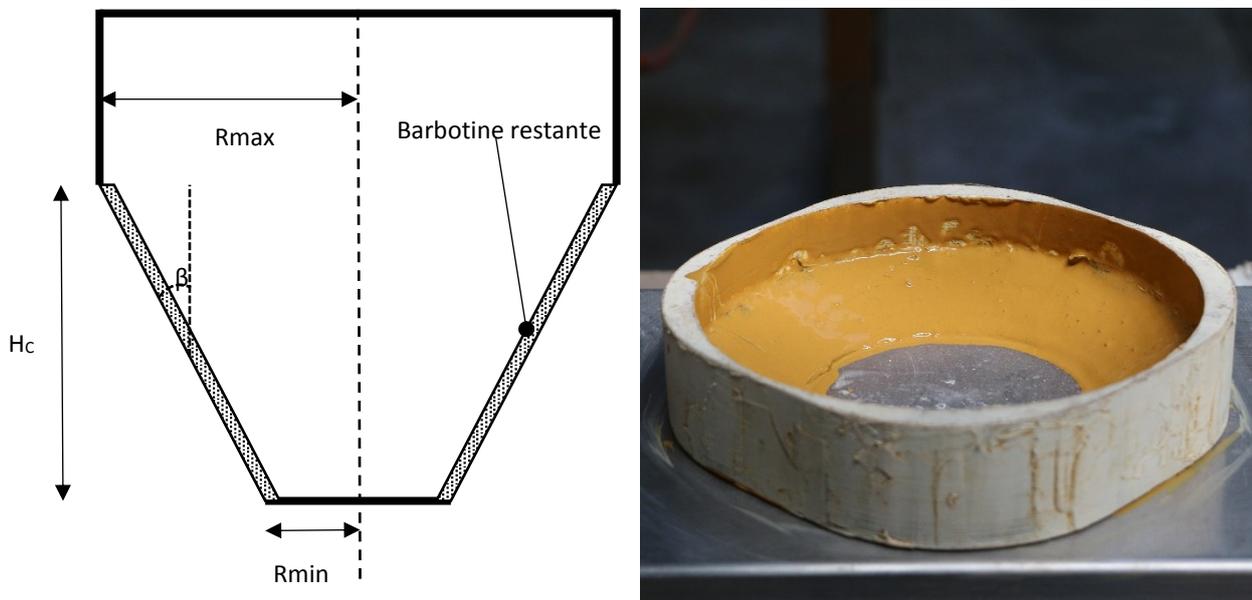


Figure 4-14: Gauche, Paramètres de géométrie du cône ; Droite, Barbotine restant sur la surface interne du cône après essai

Si l'on utilise un grand cône, c'est-à-dire $R_{min} > (R_{max} - R_{min})$, avec un angle très obtus, on peut supposer que l'écoulement est suffisamment lent pour éviter les effets visqueux et que l'épaisseur initiale du fluide est suffisamment proche de l'épaisseur d'équilibre pour limiter les effets de tension superficielle. Ensuite, on écrit l'équilibre des forces appliquées à l'épaisseur de pâte résiduelle, comme pour le plan incliné (équation 4-22) lorsque le flux s'arrête :

$$\tau_0 = Mg \frac{\cos\beta}{A_{\text{cornet}}} = \frac{Mg \cos\beta}{\pi(R_{\text{min}} - R_{\text{maximum}})H_c} \quad 4-22$$

4.5.1.4 CÔNE DE MARSH ET COUPELLES DE VISCOSITÉ

D'autres dispositifs tels que le cône de Marsh ou les coupelles de viscosité sont parfois recommandés pour la caractérisation des terres de construction [50]. Le test consiste généralement à mesurer le temps d'écoulement nécessaire pour vider le cône. Ce temps est relatif à la fluidité du matériau, qui peut généralement être plutôt liée à son comportement visqueux [169]. L'objectif de la présente étude n'était pas d'estimer la viscosité du fluide, mais son seuil de cisaillement. Pour des fluides ayant un seuil de cisaillement supérieur à 12,5 Pa, le cône de Marsh ne se vide pas complètement. Dans ce cas, Balhof et al. [162] donnent une formule pour estimer le seuil de cisaillement en utilisant la hauteur statique restante du fluide dans le dispositif (Figure 4-15 et Eq. 4-23). Les auteurs supposent que la contrainte tangentielle est suffisamment faible dans la partie conique pour laisser le fluide glisser et qu'il n'y a pas de barbotine résiduelle sur la paroi du cylindre en fin de test (Eq. 4-23). Cette hypothèse, considérant que le mode d'écoulement ne dépend que de la géométrie de la paroi, semble assez forte.

$$\tau_0 = \frac{\rho g(h_s + L)}{2 \left(\frac{L}{R} + \frac{H_F}{R_F} \right)} \quad 4-23$$

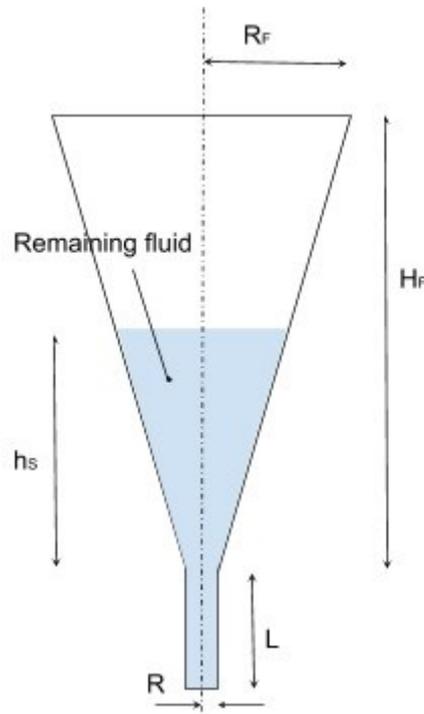


Figure 4-15: géométrie du cône de Marsch.

Dans cette étude, 2 tailles d'ouverture du cône de Marsh ont été testées (4.76 et 8mm), ainsi que 5 coupes de viscosité (3, 4, 5, 6 et 8mm).

4.5.2 ANALYSE DES MÉTHODES ALTERNATIVES DE MESURE DU SEUIL DE CISAILLEMENT

4.5.2.1 ESSAI D’AFFAISSEMENT / D’ÉTALEMENT

L'effet de la géométrie et de la rugosité de la surface a été testé sur la barbotine de référence. Les données brutes ont été traitées selon la formule de Pierre et al. (équations 4-12 et 4-13). Les résultats sont présentés à la Figure 4-16a.

Tout d'abord, la rugosité de la surface n'affecte pas les résultats : la matière s'écoule d'elle-même et adhère à la surface même sur une surface d'étalement très lisse, et même si les pâtes argileuses sont connues pour agir comme lubrifiant. En revanche, la géométrie initiale de l'échantillon a une grande influence sur les mesures. Il semble que les résultats du cône correspondent bien aux valeurs du rhéomètre entre 0 et 50 Pa, alors que le récipient cylindrique semble induire une divergence. Deux paramètres sont impliqués dans l'influence de la géométrie : le volume et la forme du récipient. Clayton et al [201] ont testé l'influence de ces paramètres sur l'affaissement des pâtes pigmentaires et des pâtes minérales et ont comparé leurs résultats à ceux de la littérature sur les pâtes argileuses. Ils montrent qu'il n'y a pas d'influence de la forme (conique ou cylindrique) sur l'affaissement, mais en faisant varier les hauteurs pour un même un rapport d'aspect (égal à 1), ils observent une forte influence du volume du contenant.

Premièrement, le volume de départ peut affecter le résultat de la mesure si l'épaisseur finale (dépendante de ce volume de départ et de la contrainte seuil du matériau) est trop faible, proche de la taille des particules de la suspension. Dans ce cas, la dimension limitative est la hauteur finale H du liquide étalé, et les critères peuvent s'écrire comme suit : $H > k\phi_{\text{maximum}}$ avec ϕ_{maximum} le diamètre maximal des particules de la suspension granulaire et k le nombre de particules dans l'épaisseur pour lesquelles le fluide reste représentatif. En général $k \approx 6$. En considérant un étalement total, on peut réécrire l'équation de Roussel (équation 4-10) pour trouver le volume minimum :

$$V > \left(\frac{225\rho g}{128 \tau_0} \right)^2 \pi (k\phi_{\text{maximum}})^5 \quad \mathbf{4-24}$$

La Figure 4-17 montre le volume initial minimum pour mesurer un seuil de cisaillement de 2 Pa et 10 Pa, en fonction de la hauteur finale souhaitée du fluide. Pour le cylindre étudié ($V_{\text{cylinder}}=0,21L$), un seuil de cisaillement de 10 Pa est difficilement mesurable puisque la hauteur finale sera de 6mm (soit trois diamètres maximum des particules de la barbotine), tandis que pour le cône ($V_{\text{cone}}=2,75L$) H doit être supérieure à 10 mm. Pour de telles suspensions, à très faible seuil de cisaillement et contenant des particules relativement grossières, il existe donc un volume minimal du récipient pour valider les mesures réalisées.

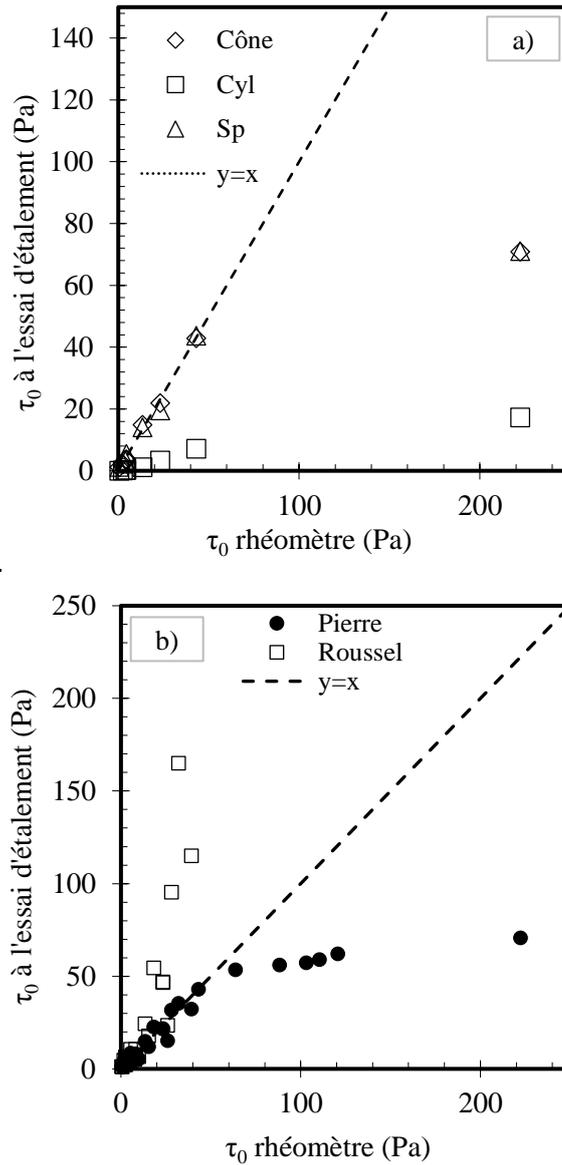


Figure 4-16 a) Seuil de cisaillement d'une barbotine mesurée à l'essai d'étalement sur du papier de verre (Sp) ou une surface mélaminée, avec deux récipient de forme et de volume différents : cône ou cylindre (Cyl) ; b) Seuil de cisaillement des six différentes barbotines déduites de l'essai d'étalement : comparaison des résultats avec la formule de Pierre et al (équation 4-10) et de Roussel et al (équation 4-11).

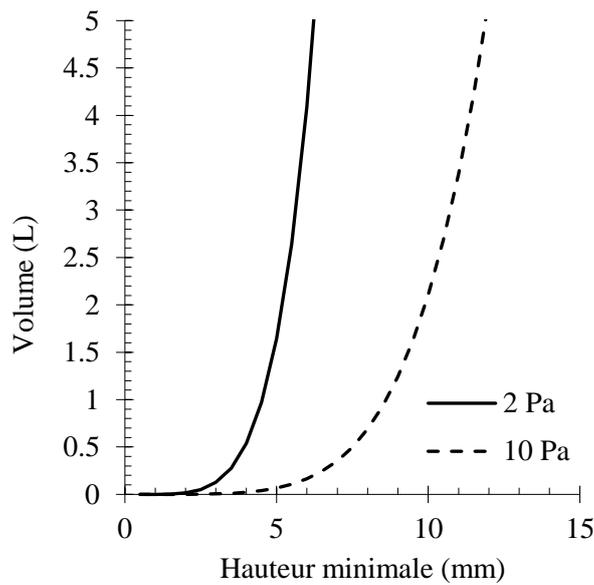


Figure 4-17 Volume du réservoir pour l'essai d'étalement selon une hauteur minimale à la fin de l'essai.

Le rapport d'aspect et la hauteur initiale du contenant peuvent également affecter les résultats, en raison des effets d'inertie. Roussel et al [167] indiquent que le seuil de cisaillement doit rester supérieure à l'inertie ($I = \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2$) pendant l'écoulement pour éviter les transitions brusques liquide-solide. La vitesse d'écoulement peut alors être influencée par la hauteur de l'échantillon et le seuil de cisaillement lui-même. Une analyse vidéo a été réalisée sur deux barbotines différentes et avec des récipients cylindriques et coniques pour mesurer les vitesses d'écoulement. Les résultats sont donnés dans le Tableau 4-1. Le critère $I < \tau_0$ n'est pas respecté pour les faibles seuils de cisaillement, quel que soit le récipient, ce qui peut expliquer les écarts pour les suspensions très fluides et souligne les différences dues au volume du récipient.

		$\tau_0=62Pa$	$\tau_0=0,5Pa$
Masse volumique (kg/m ³)		1330	1285
Vitesse radiale moyenne (m.s ⁻¹)	Cône	0.16	5
	Cylindre	0.06	20
Inertie (Pa)	Cône	34.2	243
	Cylindre	5.4	500

Tableau 4-1 : Inertie lors de l'étalement des deux barbotines

La Figure 4-16b présente le seuil de cisaillement calculé à partir des essais d'étalement avec la formule de Pierre et al. (équation 4-11) et la formule de Roussel et al. (équation 4-10). Les résultats obtenus avec la méthode de calcul de Pierre et al. ont une plage de validité allant de 0 à environ 50 Pa, tandis que les résultats obtenus avec la méthode de calcul de Roussel et al. ont une plage de validité plus restreinte allant de 0 à environ 25 Pa. Roussel et ses collègues partent du principe que tout le matériau se déforme par cisaillement pur, ce qui n'est pas vrai au-delà de 20 Pa. Au-dessus de cette valeur, la formule de Roussel et al. surestime le seuil de cisaillement.

Des écarts-types ont été calculés, mais ne sont pas observables sur cette représentation (Figure 4-16b), ce qui montre une très bonne répétabilité des résultats. Les erreurs moyennes entre les mesures d'étalement et de rhéomètre ont été estimées dans la plage de validité exprimée ci-dessus. Il semble que ces erreurs dépendent du type de terre : les terres T2, T3 et T5 présentent une erreur moyenne supérieure (respectivement 34 %, 56 % et 43 % d'erreurs moyennes) à celle des terres T1, T4 et T6 (respectivement 19 %, 5 % et 14 %).

4.5.2.2 TEST D'IMMERSION DE PLAQUE

La première phase, c'est-à-dire lorsque le cylindre est totalement immergé, fournit les résultats les plus fiables. Comme le montre la Figure 4-18, les résultats de la première phase sont conformes aux mesures au rhéomètre. Selon le type de sol, les erreurs moyennes vont de 18% à 51%. Les erreurs les plus importantes ne sont pas détectées pour les mesures de seuils de cisaillement les plus élevées. Néanmoins, des erreurs peuvent être causées par une surface de cisaillement non continue, comme exprimé précédemment pour les pâles du rhéomètre. Lorsque la barbotine est trop rigide, des espaces vides peuvent être créés pendant que le cylindre est soulevé.

Les résultats de la deuxième phase, lorsque le cylindre est partiellement sorti, montrent toujours une surestimation ou une sous-estimation du seuil de cisaillement. Une légère inclinaison du cylindre influence directement l'estimation de la masse de barbotine restant sur le cylindre et de l'effet de la tension superficielle.

Ensuite, la Figure 4-18 présente les résultats d'un calcul de seuil de cisaillement basé sur la troisième phase, lorsque le cylindre est totalement hors barbotine. Maillard et al [200] observent une proportionnalité entre l'épaisseur du matériau restant sur le cylindre et le seuil de cisaillement réel (Eq. 4-21). Ce n'est pas observé dans nos résultats.

Dans la même étude [28], un modèle plus précis estime l'épaisseur pendant la phase de "sortie partielle" :

$$t = \frac{\lambda}{2} - \frac{\alpha \rho g \lambda^2}{3\tau_0} \quad 4-25$$

Avec t l'épaisseur du matériau restant après l'essai, λ l'épaisseur du matériau cisailé dans la zone interfaciale air-matériau, α un facteur d'ajustement et τ_0 le seuil de cisaillement du matériau.

Dans le cas d'une barbotine, l'épaisseur du matériau cisailé (λ) dépend de la distribution granulométrique et de l'activité argileuse du matériau testé. Plus les granulats sont grossiers ou plus l'argile est cohésive, plus cette zone cisailée sera grande. Ainsi, les différences dans les distributions granulaires et la cohésion des six terres de cette étude peuvent expliquer les écarts importants dans les résultats.

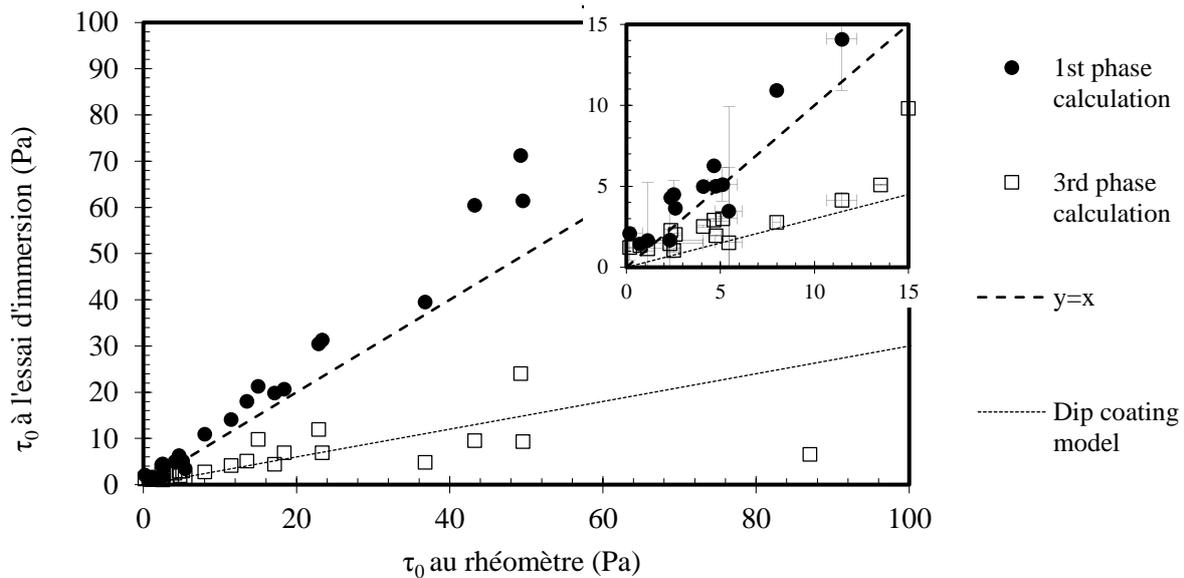


Figure 4-18 Seuils de cisaillement des six barbotines différentes mesurées à l'aide de l'essai au cylindre immergé, à partir de la 1ère et de la 3ème phase de l'essai Comparés aux mesures au rhéomètre. Les résultats de la 3ème phase sont comparés au modèle d'enduction par trempage de Maillard et al [28].

4.5.2.3 CÔNE À PAROI RUGUEUSE

La Figure 4-19 montre les résultats des calculs de seuil de cisaillement déduits des mesures avec différents cônes à paroi rugueuse. Plusieurs pentes sont testées, ainsi que des configurations avec ou sans réhausse (partie supérieure cylindrique) (voir Figure 4-14) :

- $\beta=60^\circ$ - cône avec partie supérieure cylindrique
- $\beta=60^\circ$ - cône sans partie supérieure cylindrique
- $\beta=85^\circ$ - cône sans partie supérieure

Pour chaque cône $R_{min}=6$ cm et $R_{max}=10$ cm.

Le cône $\beta=60^\circ$ avec partie supérieure cylindrique permet d'obtenir des résultats en accord avec les mesures au rhéomètre, quel que soit le type de sol. La limite supérieure en termes de seuil de cisaillement est de 230 Pa, au-delà de laquelle il n'y a plus d'écoulement. Autour d'un seuil de cisaillement de 200 Pa, les résultats sont discutables car il n'y a pas de d'écoulement réel mais un cisaillement pur de la partie centrale de l'échantillon. De plus, des erreurs importantes sont observées entre 0 et 3Pa, où les mesures de seuil de cisaillement sont fortement surestimées. En raison de la rugosité de la paroi du cône, il est possible que de grosses particules restent sur l'appareil alors qu'elles auraient dû s'écouler. Ainsi, la plage de validité de ce test est entre 3 et 200 Pa. Dans cette fourchette, les erreurs moyennes varient de 8 % à 58 % selon le type de sol.

Les deux autres modèles ne donnent pas de résultats cohérents. Pour le cône avec $\beta=85^\circ$, la pente n'est pas assez élevée pour induire un écoulement. En ce qui concerne la conception sans extension de la partie supérieure, Coussot et al [161] décrivent l'importance d'un écoulement quasi statique et d'une épaisseur constante du matériau sur l'appareil. Dans leur cas (plan incliné), l'écoulement est stationnaire et est réalisé pendant 30 à 40 minutes. Dans notre cas, le flux s'arrête quelques dizaines de secondes après que le cône a été soulevé. Ainsi, sans rehausse cylindrique, le manque de matériau au-dessus de la partie conique induit une épaisseur non constante du matériau en écoulement. Ce phénomène conduit à un seuil de cisaillement très sous-estimée.

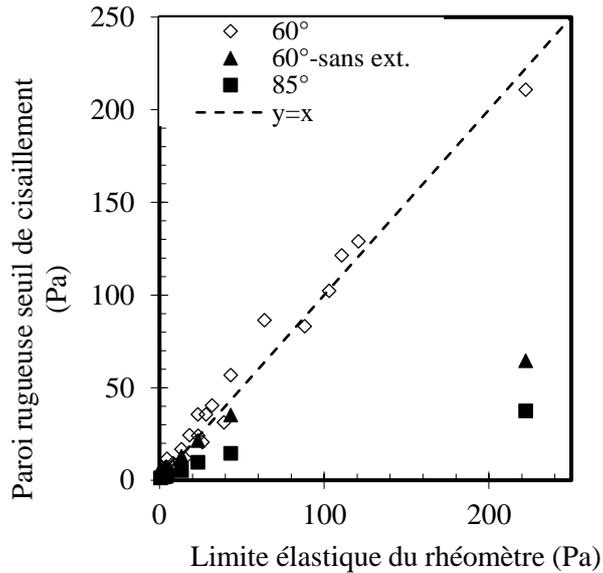


Figure 4-19 : Influence de la conception de l'essai sur la mesure du seuil de cisaillement du cône comparé au rhéomètre. Les six terres ont été testées sur le cône $\beta=60^\circ$, tandis que seul la barbotine T1 a été testé sur le cône $\beta=85^\circ$ et le cône sans extension.

4.5.2.4 CÔNE DE MARSH ET COUPELLES DE VISCOSITÉ

La formule mise au point par Balhof et al [162] a été utilisée pour traiter les résultats du cône de Marsh. Pour les deux ouvertures testées, les résultats montrent une surestimation importante d'environ un ordre de grandeur. De plus, il n'y a qu'une ou deux teneurs en eau pour lesquelles l'essai fonctionne, dans la plage 12Pa-25Pa de seuil de cisaillement pour la géométrie standard de l'entonnoir. En dehors de ces limites, la barbotine ne s'écoule pas du tout ou s'écoule complètement à travers l'appareil. Nous avons observé les mêmes problèmes pour les coupelles de viscosité, avec encore moins de cas où des mesures étaient possibles.

4.6 DISCUSSION

4.6.1 COMPARAISON DES MÉTHODES DE MESURE DU SEUIL DE CISAILEMENT

Le Tableau 4-2 résume les avantages et les inconvénients de tous les tests considérés dans cette étude. Les incertitudes de mesure maximales sont calculées à partir de la précision des capteurs et avec les différentes formules de calcul de seuil de cisaillement. L'erreur moyenne maximale est définie comme le maximum des différences moyennes pour chaque teneur en eau et chaque type de sol, entre les mesures du rhéomètre et l'essai comparé.

Alors que l'essai d'étalement et l'essai du cône à paroi rugueuse sont directement utilisables sur site, l'essai d'immersion nécessite encore une adaptation. Pour comparer la plage de validité de chaque essai, il est nécessaire de tenir compte des seuils de cisaillement requis pour différentes méthodes de construction en terre :

- Terre allégée : des connaissances sur les barbotines ont été développées au cours de ce projet. Suivant le savoir-faire des constructeurs, les barbotines avec un seuil de cisaillement compris entre 2 et 80 Pa, selon le comportement cohésif du sol, sont considérés comme valables.
- Béton de terre : la même rhéologie que le béton de ciment est généralement visée. Pour les bétons de terre autoplaçants, Ouellet-Plamondon et al [174] ont défini un seuil de cisaillement optimale entre 200 et 500 Pa.

Tableau 4-2: Résumé de la comparaison des tests de seuil de cisaillement.

Appareil de mesure	Incertitude de mesure maximale (%)	Erreur maximale (%)	Plage de validité (Pa)	Avantages	Inconvénients
Rhéomètre	0.51	-	0 - 500 (avec un outil à palettes de 6 cm de haut)	Précis, valeur de référence	Appareils de laboratoire coûteux et inadaptés aux conditions du terrain
Étalement	0.2	56 % - dépendants du sol	0-50	Rapide et facile à traiter, très facile et bon marché à concevoir	Nécessite une surface plane et parfaitement horizontale (ne convient pas aux bétons de terre) ; forte influence du volume de l'appareil.
Immersion	0.05	51 % - dépendants du sol	0-100	Le test le plus précis par rapport au rhéomètre ; assez facile à traiter	D'abord conçu pour le laboratoire : un dispositif robuste doit être développé pour les conditions de terrain ; une grande quantité de barbotine est nécessaire pour le test ; le traitement des données doit être adapté à la géométrie (surface) du dispositif.
Cône à paroi rugueuse ($\beta=60^\circ$ -avec rallonge)	0.2	58 % - dépendants du sol	3-200	Rapide et facile à usiner, plus approprié pour les matériaux à haute limite d'élasticité	L'appareil doit être usiné ou imprimé en 3D, éventuellement en fonction de l'utilisateur en raison de la vitesse de levage et de l'orientation du cône.
Cône de Marsh et coupes de viscosité	-	-	-	Facile à faire et déjà utilisé pour d'autres applications	Ne convient pas pour la mesure de la contrainte seuil des matériaux à base de terre

Les incertitudes de mesure sont inférieures aux erreurs moyennes maximales. Même si les barbotines sont mélangées juste avant chaque essai, pour les barbotines avec des agrégats grossiers, une sédimentation peut se produire avant l'essai ou l'homogénéité de la barbotine peut être affectée par l'écoulement. Ensuite, la distribution granulométrique, l'activité de l'argile et la capacité de gonflement des particules pourraient affecter les résultats. Néanmoins, les erreurs maximales par rapport aux valeurs de référence sont satisfaisantes pour les essais d'étalement, d'immersion de plaque et de cônes à parois rugueuses ($\beta=60^\circ$ avec extension).

4.6.2 ANALYSE DU TEST DU GANT

Afin d'évaluer le lien entre seuil de cisaillement et test du gant, des essais comparatifs ont été réalisés. Les barbotines de chaque terre ont été testées au gant à différentes teneurs en eau, en parallèle des essais au rhéomètre précédemment décrits. L'essai au gant donne trois résultats qualitatifs possibles : gras, correct ou

liquide, comme décrit en introduction de ce chapitre. Ici, un résultat a été ajouté lorsqu'une transition était observée entre Gras et Correct ou Correct et Liquide, soit lorsque le résultat n'était pas parfaitement clair.

La Figure 4-20 présente cette comparaison entre caractérisation au gant et au rhéomètre des barbotines. Afin de visualiser les résultats du test du gant indépendamment du type de terre, les références des barbotines n'ont pas été placées. Premièrement, la majorité des barbotines présentent clairement des zones dans lesquelles la barbotine est considérée grasse, bonne ou liquide. Des zones de transition « limite » apparaissent entre chacun des états gras, bon ou liquide. Seule une barbotine (T4) présente une courbe ne contenant pas de zone « bon » mais seulement une grande zone de transition entre gras et liquide. Deuxièmement, les zones correspondantes à une bonne barbotine varient en taille et en valeurs de seuil de cisaillement, et sont fortement dépendantes du type de terre. Indépendamment des terres, le seuil de cisaillement correspondant à une barbotine jugée bonne au test du gant varie entre 3 et 45 Pa, tandis que la zone limite varie entre 1.5 et 60 Pa.

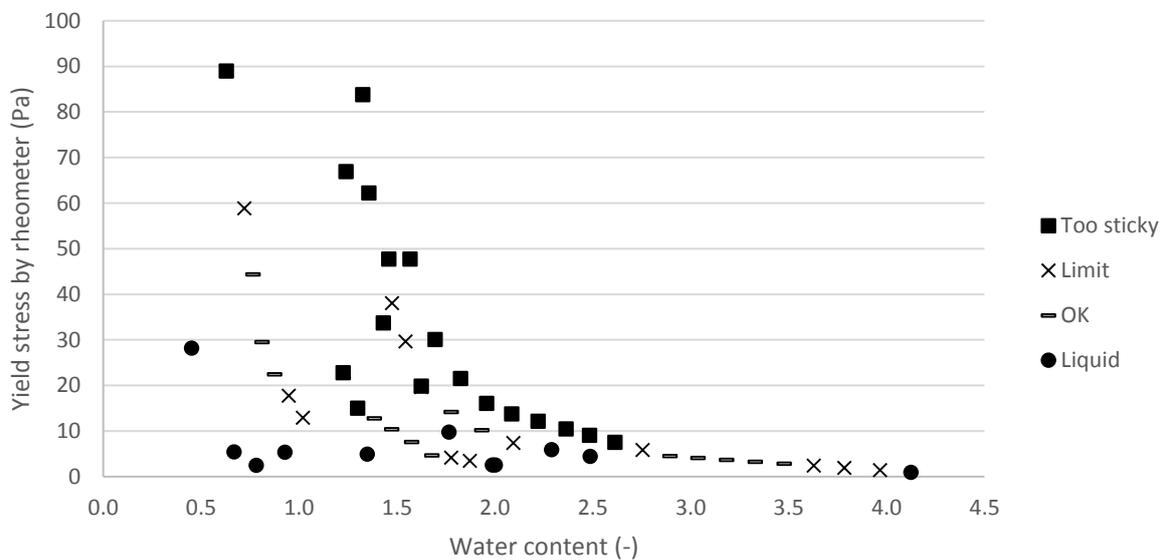


Figure 4-20: Comparaison des résultats qualitatifs du test du gant aux résultats de seuils de cisaillement au rhéomètre sur les 6 barbotines

Le test du gant est très proche de la phase 3 du test d'immersion. Par analogie, les phénomènes à l'œuvre sont divers en fonction de l'état d'immersion ou non de la main : Seuil de cisaillement, Poussée d'Archimède, tension de surface... Mais le fait que le test soit manuel fait intervenir d'autres facteurs : rugosité de la main, vitesse de sortie. Le principal résultat ici est donc que le test du gant n'est pas directement lié au seuil de cisaillement mais fait intervenir de nombreux autres phénomènes. Les nombreux chantiers réalisés en sélectionnant la terre avec le test du gant ont permis de réaliser des parois durables et performantes. Mais rien ne dit que certaines terres ou formulations écartées n'auraient pas fonctionné.

4.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, le comportement rhéologique de plusieurs barbotines a été évalué. Ce comportement est celui d'un matériau à seuil, ayant donc une cohésion interne, et il correspond aux comportements des suspensions argileuses étudiées dans la littérature.

Les essais de laboratoire au rhéomètre nous ont permis de quantifier le seuil de cisaillement de barbotines réalisées avec six différentes terres. Les résultats de ces essais ont permis de mettre en avant plusieurs phénomènes : le seuil de cisaillement dépend fortement de la fraction volumique solide (teneur en eau) de la suspension, et cette dépendance est notamment régie par certaines caractéristiques géotechniques des terres ; l'utilisation d'un modèle de type YODEL a permis de montrer que la granulométrie d'une terre, et particulièrement sont taux d'argile, sont des paramètres de premier ordre. Nous vérifions aussi ce phénomène en comparant les résultats de DRX et le comportement rhéologique. Ainsi, pour une même fraction volumique, plus une terre est argileuse, plus son seuil de cisaillement est élevé. Mais les caractéristiques des argiles (CEC, nature) semblent être de second ordre. La construction d'une base de données plus importante est nécessaire pour valider ces premiers résultats et explorer d'autres liens entre caractéristiques géotechniques et comportement rhéologique. De plus, d'autres méthodes statistiques pourraient être utilisées pour analyser ces données.

Ce chapitre a aussi permis de démontrer la possibilité de mesurer le comportement rhéologique d'une suspension de terre par des tests simples et robustes. Six tests différents, dont deux ont été développés pour cette étude, sont comparés : rhéomètre, test d'étalement, test d'immersion, cône à paroi rugueuse, cône de Marsh et coupes de viscosité. Les mesures au rhéomètre ont servi de référence, dans une plage de limite d'élasticité comprise entre 0 et 500 Pa. Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- Les essais de cônes de Marsh ou de coupes de viscosité ne sont pas adaptés à la plage de seuils d'écoulement des barbotines ;
- L'essai d'étalement, l'essai d'immersion et le cône à paroi rugueuse $\beta=60^\circ$ -avec extension- ont donné des résultats satisfaisants respectivement de 0 à 50 Pa, 0 à 100 Pa et 3 à 200 Pa. Pour ces trois tests, un écart type maximal de 50 % a été observé. Tous ces tests sont faciles à transférer sur le terrain.

En plus du modèle du seuil de cisaillement en fonction de la teneur en eau, ces essais permettent d'évaluer la quantité d'eau à ajouter ou à enlever pour atteindre un seuil de cisaillement cible. Cette approche quantitative peut être utilisée pour caractériser les barbotines en laboratoire pour des études sur la terre allégée ou directement sur le terrain.

De plus, les écarts types des résultats de seuil de cisaillement sont légèrement dépendants des terres. L'approfondissement des connaissances des liens entre comportement rhéologique et caractéristiques géotechniques permettrait aussi de comprendre cette dépendance.

Pour finir, le test du gant n'est pas directement corrélé au seuil de cisaillement. Ces résultats ne remettent pas en cause la validité du test du gant pour construire, sachant que les artisans expérimentés l'utilisent avec succès. Seulement, ce test fait appel à de nombreux autres paramètres. Néanmoins, le développement d'essais de chantier pour la mesure du seuil de cisaillement devrait permettre à la fois d'avoir une mesure quantitative de la cohésion et d'assurer une tenue mécanique du mélange frais.

5 CHAPITRE 5 : CARACTÉRISATION HYGROTHERMIQUE DE COMPOSITE TERRE-CHANVRE

Ce chapitre fait l'objet d'une traduction étoffée de l'article : "Hygrothermal properties of light-earth building materials" Colinart et al._2019 (article soumis en septembre 2019)

5.1 INTRODUCTION

Par rapport au béton de ciment, les mélanges à base de matrice minérale et de granulats bio-sourcés sont plus poreux, plus légers (masse volumique de 300 à 600 kg.m⁻³) et présentent une conductivité thermique inférieure (de 0.05 à 0.2 W.m⁻¹. K⁻¹). Une autre caractéristique majeure de ces matériaux est qu'ils sont hygroscopiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent capter/lâcher de l'humidité depuis/vers leur environnement. Ce potentiel d'amortissement de l'humidité pourrait aider à atténuer les variations de l'humidité relative intérieure et à améliorer le confort [202]. Cependant, l'humidité affecte d'autres propriétés fonctionnelles, comme les propriétés thermiques [146] ou acoustiques [203], et peut être une source de pathologie [204]. Par conséquent, il est important de prédire le comportement hygrothermique de ces matériaux. Les simulations sont généralement effectuées avec des logiciels comme WUFI [205] ou Delphin [206] ou d'autres modèles de transfert de chaleur, d'air et d'humidité [207]. Quel que soit le modèle, de nombreuses données d'entrée sont nécessaires, dont au moins la capacité thermique sèche et la conductivité thermique, l'isotherme de sorption, les propriétés de transfert de vapeur et de liquide.

La caractérisation hygrothermique des mélanges chaux-chanvre a reçu ces dernières années beaucoup d'attention [8–14]. D'une manière générale, les études portent sur l'influence de la formulation, du processus de prise, des matériaux constitutifs (agrégats végétaux et type de liant) ou de paramètres externes comme la température et l'humidité relative. Mais peu d'études traitent des matériaux de construction en terre de faible masse volumique [1], [15–20]. Un résumé des propriétés hygrothermiques mesurées sur des terres allégées est présenté au Tableau 5-1 :Aperçu des propriétés hygrothermiques mesurées antérieurement sur des matériaux de terre allégée pour la construction (* valeur calculée à partir de la diffusivité thermique ; ** valeur estimée à partir de la lecture de la figure).

Dans toutes les études, la conductivité thermique est mesurée : à l'exception de la valeur mesurée par Goodhew et Griffiths [214], toutes les valeurs se situent entre 0.055 et 0.13 W.m⁻¹.K⁻¹ et augmentent linéairement avec la masse volumique [1], [19, 20]. Néanmoins, la comparaison directe entre ces valeurs est difficile pour au moins deux raisons : les agrégats végétaux ne sont pas les mêmes et les mesures sont effectuées dans des conditions différentes (définition de l'état sec ou conditions ambiantes de stockage et de mesure). D'autres propriétés sont évaluées ponctuellement. Aucune mesure directe de la capacité calorifique n'est effectuée et les valeurs recalculées de la diffusivité thermique sont étalées. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur est assez faible et a le même ordre de grandeur que celui des mélanges chaux-chanvre. Les isothermes de sorption présentent une forme sigmoïdale et le taux d'humidité à 80 % HR varie entre 4.8 et 8 %. Enfin, notons qu'aucune mesure d'absorption capillaire n'a été retrouvée dans la littérature pour ce matériau. Cette analyse indique que les ensembles complets de données sont plutôt rares dans la littérature pour ce type de matériaux. De plus, la littérature ne permet pas de déterminer les paramètres les plus influents sur les propriétés hygrothermiques. En effet, les agrégats végétaux ont des propriétés intrinsèques qui peuvent influencer le comportement hygrothermique du composite [219]. De même, la terre brute présente des variabilités en termes de distribution granulométrique, de comportement argileux et de composants chimiques par exemple [60]. Dans le cas des briques de terre, Cagnon et al [220] ont montré que cette variabilité influence les propriétés de stockage de la chaleur et de l'humidité.

Ce chapitre vise à fournir un ensemble complet de données sur les propriétés hygrothermiques des matériaux de construction en terre allégée. De plus, l'influence de la variabilité de la Terre est discutée et comparée à d'autres sources de variabilité. Dans cette optique, le chapitre est divisé comme suit : Les sections 2 et 3 présentent respectivement les matériaux et les méthodes. Les propriétés de stockage de la chaleur et de l'humidité sont présentées et discutées à la section 4, tandis que les propriétés de transfert thermique et hydrique sont analysées à la section 5.

Tableau 5-1 :Aperçu des propriétés hygrothermiques mesurées antérieurement sur des matériaux de terre allégée pour la construction (* valeur calculée à partir de la diffusivité thermique ; ** valeur estimée à partir de la lecture de la figure).

Ref	Type d'agrégats	ρ [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	cp [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	μ [-]	w80 [%]	MBV [g.m ⁻² .%RH ⁻¹]
[214]	Paille	440	0.18	900			
[215]	Chènevotte	420	0.13	1666*			
[202]	Paille	241 ... 531	0.071 ... 0.12		2.9 ($\rho = 355 \text{ kg.m-3}$)	4.8 ... 5.5** (séchage : 55 °C)	
[211]	Chènevotte	385	0.085				2.68
	Paille	356	0.072				
[216]]							
[217]	Typha (3 form.)	304 ... 586	0.065 ... 0.112	910 ... 960*	3.2 ... 7.1	$\cong 6 \dots 8 \text{ %}^{**}$ (séchage : 50 °C)	3.23 ... 4.3
[218]]	Paille de colza Tournesol - Chènevotte	235 ... 512	0.055 ... 0.088 (+ augmentation avec RH)			$\cong 6 \text{ %}^{**}$ (séchage : 60 °C)	

5.2 MATÉRIAUX

La majorité des formulations présentées dans le Chapitre 3 sont utilisées ici dans la caractérisation hygrothermique. Les caractéristiques de fraction massique de chanvre (f_{chanvre}), de masse volumique sèche (ρ_{sec}) et de compacité (C) sont regroupées dans le Tableau 5-2. Les formulations sont regroupées en lots pour faciliter l'analyse des résultats. Le lot numéro 1 correspond à l'étude de la variabilité du chanvre, de la formulation et de la méthode de mise en œuvre. Le lot 2 correspond à l'étude du type de terre, de la teneur en eau de la barbotine et de sa rhéologie.

Rappelons que les échantillons cubiques utilisés ici sont démoulés immédiatement après leur fabrication et séchés à l'état ambiant (23 ± 2 °C, 50 ± 10 % HR). Un séchage final à 70 °C est effectué dans un four ventilé pour évaluer la masse volumique sèche ρ_{sec} (Tableau 5-2). Enfin, la compacité C est définie comme :

$$C = \frac{V_{\text{terre}} + V_{\text{chanvre}}}{V_{\text{échantillon}}} = \rho_{\text{sec}} \left(\frac{1 - f_{\text{chanvre}}}{\rho_{\text{terre}}} + \frac{f_{\text{chanvre}}}{\rho_{\text{chanvre}}} \right) \quad \text{5-1}$$

avec ρ_{chanvre} la masse volumique intrinsèque du chanvre, ou masse volumique des parois (voir chapitre 2).

La fraction massique moyenne de chanvre f_{chanvre} est d'environ 42 ± 2 %, sauf pour quatre échantillons : les échantillons F09 sont préparés délibérément avec une grande quantité de chanvre ; les échantillons de projeté présentent une quantité de chanvre inférieure puisque l'artisan voulait assurer une meilleure cohésion à l'état frais en augmentant légèrement le taux de barbotine ; les échantillons T2C1-W diffèrent de la valeur moyenne en raison de difficultés dans la préparation : lors de la fabrication de la barbotine, une sédimentation importante avait lieu, il était alors difficile de prélever correctement une partie de cette barbotine (voir chapitre 4). Les formulations T2C1 ne sont pas validées pour la fabrication de terre-chanvre. Dans l'ensemble, La masse volumique sèche varie entre 196 et 345 kg.m⁻³ et la compacité varie entre 10.7 et 17 %. Ces deux paramètres sont linéairement dépendants dans la plage étudiée. Les échantillons fabriqués avec de la terre à faible teneur en argile et en limon sont plus friables que les autres : chaque manipulation induit une perte de masse, ce qui augmente l'incertitude. Enfin, à l'échelle des échantillons, le projeté présentent également de grandes variations dues au procédé lui-même ; mais à l'échelle de la paroi, le projeté présente une meilleure homogénéité que le banché.

Tableau 5-2: Formulations testées : fraction massique de chanvre, masse volumique à sec et compacité.

Lot	Nom	Fraction de la masse de chanvre f_{chanvre} [%]	Masse volumique à sec ρ_{sec} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Compacité C [%]
Lot 1	T1C1	42.2 ± 0.4	304 ± 6	14.9 ± 0.3
	T1C2	44 ± 0.4	283 ± 2	14.1 ± 0.1
	T1C3	42.2 ± 0.4	345 ± 13	17 ± 0.7
	T1C1(F)	52.9 ± 0.4	205 ± 8	10.7 ± 0.4
	T1C1(P)	33.7 ± 0.3	272 ± 26	12.7 ± 1.2
Lot 2	T2C1-W	67 ± 0.4	196 ± 34	11.1 ± 1.9
	T2C1-Y	41.4 ± 0.4	238 ± 24	11.7 ± 1.2
	T3C1-W	42.3 ± 0.4	236 ± 4	11.5 ± 0.2
	T3C1-Y	42.2 ± 0.4	281 ± 1	13.7 ± 0.1
	T4C1-W	43.4 ± 0.4	272 ± 8	13.4 ± 0.4
	T4C1-Y	43 ± 0.4	263 ± 15	12.9 ± 0.7
	T5C1-W	43.4 ± 0.4	252 ± 3	12.4 ± 0.2
	T5C1-Y	41.5 ± 0.4	257 ± 2	12.4 ± 0.1
	T6C1-W	42.7 ± 0.4	258 ± 18	13.2 ± 0.9
T6C1-Y	37.5 ± 0.4	307 ± 7	15.3 ± 0.4	

5.3 MÉTHODES

5.3.1 REMARQUES PRÉLIMINAIRES SUR L'ÉTAT SEC

Lors de la caractérisation des propriétés hygrothermiques des matériaux de construction hygroscopiques, l'état sec doit généralement être défini soit pour mesurer les propriétés à cet état (capacité thermique, conductivité thermique), soit pour évaluer la masse sèche et en déduire la teneur en humidité. Habituellement, le séchage est effectué dans un four ventilé conformément à la norme ISO 12570 [221]. Celle-ci mentionne que la température de séchage doit être réglée sur celle spécifiée dans la norme du produit (qui n'existe pas dans le cas de la terre allégée) ou par défaut à 40, 70 (récemment réduite à 65) ou 105 ± 2 °C selon la sensibilité des matériaux à la température. Toutefois, les normes de produits recommandent des températures de séchage allant de 40 °C [222] à 110 °C [223] pour les matériaux à base de terre et de 70 °C [224] à 103 °C [225] pour les matériaux cellulosiques. De plus, la norme ISO 12570 mentionne que l'humidité relative doit être maintenue en dessous de 10 % HR. Comme l'air du four est souvent le même que celui du laboratoire, l'humidité relative du four dépend donc des conditions d'ambiance au sein du laboratoire [226] : par exemple, en supposant que la teneur en vapeur d'eau de l'air est respectivement de 7 et 14 g.m⁻³ en hiver et en été, l'humidité relative varie de 1 à 2 % HR à 105 °C, mais de 16 à 30 % HR lorsque la température de séchage atteint 40 °C.

Par conséquent, de nombreuses conditions de séchage (en termes de température et d'humidité relative) peuvent être rencontrées dans la littérature traitant des matériaux de construction bio-sourcés. Il en résulte des valeurs de dispersion des propriétés hygrothermiques pour lesquelles une comparaison directe est donc difficile. Dans ce travail, une attention particulière est portée aux conditions de séchage et à leur influence sur les propriétés hygrothermiques.

5.4 PROPRIÉTÉS DE STOCKAGE

5.4.1 ISOTHERME DE SORPTION

Méthode à la solution saline saturé (SSS)

Les isothermes de sorption sont mesurées par méthode gravimétrique conformément à la norme ISO 12571 [227]. Pour chaque matériau, trois échantillons représentatifs du produit d'une masse d'au moins 10 g sont placés sur des porte-échantillons en verre. Comme les particules de chanvre ont une masse volumique apparente sèche inférieure à 300 kg.m^{-3} , les porte-échantillons ont une surface d'au moins $100 \times 100 \text{ mm}^2$, afin de pouvoir disposer suffisamment de matériau. Pour les échantillons de terre allégée, les cubes de 100 mm de côté sont recoupés en quatre, formant ainsi des échantillons cubiques d'au moins $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. Ensuite, les échantillons sont séchés avant les expériences de sorption. Sur la base de la discussion précédente (voir section 1), trois protocoles de séchage différents sont testés :

- Séchage initial à 105 °C dans un four ventilé,
- Séchage initial à 40 °C dans un four ventilé,
- Séchage initial à 40 °C et 20 \%HR en chambre climatique.

Une fois que la masse constante est atteinte après séchage, c'est-à-dire lorsque le changement de masses entre deux pesées consécutives effectuées à 24 heures d'intervalle est inférieur à 0.1 \% de la masse totale, les échantillons sont placés jusqu'à l'équilibre de masse dans des dessiccateurs équipés de ventilateurs, dans lesquels l'humidité relative est contrôlée par des solutions salines saturées. Quatre à huit niveaux d'augmentation de l'humidité relative par étapes sont testés, la température étant maintenue à $23 \pm 0,5 \text{ °C}$.

Méthode de Sorption Dynamique en Vapeur (DVS)

Les isothermes de sorption de la terre de référence (T1) et de la chènevotte C1 sont également mesurées avec l'équipement DVS IGASorp-HT (Hiden Analytical, Warrington, UK). Le dispositif permet de contrôler avec précision l'absorption de masse et la cinétique de sorption d'un échantillon au moyen d'une microbalance et d'un contrôle précis de la température et de l'humidité. Le protocole est le suivant : 10 à 100 mg de matière sont placés dans la microbalance IGASorp, d'une résolution de $0.1 \text{ }\mu\text{g}$; avant le début de l'analyse par adsorption, l'échantillon est d'abord séché à l'air sec (250 mL.min^{-1}) jusqu'à un poids constant ; ici, deux conditions de séchage sont testées : $40 \text{ °C} / 20 \text{ \%HR}$ et $105 \text{ °C} / \text{HR} < 1 \text{ \%}$; Ensuite, l'échantillon est exposé à une augmentation de l'humidité de 10 \%HR à 90 \%HR , par pas de 10 \%HR d'humidité, la température d'essai étant de 23 °C . La masse d'équilibre à chaque étape est déterminée par extrapolation d'une courbe exponentielle unique ajustée à la réponse de masse en fonction du temps à la suite d'un changement progressif de l'HR.

5.4.2 CAPACITÉ CALORIFIQUE

Les mesures de la capacité calorifique sont effectuées à l'aide d'un calorimètre micro-DSC III (Setaram, Calluire, France) selon la norme ISO 11357-4 [228]. Pour chaque essai, une masse minimale de 100 mg est placée dans des récipients scellés de 1 cm^3 . Les essais sur les différentes formulations terre-chanvre passent par un échantillonnage aléatoire de quelques particules. Deux méthodes sont testées : une méthode continue pour laquelle la température est augmentée de 5 °C à 30 °C avec une vitesse de chauffage de 0.2 °C.min^{-1} et une méthode par palier pour laquelle la température est augmentée de 15 °C à 25 °C avec une vitesse de chauffage de 0.2 °C.min^{-1} . Trois mesures sont effectuées sur tous les matériaux séchés selon les protocoles de séchage mentionnés ci-dessus.

5.5 PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

5.5.1 CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La conductivité thermique λ est mesurée à l'aide d'un dispositif de plaque chaude gardée [229] conçue selon la norme NF EN 12664 [230] et développé au laboratoire. Un exemple est visible en Figure 5-1, avec une garde en laine de roche. Les essais sont effectués sur des échantillons dont les dimensions moyennes sont de 100 x 100 x 50 mm³, correspondant aux cubes recoupés en deux. Avant les essais, les échantillons sont séchés à 70 °C dans un four ventilé, puis refroidis dans un dessiccateur à température ambiante. Ils sont ensuite serrés entre les plaques froides et chaudes pour améliorer les contacts et minimiser les erreurs de résistance d'interface. Les mesures sont effectuées à une température moyenne de 23 °C en réglant les températures froide et chaude respectivement à 18 ± 0.05 et 28 ± 0.05 °C. De plus, un matériau isolant est placé autour des échantillons pour limiter les pertes de chaleur latérales pendant l'essai (Figure 5-1). Une fois que le flux de chaleur dissipée a atteint l'état d'équilibre, une conductivité thermique apparente λ est calculée en supposant un transfert de chaleur unidimensionnel. L'influence de la résistance de l'interface thermique est examinée dans la section 1. En outre, d'autres mesures sont effectuées sur certains échantillons soit après séchage à 40 °C, soit après conditionnement à 23 °C et 50 % HR. Ici, toutes les mesures sont effectuées dans le sens perpendiculaire au compactage, à l'exception de l'échantillon de projeté, testé dans le sens de projection.

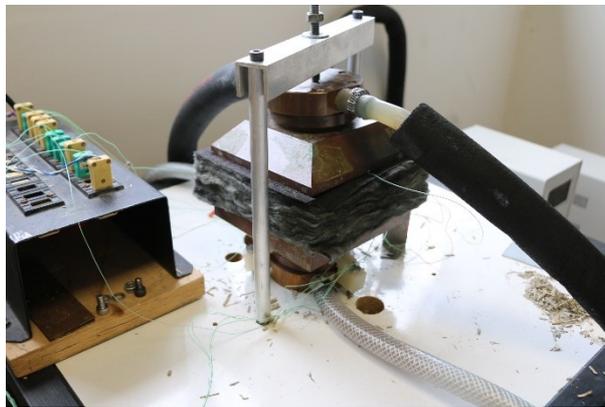


Figure 5-1: Plaque chaude gardée

5.5.2 FACTEUR DE RÉSISTANCE À LA DIFFUSION DE VAPEUR D'EAU

Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ est mesuré selon la méthode de la coupelle sèche, conformément à la norme ISO 12572 [231]. Les essais sont effectués sur les mêmes échantillons que pour la conductivité thermique. Avant les essais, les échantillons sont conditionnés à 23 °C et 50 % HR. Ils sont ensuite scellés à l'aide d'un scotch d'aluminium à un récipient en PE contenant du gel de silice comme dessiccant. Les couches d'air entre l'échantillon et le gel de silice ont une épaisseur de 17 ± 3 mm. L'humidité relative à l'intérieur de la coupe est supposée être de 5 % HR. Les assemblages sont placés dans une chambre climatique, dont la consigne est fixée à 23 °C et 50 % HR. La vitesse de l'air mesurée au-dessus de la coupe avec un anémomètre à fil chaud est d'environ $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les coupes sont pesées régulièrement jusqu'à ce que le taux de transmission de vapeur d'eau (gv) atteigne un état stable. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ est calculé en tenant compte de la résistance supplémentaire des couches d'air à l'intérieur et au-dessus de la coupelle, comme spécifié dans l'annexe G de la norme.

5.5.3 COEFFICIENT D'ABSORPTION CAPILLAIRE

Le coefficient d'absorption capillaire A_w est mesuré conformément à la norme ISO 15148 [232]. Le montage expérimental est similaire à celui de Fabbri et al. utilisé pour le pisé [233]. Les échantillons de 100 x 100 x 100 mm³ sont d'abord équilibrés à température et humidité relative ambiante ; avant le début de l'essai, leurs faces latérales sont scellées avec du cellophane et de l'aluminium autocollant pour assurer un transfert d'humidité unidimensionnel (Figure 5-2). Ils sont placés sur un tamis puis partiellement immergés dans l'eau jusqu'à une profondeur de quelques millimètres sur une période de 24 h. Après 5 min, chaque échantillon a été retiré de la surface de l'eau, sa surface a été tamponnée avec une éponge humide, puis pesée sur une balance précise à 0.01 g. Cette procédure prend environ 20 secondes et a été répétée aux échéances de 10, 15, 20, 25, 35, 45 min, puis 1, 2, 4 et 24 h. Un exemple de courbe type de résultats est présentée en Figure 5-4. Le coefficient d'absorption capillaire A_w est calculé à partir de la pente entre la quantité d'eau absorbée par unité de surface de l'échantillon et la racine carrée du temps. Lorsque la rugosité de surface ou l'érosion au bas de l'échantillon (Figure 5-3) entraîne une perturbation de l'absorption et donc de la linéarité de la courbe, un minimum de 4 points consécutifs sont choisis pour calculer le coefficient d'absorption : sur les courbes de la formulation T1C2 (Figure 5-4 - droite) se sont les 4 derniers points qui sont utilisés.



Figure 5-2 : Dispositif d'essai d'absorption capillaire.



Figure 5-3 : Gauche, aspect après absorption ; droite, érosion de la surface immergée.

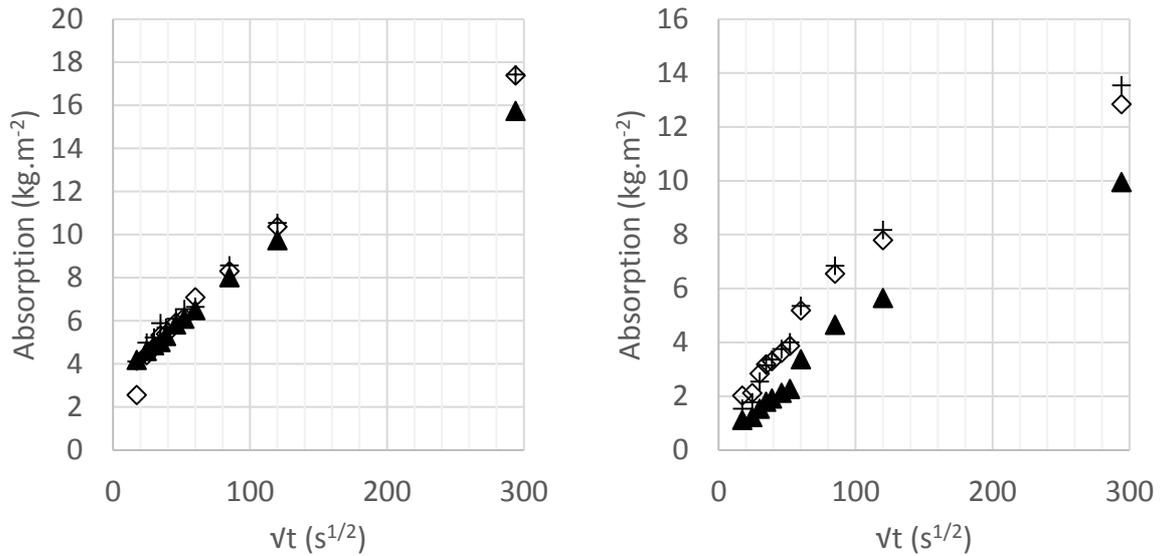


Figure 5-4: Courbes type d'absorption d'eau de trois échantillons de la formulation T1C1 (gauche) et T1C2 (droite).

5.6 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES PROPRIÉTÉS DE STOCKAGE

5.6.1 RÉPÉTABILITÉ ET INFLUENCE DE LA MÉTHODE DE MESURE

Les erreurs de répétabilité, définies comme le rapport entre l'écart-type et la valeur moyenne, et l'influence de la méthode de mesure sont analysées pour toutes les mesures. Les erreurs moyennes et maximales sont regroupées dans le Tableau 5-3. La capacité calorifique des matières premières peut être mesurée avec une très bonne précision. Une dispersion légèrement plus élevée est notée pour les terre-chanvres : les erreurs sont dues à la répétabilité de l'échantillonnage puisque chaque mesure ne nécessite que 1 cm³ de matériau. D'autre part, des variations plus importantes sont observées pour les teneurs en humidité mesurées avec la méthode SSS, même si les échantillons testés sont représentatifs de chaque matériau. Ceci est dû à deux raisons : premièrement, les variations de masse sont faibles en ce qui concerne la précision de balance lorsque l'humidité relative est faible ; deuxièmement, il est assez difficile de maintenir une humidité relative homogène dans les dessiccateurs, en particulier pour une humidité relative élevée. Grâce à la haute précision de la microbalance et au contrôle précis des conditions ambiantes, les valeurs obtenues avec la méthode DVS sont donc plus reproductibles. Enfin, des écarts significatifs sont observés entre les deux méthodes de mesure des isothermes de sorption, conformément aux observations de la littérature [234]. Comme le séchage avec l'appareil DVS est effectué avec du gaz sec, la méthode DVS tend à fournir des teneurs en humidité plus élevées que les méthodes SSS. Dans le reste du document, seules les mesures obtenues avec les méthodes SSS sont présentées en raison de la disponibilité des données.

Tableau 5-3 : Erreurs moyennes et maximales (entre parenthèses) dues à la répétabilité ou dues à la méthode de mesure de la teneur en eau et de la capacité thermique spécifique sèche.

	Répétabilité				Protocole	
	c_p (continu)	Sorption SSS (HR < 75 %)	Sorption SSS (HR > 75 %)	Sorption DVS	c_p : en continu ou par palier	Sorption : SSS vs. DVS
<i>Barbotine</i>	0.47 % (< 1.05 %)	5 % (< 40.4 %)	3.7 % (< 12 %)	1.3 % (< 2.4 %)	0.22 % (< 0.32 %)	35.9 % (< 69.4 %)
<i>Chènevotte</i>	0.9 % (< 1.76 %)	8.4 % (< 14.2 %)	8.5 % (< 13.9 %)	2.7 % (< 9.5 %)	0.75 % (< 1.05 %)	26.3 % (< 63.7 %)
<i>Terre- chanvre</i>	1.61 % (< 6.57 %)	9.6 % (< 34.8 %)	4.9 % (< 13 %)	-	-	-

5.6.2 INFLUENCE DU CONDITIONNEMENT INITIAL SUR LES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS

La capacité calorifique spécifique sèche (c_p) et la teneur en humidité à 80 ± 2 %HR (w_{80}) de terre et chènevotte sont présentées respectivement dans la Figure 5-6 et la Figure 5-7.

Premièrement, les résultats après un conditionnement à 40 °C et 20 %HR en chambre climatique sont analysés. Pour les barbotines, les valeurs de c_p varient entre 0,77 et 0,93 J.g⁻¹.K⁻¹, selon les fractions d'argile, de limon et de sable, et ont le même ordre de grandeur que les valeurs de la littérature [38, 39]. La Figure 5-5 présente une corrélation entre CEC et w_{80} mesuré à la DVS de l'ensemble des terres présentées au Chapitre 1. Cette figure montre qu'avec w_{80} variant entre 0,3 et 7,6 %, la sorption de la terre dépend clairement de la CEC. Cette corrélation est vérifiée dans la littérature [40, 41]. En ce qui concerne le chanvre, on observe des différences plus faibles entre les matériaux puisqu'ils présentent des compositions chimiques similaires. Les valeurs de c_p (1,35 J.g⁻¹.K⁻¹) sont dans la gamme de celles de la cellulose ou de la lignine (1,2 J.g⁻¹.K⁻¹) [239]. Les mécanismes de sorption de l'humidité sont plus complexes : même si la capacité de sorption de la lignine est inférieure à celle de la cellulose et de l'hémicellulose [240], la sorption dépend aussi de l'accessibilité du site de sorption et de la structure du polymère à l'échelle locale [44, 45]. Ici, les valeurs de w_{80} sont égales à environ 9 % pour les trois chènevottes. Comme les chènevottes C1 et C2 proviennent du même lot, les différences peuvent être attribuées à la variabilité naturelle de la plante. À cette même humidité relative, la chènevotte C3 présente une teneur en eau légèrement plus élevée que les deux autres. Néanmoins, des moisissures sont apparues pour une humidité relative élevée pendant l'expérience : la composition, et par conséquent le comportement hygroscopique, ont pu être modifiés.

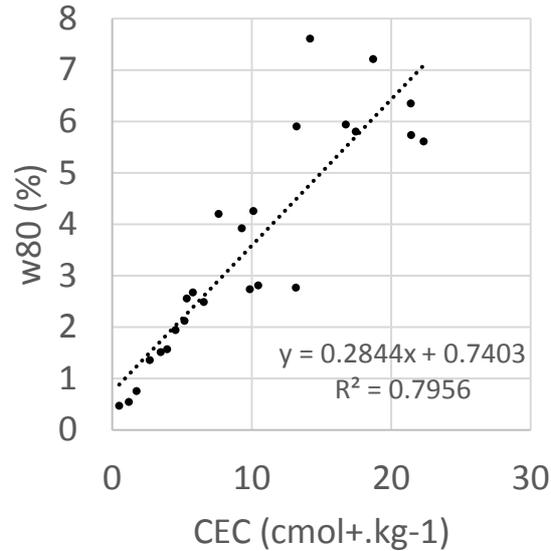


Figure 5-5: Corrélation entre CEC et teneur en eau à 80%HR.

Dans un second temps, l'attention est portée sur l'influence du conditionnement initial sur les résultats, c'est-à-dire l'influence de la température de séchage et l'influence du contrôle de l'humidité relative pendant le séchage. Comme prévu, plus la température de séchage est élevée, plus la masse sèche est faible et donc plus le taux d'humidité est élevé : w_{80} est supérieur d'un tiers pour toutes les chènevottes, tandis que la sensibilité des barbotines se situe entre 38 % (T4) et 120 % (T2). De plus, en augmentant la température de séchage, on s'attend à ce que plus d'eau évaporable et même non évaporable soit éliminée. La capacité calorifique spécifique de l'eau étant égale à $4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$, et supérieure à celle des autres constituants, la capacité calorifique spécifique du matériau est donc inférieure : une diminution homogène de 10 % est observée pour toutes les chènevottes, alors qu'elle varie de 1 à 7,5 % pour les barbotines. De plus, nous observons que le fait de ne pas contrôler l'humidité relative pendant la phase de séchage entraîne des incertitudes allant jusqu'à 5,5 % pour les valeurs de c_p et jusqu'à 43 % pour les valeurs de w_{80} . Alors que les valeurs les plus basses sont mesurées en hiver puisque l'air ambiant est plus sec, les valeurs mesurées en été dépendent de l'heure du prélèvement des échantillons, soit le matin ou l'après-midi. Par rapport aux incertitudes de répétabilité, les erreurs dues aux différents conditionnements sont plus importantes, ce qui peut expliquer la dispersion des valeurs rencontrées dans la littérature.

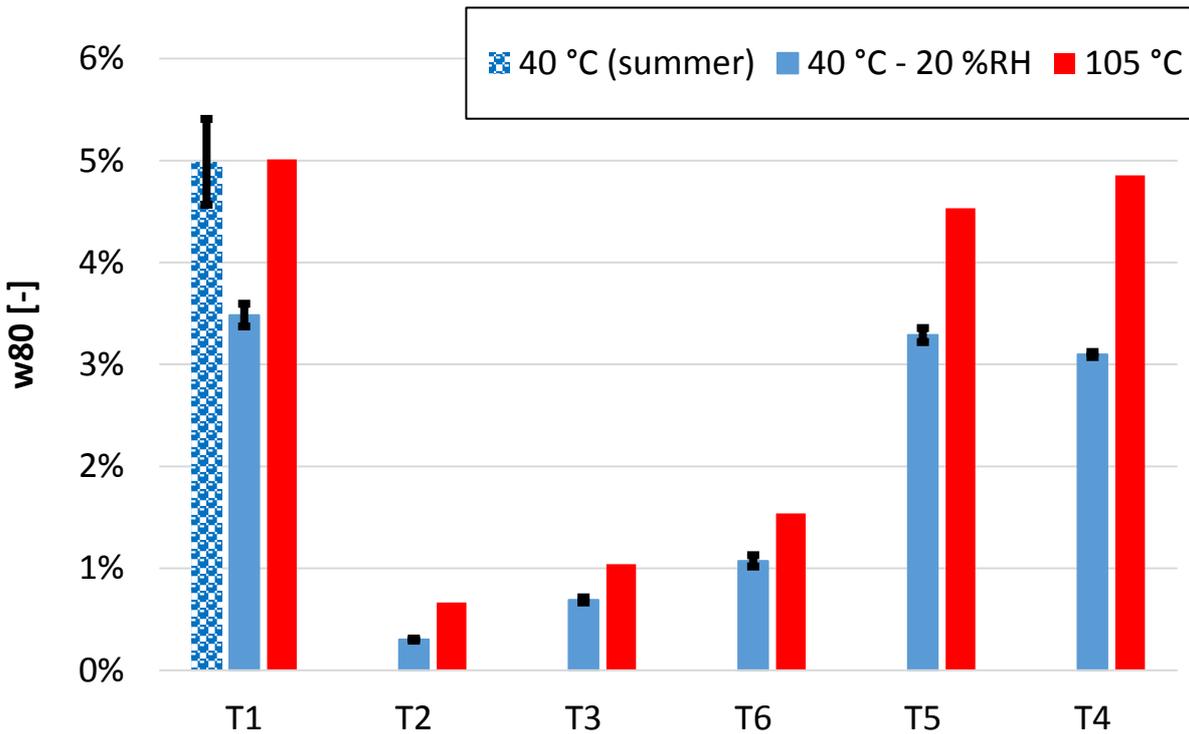
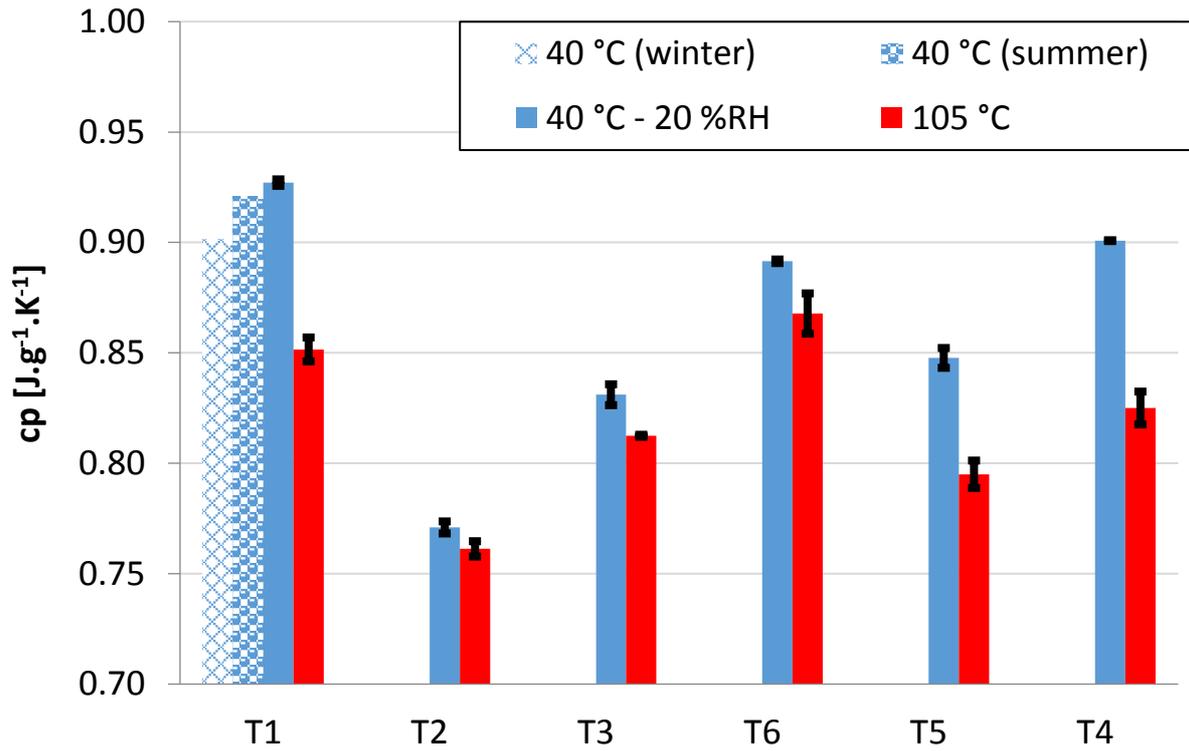


Figure 5-6: Capacité calorifique sèche (a) et teneur en humidité à 80 ± 2 %RH (b) des barbotines : influence du conditionnement initial.

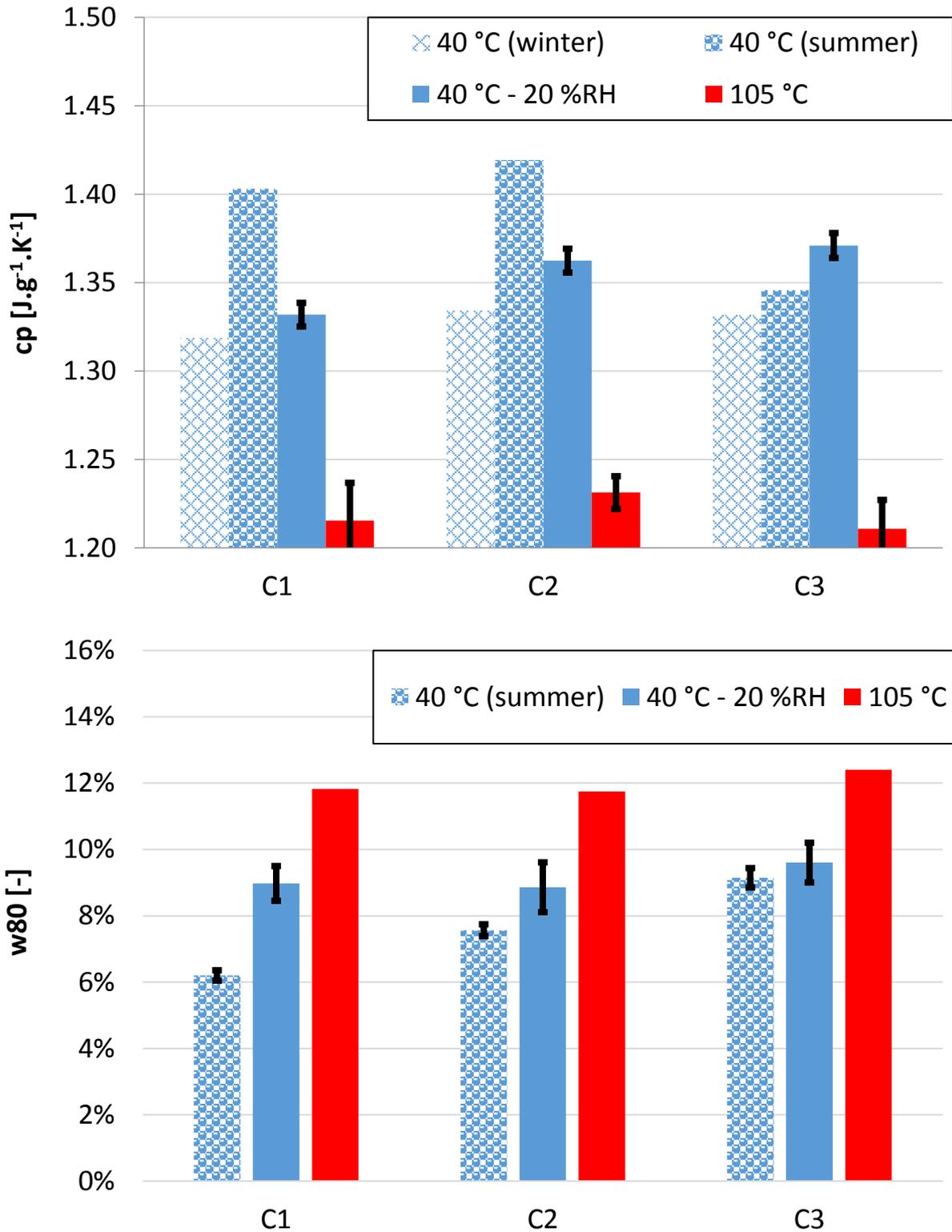


Figure 5-7 : Capacité calorifique spécifique sèche (a) et teneur en humidité à 80 ± 2 %HR (b) des chènevottes : influence du conditionnement initial.

5.6.3 VARIABILITÉ ET VALIDITÉ DE LA LOI DE MÉLANGE POUR LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION EN TERRE ALLÉGÉE

La capacité calorifique sèche (c_p) et la teneur en eau à $80 \pm 2\%HR$ (w_{80}) des deux lots de mélanges terre-chanvre sont présentées en Figure 5-8. Des exemples de courbes de sorption sur les matériaux et la formulation C1T1 sont reportés en annexe n°1.3. Toutes les mesures sont effectuées après conditionnement soit à 40 °C et $20\%HR$ en chambre climatique, soit à 105 °C en four ventilé, sauf pour les isothermes des échantillons du lot 1.

Pour un conditionnement à 40 °C et $20\%HR$ en chambre climatique, les valeurs de c_p sont comprises entre 1.02 et $1.2\text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La variabilité du matériau est d'environ $3,5\%$, ce qui est légèrement supérieur à l'erreur de répétabilité (1.61% , voir Tableau 5-3) mais bien inférieur à l'influence de la température de séchage (8.5%). En ce qui concerne la sorption, les valeurs de w_{80} des échantillons du lot 2 se situent entre 4.5 et 7% , ce qui donne une variabilité de matière de 16% . Encore une fois, elle est légèrement supérieure à l'erreur de répétabilité (9.6% , voir Tableau 5-3) et dans la même plage que l'influence de la température de séchage (12.6%).

Ces données expérimentales sont comparées aux résultats obtenus à partir d'une loi de mélange définie comme suit :

$$c_{p,\text{mélange}} = f_{\text{chanvre}}c_{p,\text{chanvre}} + (1 - f_{\text{chanvre}})c_{p,\text{terre}} \quad (5-2)$$

$$w_{\text{mélange}} = f_{\text{chanvre}}w_{\text{chanvre}} + (1 - f_{\text{chanvre}})w_{\text{terre}} \quad (5-3)$$

avec $c_{p,\text{chanvre}}$ et w_{chanvre} (resp. $c_{p,\text{terre}}$ et w_{terre}) la capacité calorifique sèche et le taux d'humidité des chènevottes (resp. des barbotines) mesurés précédemment. f_{chanvre} est la fraction massique du chanvre dans le composite (voir Tableau 5-2). Étant donné que les matériaux constitutifs sont à l'état brut au moment de la préparation de l'échantillon, la fraction de masse initiale doit être recalculée à la température de séchage appropriée en connaissant la teneur en humidité dans les conditions ambiantes. Par conséquent, les barres d'erreur incluent les incertitudes liées à la fraction massique, mais aussi celles liées à la mesure de la teneur en eau des chènevottes et des barbotines. Une différence moyenne de 1.96% est observée pour la capacité calorifique sèche : elle est similaire à l'erreur de répétabilité, validant ainsi la loi de mélange. En ce qui concerne la teneur en eau, une différence moyenne de 10% est observée pour le lot 2, le minimum et le maximum étant respectivement de 1 et 26% . D'autre part, des différences plus importantes sont observées pour le lot 1 : l'humidité relative n'ayant pas été contrôlée pendant le séchage, des fluctuations plus importantes des conditions ambiantes ont été observées pendant l'expérience. Par conséquent, un assez bon accord peut être observé entre les données prédites et mesurées en tenant compte de toutes les incertitudes, validant également la loi de mélange pour la teneur en eau dans le domaine hygroscopique.

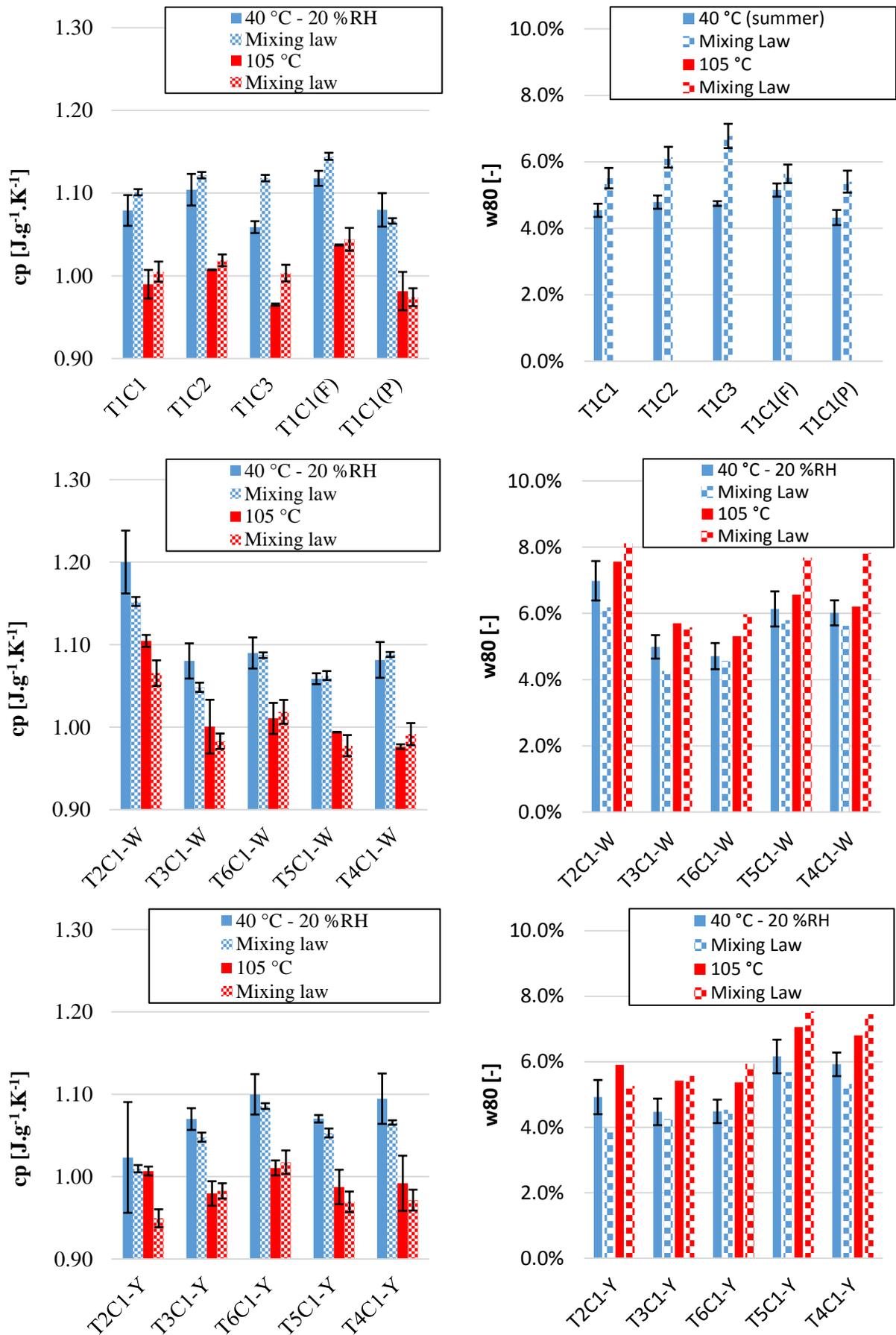


Figure 5-8: Capacité calorifique et teneur en eau à 80% d'humidité relative des deux lots de mélange terre-chanvre

5.7 RÉSULTATS ET DISCUSSION SUR LES PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

5.7.1 INCERTITUDES ET RÉPÉTABILITÉ

Les mesures à la plaque chaude gardée et à la coupelle sèche sont fondées sur des principes similaires : une différence de potentiel (température ou humidité relative) est appliquée sur un échantillon avec une épaisseur donnée et une surface ouverte qui induit un flux (chaleur ou humidité) à travers l'échantillon, mais également aux interfaces. Les propriétés de transfert sont déduites une fois que l'état d'équilibre est atteint. Pour les deux méthodes, les erreurs d'incertitude moyennes et maximales dues aux dimensions, à la précision potentielle et à la résistance d'interface sont rassemblées dans le Tableau 5-4 et comparées à la répétabilité de la mesure. Les dimensions de l'échantillon sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse par deux opérateurs. Comme les échantillons sont hétérogènes avec des surfaces rugueuses, des écarts moyens de 1 % et 1.8 % sont observés pour l'épaisseur et la surface. Les incertitudes moyennes pour les deux propriétés se situent donc dans la même fourchette. La deuxième incertitude concerne la précision du potentiel. Pour la mesure de la conductivité thermique, les températures sont contrôlées par des bains thermostatés et circulation d'eau dans les plaques chaudes et froides. De plus, les plaques froides et chaudes ont une inertie thermique élevée. L'incertitude est plutôt due à la mesure de la température qui a un faible effet sur la conductivité thermique mesurée. Dans le cas de la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau, les conditions ambiantes sont bien contrôlées par la chambre climatique, contrairement aux conditions à l'intérieur de la coupe : par exemple, Pazera et Salonvaara [243] ont noté que l'humidité relative pouvait augmenter de 5 % HR en 24 heures pendant la mesure des matériaux de construction hautement perméables. Dans ce cas, en supposant une humidité relative de 10 % HR (au lieu de 5 % HR) à l'intérieur de la coupe, des incertitudes non négligeables jusqu'à 15 % peuvent se produire. L'influence de la résistance de l'interface doit aussi être abordée. Pour la mesure de la coupe sèche, ce point a été largement étudié dans la littérature [46–48]. L'augmentation de la résistance d'interface de $3.5 \cdot 10^7 \text{ Pa.s.kg}^{-1}$ (ce qui correspond à la résistance d'une couche d'air immobile de 7 mm) induit ici une incertitude moyenne de 4.35 % sur le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Dans l'analyse de la plaque chaude gardée, les résistances thermiques de contact sont généralement négligées. Néanmoins, des études récentes ont souligné que leur importance peut augmenter dans la mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction en raison de la rugosité de surface [49, 50]. Considérant deux résistances de contact de $0.01 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ entre l'appareil et l'échantillon, la conductivité thermique mesurée peut varier d'environ 3.5 %. En résumé, les incertitudes se situent entre 1 et 15 %. Elle présente le même ordre de grandeur que les erreurs de répétabilité, qui peuvent être dues à la variabilité de la masse volumique de l'échantillon. Néanmoins, la répétabilité moyenne reste acceptable pour ces propriétés.

Tableau 5-4 : Erreurs moyennes et maximales (entre parenthèses) dues à la répétabilité et à l'incertitude pour la mesure de la conductivité thermique et du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau.

	Conductivité thermique λ [W.m-1.K-1]	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ [-]
<i>Dimensions</i>	1.38 % (6.06 %)	1.54 % (5.43 %)
<i>Précision potentielle</i>	1.01 % (1.01 %)	14.37 % (15.89 %)
<i>Résistance d'interface</i>	3.56 % (4.45 %)	4.35 % (7.91 %)
<i>Répétabilité</i>	4.42 % (11.74 %)	5.24 % (16.33 %)

En ce qui concerne les essais d'absorption capillaire, de nombreuses sources d'incertitude dans les mesures du coefficient A_w ont été répertoriées et analysées dans [51–53], parmi lesquelles la teneur en eau initiale des échantillons, la température, les écarts dans la procédure expérimentale ou le traitement des données. Outre

ces sources d'incertitudes, deux autres sont identifiées pour ces matériaux : l'hétérogénéité de surface et l'érosion hydrique. Le deuxième point peut causer des pertes de terre et même de chanvre au cours de l'expérience. Par conséquent, les variations de masse par rapport à la racine carrée du temps s'écartent du comportement linéaire idéal, ce qui rend l'évaluation de l' A_w difficile. Enfin, les erreurs moyennes et maximales dues à la répétabilité sont respectivement de 12.5 % et 22 %.

5.7.2 PROPRIÉTÉ DE TRANSFERT DE CHALEUR

Les résultats de la conductivité thermique mesurée après séchage à 70 °C sont rassemblés dans le Tableau 5-5. Le Figure 5-9 inclut la conductivité thermique supplémentaire mesurée après deux autres conditionnements (séchage à 40 °C ou conditionnement à 23 °C et 50 % HR) en fonction de la masse volumique.

À titre de remarque préliminaire, notons que la chaleur peut théoriquement être transférée par conduction, convection, rayonnement et même changement de phase pendant l'expérience. L'importance de la convection peut être estimée en calculant le nombre de Rayleigh-Darcy [248]. Si l'on considère une perméabilité à l'air de l'ordre de 10^{-10} m^2 [213], ce nombre est inférieur à l'unité et bien inférieur au seuil de 40 : la convection peut être négligée avec confiance. L'importance du rayonnement peut être estimée en calculant le nombre de Planck [249]. Si l'on considère un parcours libre moyen des photons de l'ordre de 0.5 mm, ce nombre est d'environ 30 et bien supérieur au seuil de 10 : le rayonnement peut être négligé avec confiance. Enfin, le changement de phase n'est évidemment pas envisagé pour les matériaux secs et est négligeable pour les matériaux à faible teneur en eau [250]. Par conséquent, la conductivité thermique mesurée représente bien le transfert de chaleur par conduction dans la phase poreuse et dans la phase solide.

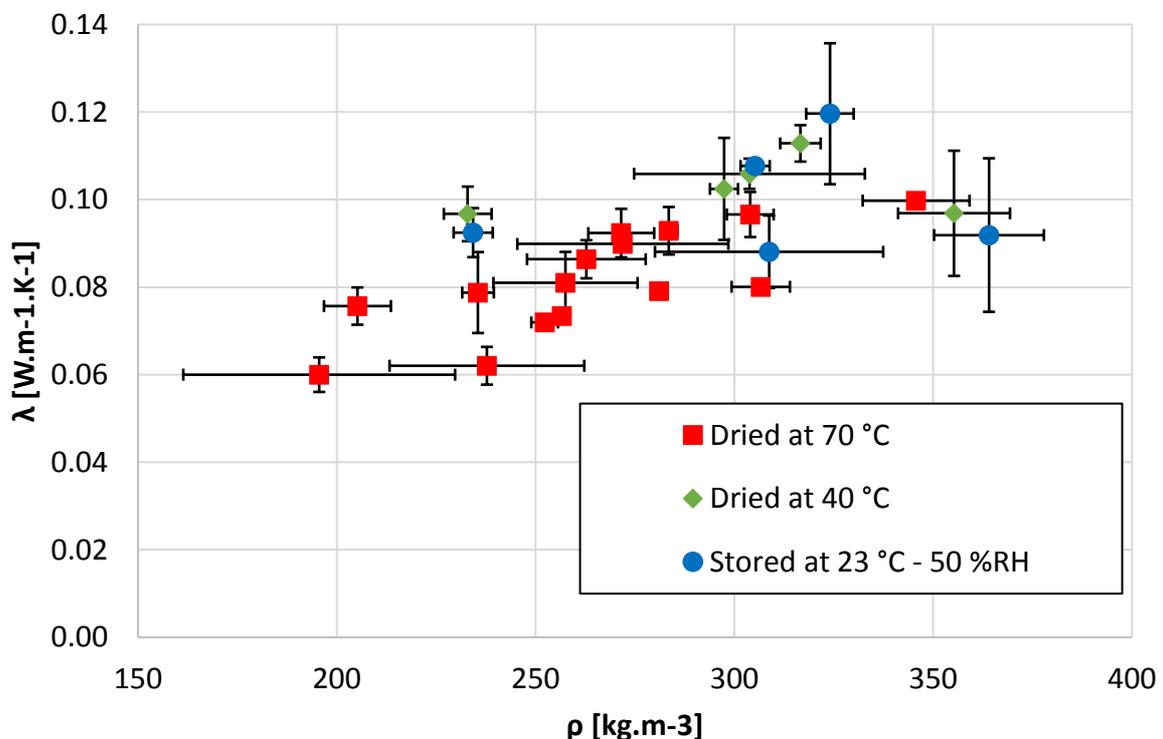


Figure 5-9: Conductivité thermique des matériaux de construction en terre allégée mesurée après différents conditionnements en fonction de la masse volumique.

Comme le montre la Figure 5-9, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique, c'est-à-dire avec l'augmentation de la fraction solide (resp. la diminution de la fraction de vide). Elle souligne en particulier l'influence du liant et de la formulation. Par contre, on ne note pas d'influence de la chènevotte puisque les variations observées sont inférieures à l'intervalle de confiance. Cela concorde avec les résultats de Williams et al [144], qui ont également observé un effet limité sur la structure interne. Notons que l'échantillon projeté ne se comporte pas différemment des autres. La littérature indique qu'en fonction de l'anisotropie des échantillons, des différences jusqu'à 30 % peuvent être observées selon la direction testée [146]. Dans notre cas, l'influence de la variabilité est plus importante que l'influence de l'anisotropie ou les faibles variations de masse volumique (entre T1C1 et T1C1-P). Enfin, en abaissant la température de séchage ou en conditionnant les échantillons à 23 °C et 50 % HR, la teneur en eau, et donc la masse volumique, est plus élevée, ce qui augmente la conductivité thermique.

5.7.3 PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT HYDRIQUE

Les résultats du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau et du coefficient d'absorption capillaire sont présentés dans le Tableau 5-5. Pour les deux expériences, l'humidité peut être transférée par diffusion et convection à l'état liquide et à l'état de vapeur. Dans l'expérience de la coupelle sèche, il n'existe aucun gradient de pression absolue d'air ou d'eau liquide, ce qui signifie qu'aucun transfert par convection n'a lieu. De plus, l'humidité relative varie au mieux entre 5 et 50 %HR à l'intérieur des matériaux, ce qui correspond à un taux d'humidité inférieur à 5 %. À ce niveau, l'humidité est absorbée dans la structure cellulaire du chanvre ou fortement adsorbée à la surface active des argiles. En l'absence de continuité de la phase liquide et en raison des fortes forces d'adsorption mises en jeu, la propriété mesurée correspond plutôt à une diffusion de vapeur à travers la structure poreuse multi-échelle pour laquelle la porosité ouverte et la tortuosité sont les principaux facteurs d'influence. Dans le présent travail, la compacité du matériau ne varie pas beaucoup : aucune tendance ne peut être observée pour le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau dont les valeurs se situent entre 2.24 et 4.14.

Dans la première étape du test d'absorption capillaire, les mécanismes de transfert d'humidité sont assez complexes : les forces capillaires et la gravité jouent ici un rôle non négligeable. En particulier pour ces matériaux, on s'attend à ce que l'eau liquide soit transférée à travers la microporosité du liant et ensuite stockée dans les agrégats. En effet, le coefficient d'absorption capillaire tend à augmenter à mesure que la fraction de chanvre diminue (ou que la fraction de terre augmente). De plus, le chanvre et la terre semblent influencer les paramètres. Par exemple, des différences supérieures à l'incertitude sont observées pour les trois chanvres (échantillons T1C1 à T1C3). De même, l'échantillon T4C1-W présente la valeur la plus élevée : cet échantillon possède la fraction de chanvre la plus faible (voir Tableau 5-2), mais la terre T4 a aussi la plus forte activité argileuse. D'autre part, les résultats ne sont pas clairement corrélés à la densité, contrairement à ce qui est observé sur le pisé [46]. Enfin, le coefficient d'absorption capillaire se situe entre 0.027 et 0.135 kg.m⁻².s^{-0.5} et possède le même ordre de grandeur que ceux mesurés pour les mélanges chaux-chanvre [11, 13].

Tableau 5-5: Propriétés de transfert des matériaux de construction en terre allégée.

	Nom	Conductivité thermique λ [W.m-1.K-1]	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau [μ]	Coefficient d'absorption capillaire A_w [kg.m ⁻² .s ^{-0.5}]
Lot 1	T1C1	0.097 ± 0.005	3.1 ± 0.2	0.058 ± 0.003
	T1C2	0.093 ± 0.005	2.9 ± 0.3	0.046 ± 0.004
	T1C3	0.100 ± 0.002	3.4 ± 0.1	0.036 ± 0.008
	T1C1(F)	0.076 ± 0.004	3.0 ± 0.2	0.031 ± 0.004
	T1C1(P)	0.090 ± 0.000	2.2 ± 0.4	-
Lot 2	T2C1-W	0.072 ± 0.001	3.8 ± 0.2	-
	T2C1-Y	0.073 ± 0.001	3.8 ± 0.2	0.089 ± 0.013
	T3C1-W	0.060 ± 0.004	3.8 ± 0.2	0.046 ± 0.005
	T3C1-Y	0.062 ± 0.004	3.3 ± 0.3	0.058 ± 0.007
	T6C1-W	0.081 ± 0.007	3.8 ± 0.2	0.027 ± 0.003
	T6C1-Y	0.080 ± 0.002	4.0 ± 0.1	0.037 ± 0.005
	T5C1-W	0.079 ± 0.009	3.9 ± 0.2	0.068 ± 0.008
	T5C1-Y	0.079 ± 0.001	3.7 ± 0.1	0.073 ± 0.008
	T4C1-W	0.092 ± 0.006	4.1 ± 0.1	0.079 ± 0.017
	T4C1-Y	0.086 ± 0.004	3.7 ± 0.2	0.135 ± 0.011

5.8 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, une attention particulière est accordée aux protocoles et aux méthodes afin de comparer la variabilité des matériaux constitutifs avec d'autres sources d'incertitudes.

Les propriétés de stockage thermique et hygrique ont été évaluées, et les résultats indiquent que la température de séchage et l'humidité relative de séchage (dans une moindre mesure) sont les paramètres les plus influents, en particulier sur la détermination de la teneur en eau. Comme on pouvait s'y attendre, les différentes méthodes de caractérisation donnent des résultats différents puisque leurs protocoles de conditionnement initiaux ne sont pas strictement identiques. Cependant, aucune conclusion ne peut être tirée quant à la meilleure méthode. Une analyse plus approfondie des effets de la température de séchage sur l'intégrité des matériaux est nécessaire. Enfin, la variabilité du matériau est évaluée à 3.5 % pour la capacité calorifique et à 16 % pour la teneur en humidité à 80 %HR. Cette variabilité est du même ordre de grandeur que les autres incertitudes. En outre, il a été constaté que l'utilisation d'une loi de mélange donne des résultats satisfaisants. Ce point est intéressant dans la perspective d'accélérer la caractérisation, car la mesure sur les matériaux constitutifs prend moins de temps.

La conductivité thermique varie entre 0.06 et 0.12 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et dépend clairement de la masse volumique. Le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau se situe entre 2.24 et 4.14, tandis que le coefficient d'absorption capillaire varie entre 0.027 et 0.135 $kg.m^{-2}.s^{-0.5}$.

D'un point de vue thermique, le terre-chaux se présente comme un matériau d'isolation et comme une alternative crédible au chaux-chaux. L'ensemble des résultats de caractérisation hygrothermiques sont présentés dans le Tableau 5-6. Ils y sont comparés aux récentes études sur le chaux-chaux présentes dans la littérature [11, 14, 54, 55]. On constate notamment que les caractéristiques du terre-chaux se trouvent dans les mêmes ordres de grandeur que le chaux-chaux.

Sur la base de ces résultats, la terre allégée peut être utilisée dans l'enveloppe du bâtiment pour assurer un haut niveau d'isolation et fournir une inertie thermique, et présente une capacité à modérer les variations d'humidité intérieure bien meilleure que les matériaux de construction conventionnelles. Une simulation hygrothermique pourrait appuyer ces évaluations.

Tableau 5-6: Comparaison des caractéristiques hygrothermiques avec la littérature sur le chaux-chaux.

Matériaux	Source		Matériaux			Stockage			Transfert		
			ρ kg/m ³	w80 %	Cp J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	μ Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹	A kg/m ² .s ^{-0.5}	λ W.m ⁻¹ .K ⁻¹			
Terre-chaux (étude)	Présente étude	Min	200	4.32	1020	2.24	0.027	0.06			
		Max	400	6.18	1200	4.14	0.135	0.1			
	M.Rahim et al	Min	471	3	1060	8.51	-	0.121			
		Max	485	6	1158	9.45	-	0.125			
Chaux-chaux	R.Walker,S .Pavia	Min	508	-	1068	5.42	0.044	0.117			
		Max	627	-	1629	5.71	0.056	0.138			
	B.Seng et al	Min	441	-	905	2.05	0.124	0.101			
		Max	491	-	911	2.59	0.148	0.119			

6 CHAPITRE 6 : CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES COMPOSITES TERRE-CHANVRE

6.1 INTRODUCTION

Le terre-chanvre est principalement utilisé pour ses qualités d'isolation, de perméabilité à la vapeur d'eau et son faible impact environnemental. Il n'est pas destiné à jouer un rôle porteur et doit surtout supporter son propre poids. Dans ce cadre, il est possible d'estimer un ordre de grandeur de contrainte que le matériau subit : pour un terre-chanvre banché de masse volumique comprise entre 250 kg.m^{-3} et 400 kg.m^{-3} , réalisé sur une hauteur de 4 m, la contrainte maximale en bas du mur varie seulement entre 10 et 16 kPa. A titre de comparaison, la Figure 6-1 indique les différentes performances à atteindre pour les mélanges chaux-chanvre, en fonction des applications possibles, selon les règles professionnelles de Construire En Chanvre [128]. Pour une application murale, les recommandations indiquent une résistance mécanique à la compression minimum de 200 kPa [128]. Ce qui représente un facteur 10 entre la contrainte réellement présente et la résistance mécanique du matériau. Malgré la nécessité d'appliquer un coefficient de sécurité pour parer aux éventuels phénomènes dégradant la résistance mécanique du matériau (fluage, fatigue, vieillissement), cet écart est important et largement supérieur aux coefficients de sécurité présents dans les normes des matériaux conventionnels de construction [2–4].

Dans le cas d'un terre chanvre appliqué en paroi verticale, le matériau peut aussi être support d'enduit. Le terme « support » indique que le matériau doit être suffisamment rigide pour qu'un enduit soit applicable sans endommager le mur, mais aussi que les rigidités du support et de l'enduit appliqué soient compatibles. Hamard et al. ont notamment étudié la pertinence de choix des enduits pour protéger les murs des constructions vernaculaires en terre [5, 6]. Selon les auteurs, la compatibilité mécanique entre un enduit et son support peut être estimée par leur différence de module d'Young. Si la différence est trop importante, les changements de contrainte induits par les surcharges, l'humidité et les variations de température génèrent une contrainte différentielle entre l'enduit et le mur. Ces phénomènes peuvent alors entraîner des dommages à l'enduit, au mur ou à l'interface.

MUR	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>15 MPa	>0,2 MPa
TOIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression*(MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>3 MPa	>0,05 MPa
ENDUIT	Module d'élasticité (MPa)	Résistance à la compression* (MPa)
Valeur seuil (minimum) <i>en condition standard</i>	>20 MPa	>0,3 MPa

Figure 6-1 : Recommandations de construire en chanvre sur les performances mécaniques des formulations de chaux-chanvre en fonction des applications [128].

Ce chapitre vise à apporter une réponse aux enjeux scientifiques liés à la compréhension du comportement mécanique du matériau. En effet, peu de littérature scientifique existe sur la caractérisation mécanique de la terre allégée [7–9]. Dans un premier temps, nous avons choisi de caractériser la résistance en compression uniaxiale. C'est en effet le test le plus simple et le plus répandu sur les matériaux de construction. Cet essai permet de situer nos matériaux vis-à-vis des autres matériaux de construction. Il s'agit alors d'observer la forme des courbes contrainte/déformation pour évaluer le caractère fragile ou ductile du matériau, puis d'en extraire les principales grandeurs caractéristiques : limite d'élasticité, module d'élasticité ou module d'Young, coefficient de

Poisson. De plus, ce comportement et ces grandeurs peuvent être caractérisés dans plusieurs directions afin d'évaluer l'anisotropie du comportement mécanique du matériau. Malgré une littérature abondante sur la mécanique des mélanges chaux-chanvre ces dernières années [10–19], les méthodes d'essais et d'analyse des résultats ne font pas consensus. Une attention particulière sera portée sur ce sujet dans ce chapitre.

Enfin, le principal enjeu de la caractérisation mécanique reste l'évaluation des paramètres de formulation influençant le comportement mécanique. Parmi ceux-ci figurent notamment dans la littérature des études sur l'influence des paramètres suivants : Taille des particules végétales [10, 13, 17, 19] ; fraction volumique de chanvre [7, 10] ; fraction volumique de terre [126]. Dans la littérature sur le comportement mécanique des mélanges chaux-chanvre, un phénomène suscite beaucoup d'attention : l'état de l'interface liant-granulat et son impact sur le comportement mécanique [260]. En effet, dans le cas de l'utilisation de liants minéraux (ciment, chaux), les sucres contenus dans les granulats bio-sourcés peuvent retarder ou annihiler la prise, et affecter la zone interfaciale liant/granulat. Dans le cas du mélange terre-chanvre, il ne se produit pas de réaction chimique à proprement parler (cf. Chapitre 1) à l'interface liant-granulat qui pourrait affecter la tenue mécanique. Cependant, cette interface reste à caractériser. Pour finir, l'impact de la variabilité de la terre est aussi à étudier, ainsi que l'influence de la teneur en eau de fabrication.

6.2 COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION CONTENANT DES GRANULATS BIO-SOURCÉS

Les matériaux de construction peuvent présenter quatre types de comportement, dépendamment de leur composition et de leurs renforts [261] (Figure 6-2).

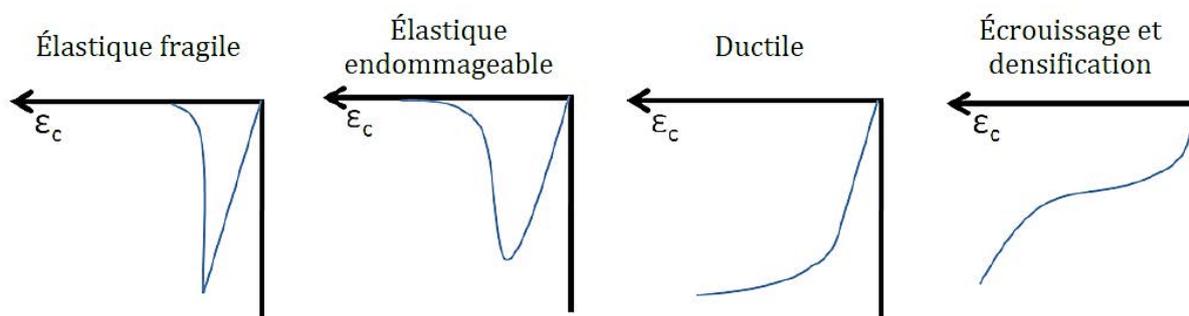


Figure 6-2: Différents comportements mécaniques de matériaux de construction. Exemple de transition du comportement du béton de fragile à ductile [261].

La littérature sur les mélanges chaux-chanvre indique que le matériau a un comportement mécanique variant entre ductile et ductile avec écrouissage et densification [13, 17–19, 22–24]. Selon les auteurs, ce comportement varie notamment en fonction du dosage en liant. Mazhoud [126] publie une étude comprenant une caractérisation du comportement mécanique de matériaux à base de chanvre et de différents liants : boue de lavage stabilisée (ciment + liant formulé) ou non stabilisée, terre préparée en sac (Claytec®) et liant formulé seul. Le constat (Figure 6-3) pour la majorité des liants est que le caractère ductile, avec écrouissage et densification ou non, dépend du dosage en liant [256]. Seulement, et notamment pour le liant à base de terre non stabilisée, le comportement varie entre plusieurs échantillons d'une même formulation.

Les courbes contrainte/déformation typiques de ces matériaux comprennent au minimum trois phases [7, 10]:

- I. Une phase courte pseudo-élastique, dans laquelle la réponse mécanique à la contrainte est majoritairement attribuée à la matrice de liant [259]

- II. Une phase élasto-plastique où la matrice liante s'endommage et les particules de chènevette reprennent peu à peu les efforts. Une inflexion de courbe est observable à la fin de cette zone et indique la transition de la reprise des efforts de la matrice vers les granulats végétaux.
- III. Une phase élasto-plastique dans laquelle les granulats sont comprimés et se réarrangent, l'ensemble se densifie et l'empilement se rigidifie.
- IV. Si un comportement ductile classique est observé, une rupture arrive en dernière phase. Sinon, le matériau continue de se densifier (phase 3) sans rupture.

Dans chacune des phases, le comportement du matériau montre aussi une forme de viscosité, visible notamment sur les boucles de charge/décharge (hystérésis observable sur la Figure 6-6).

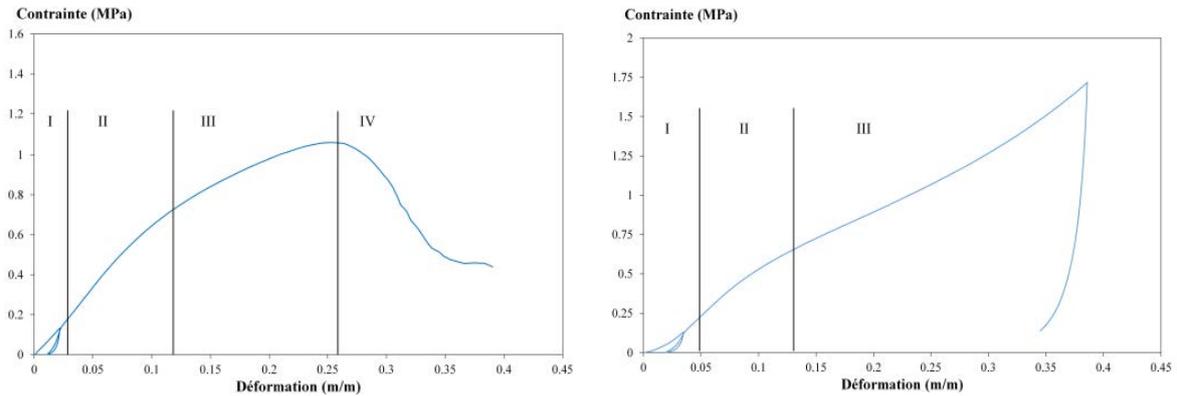


Figure 6-3: Comportements mécaniques d'un terre allégée stabilisé en fonction du dosage en liant. à gauche, fort dosage, à droite, faible dosage en liant [126].

Le caractère ductile, avec ou sans rupture, est aussi observé sur des mélanges de terre allégée. La Figure 6-4 illustre les résultats d'essais de compression sur des terres allégées utilisant différents types de granulats (colza et tournesol) [137]. Brouard indique ainsi que pour une même masse volumique, le comportement mécanique d'une terre allégée peut varier en fonction du type de granulat.



Figure 6-4: À gauche, terre tournesol (moelle et écorce), après rupture. à droite, terre colza, densification sans rupture [137].

On retrouve dans la littérature des illustrations (Figure 6-5) de ces comportements ductiles, avec ou sans rupture. La rupture est distinguée par une déformation radiale importante, soit l'apparition d'une forme de tonneau. Cet effet peut notamment être dû au frottement de l'éprouvette au contact des plateaux de la machine de compression. Ce phénomène a été premièrement observé sur des éprouvettes de béton [21, 25]. La non-rupture, ou la densification, se caractérise par une déformation axiale continue sans apparition de déformation radiale. C'est un phénomène observé sur des matériaux dont la structure est comparable à une mousse (mousse d'aluminium sur l'illustration de la Figure 6-5) [265].

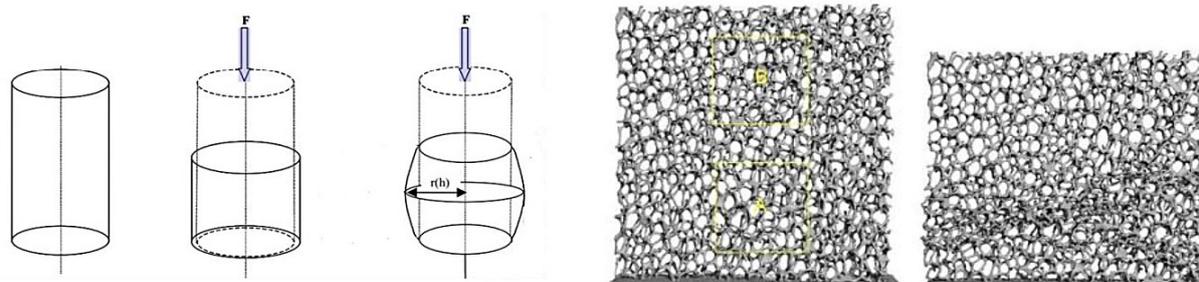


Figure 6-5: À gauche, Effet tonneau [264]. à droite, déformation des mousses d'aluminium à la porosité ouverte [265].

Les méthodes de caractérisation de comportements en compression de matériaux incluent souvent des cycles de charge/décharge permettant d'évaluer un module d'élasticité [7, 10, 11, 14, 21]. Or, dans certains cas, ces cycles peuvent endommager le matériau. La Figure 6-6 présente, dans le cas d'une formulation de chaux-chanvre, l'influence d'un chargement cyclique [259]. Il apparaît que le passage par des cycles de charge/décharge, même dans la phase de densification (phase 3), n'endommage pas le matériau. Il est donc possible d'étudier le module d'élasticité sur plusieurs cycles, sans affecter le comportement global de l'échantillon et les résultats.

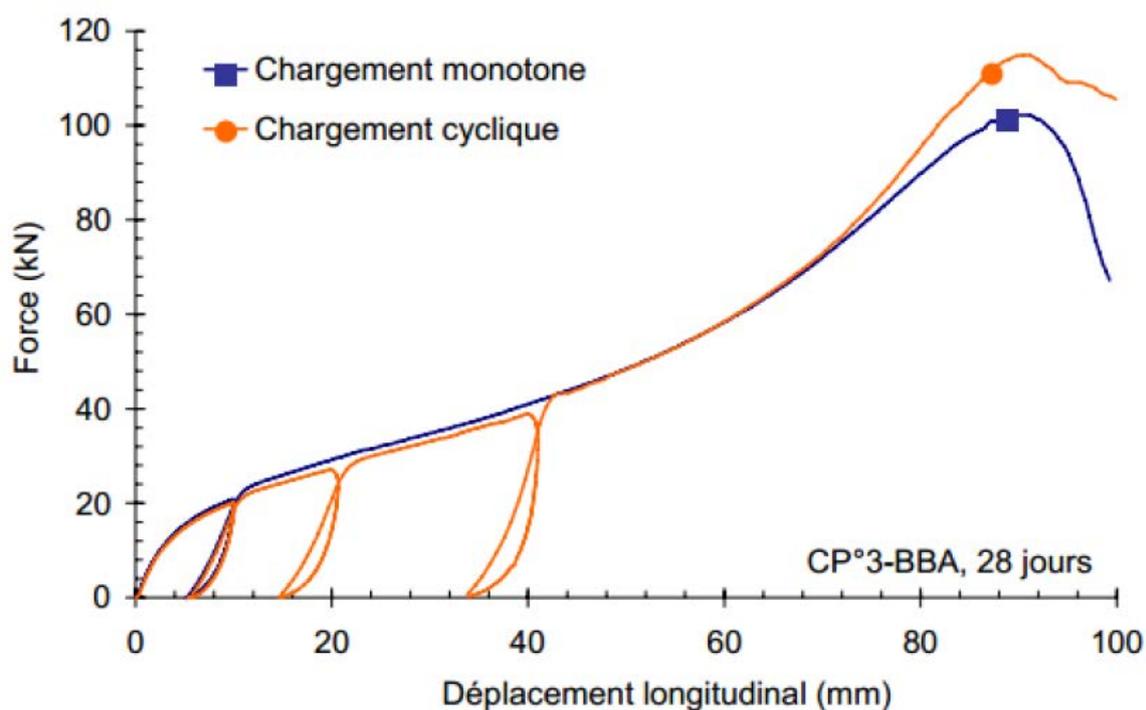


Figure 6-6: Comportement mécanique en compression d'un chaux chanvre à 28 jours de cure. effet d'un chargement cyclique [259].

Dans la littérature, les résultats de comportement mécanique sont souvent présentés en fonction de la masse volumique du matériau. Généralement, pour un même matériau, les performances mécaniques augmentent quasi-linéairement avec la masse volumique. Pour les matériaux de type béton bio-sourcé, il y a deux manières d'augmenter la masse volumique :

- L'ajout de liant, sachant que les masses volumiques particulières du liant (terre≈2650 kg/m³, chaux≈2500 kg/m³, ciment≈3150 kg/m³) et du granulat (200 à 350 kg/m³) sont très différentes ;
- Le niveau de compactage lors de la mise en œuvre.

La plage de masse volumique des bétons bio-sourcés et des mélanges de terre-chanvre fabriqués a été comparée à d'autres matériaux de construction dans le Chapitre 3. À ce propos, sachant que deux matériaux peuvent avoir des masses volumiques très différentes mais une compacité égale, il peut être préférable de comparer différents matériaux en utilisant leur compacité. Celle-ci correspond à la fraction volumique solide et rend directement compte de la part de solide par rapport aux vides (pores) dans le matériau. Elle ne prend pas en compte la masse des particules le composant. On calcule la compacité comme suit : $C = \frac{V_s}{V_T} = 1 - \eta$. Avec C la compacité, V_s le volume solide des particules, V_T le volume total apparent du matériau étudié et η la porosité.

La relation entre masse volumique, ou compacité, et grandeur mécanique (limite et module d'élasticité) peut être de différents types. Elfordy réalise une étude sur du mélange chaux-chanvre projeté et présente une relation de type loi puissance entre masse volumique et limite d'élasticité [138]. Des travaux sur des matériaux poreux à matrice cimentaire présentent une loi exponentielle sur une large gamme de masses volumiques [266]. Nguyen et Tronet, dans le cadre d'études sur le chaux-chanvre banché, présentent une relation linéaire entre compacité et caractéristiques mécaniques à la compression [6, 15].

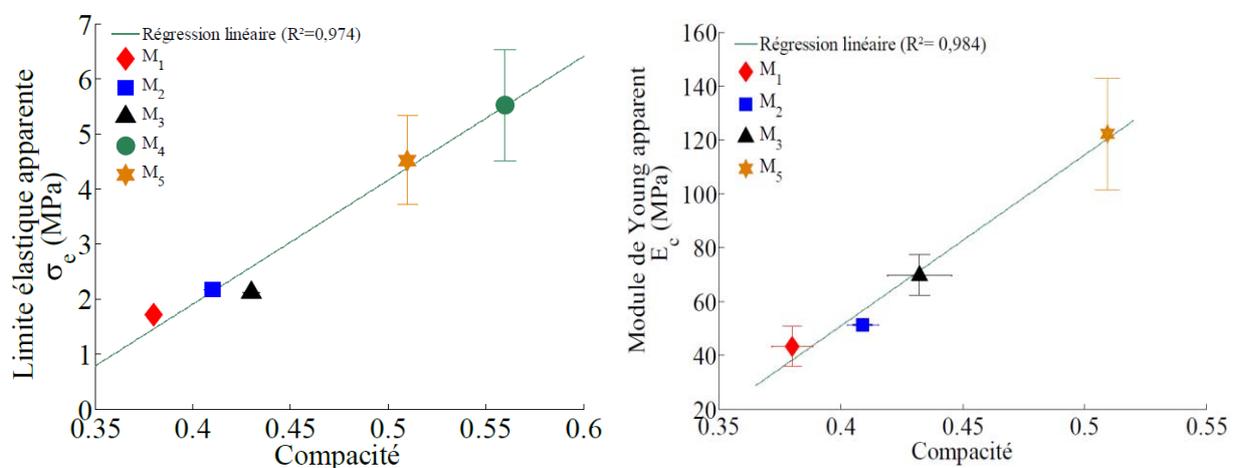


Figure 6-7: Relation entre compacité et limite d'élasticité/module d'élasticité de matériaux chaux-chanvre [141].

Pour finir, le comportement mécanique de composites chaux-chanvre peut être modélisé en fonction de leur formulation. Tronet [141] présente deux relations permettant de lier la limite d'élasticité à la composition du matériau. Une relation utilisée pour les matériaux classiques du génie civil, dans laquelle seule la fraction volumique de liant et sa résistance à la compression sont prises en compte :

$$\sigma_e = \sigma_L(\Phi_L)^a \quad \text{6-1}$$

Avec σ_e la limite d'élasticité du composite, σ_L une résistance spécifique du liant, Φ_L la fraction volumique solide de liant à l'état durci et enfin a une constante égale à 2 pour des matériaux cimentaires et de l'ordre de 3 pour une chaux Tradical®PF70 [259].

Or, dans son cas, les forts dosages en chenevotte rendent cette relation inadéquate. Les chenevottes, lorsqu'elles sont présentes en forte proportion volumique dans le mélange, jouent un rôle prépondérant sur le comportement mécanique du mélange, et notamment sur la valeur de la limite d'élasticité. Ainsi, un deuxième modèle est proposé par Tronet [141], prenant en compte cette fois la fraction volumique de granulat :

$$\sigma_e = \sigma_L(\Phi_L)^a + \sigma_G(\Phi_G/\Phi_{GMAX})^b \quad \text{6-2}$$

Avec σ_G une contrainte spécifique de la chenevotte correspondant à la résistance théorique pour un matériau complètement densifié, Φ_G la fraction volumique solide de granulat et Φ_{GMAX} la fraction volumique de chenevotte nécessaire à remplir tous les vides laissés par le liant.

La Figure 6-8 présente l'abaque proposé par Tronet [141]. Y sont reportés des points expérimentaux et les courbes modèles. On observe notamment en bas de chaque courbe une cassure correspondant au passage d'un modèle à l'autre, soit de la contribution prépondérante du liant à la contribution prépondérante de la chènevotte.

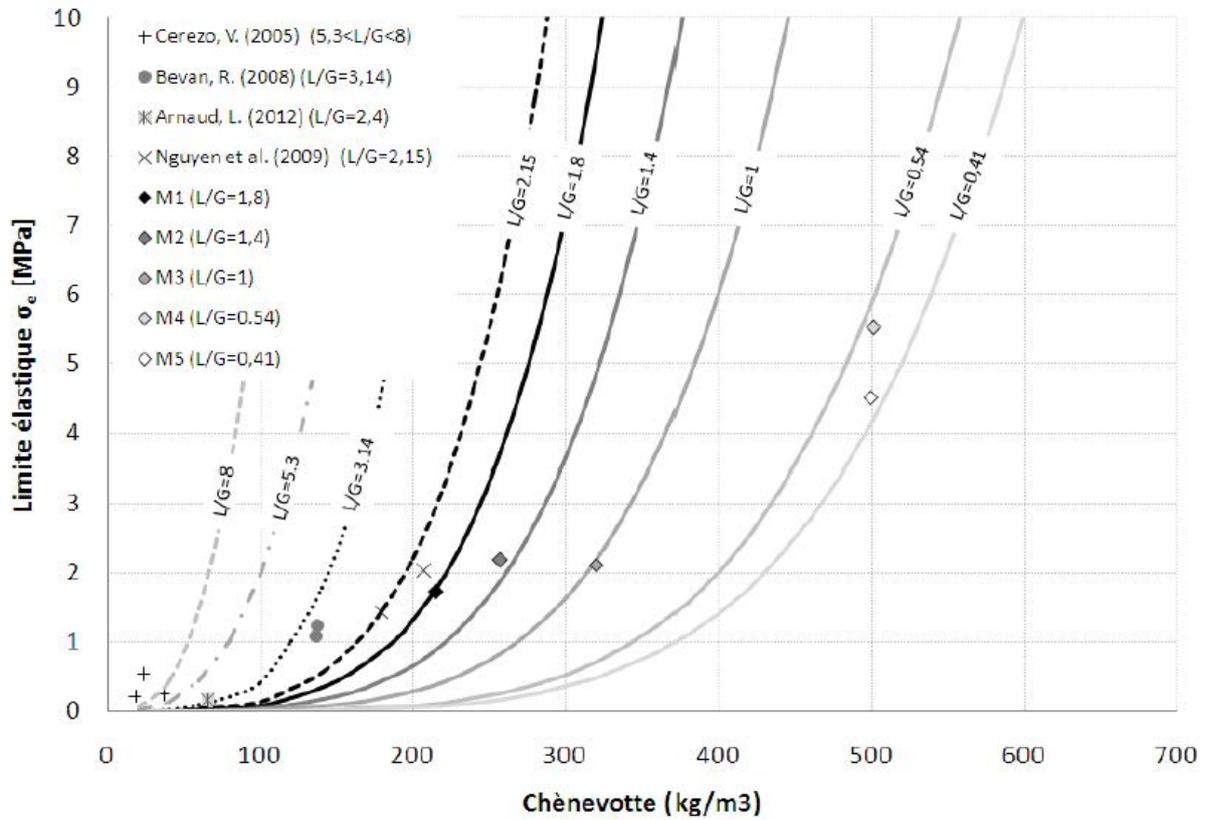


Figure 6-8: Limite d'élasticité en fonction du dosage en chènevotte dans les mélanges chaux-chanvre. Valeurs expérimentales et modèle [141].

6.3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES

6.3.1 ÉCHANTILLONS À L'ÉTUDE

L'ensemble des formulations présentées dans le Chapitre 3 ont fait l'objet d'essais mécaniques. Après séchage en ambiance contrôlée (à 23°C et 60%HR), les échantillons sont séchés en étuve à 40°C jusqu'à stabilisation de leur masse avant chaque essai. Les masses volumiques présentées dans ce chapitre correspondent donc à l'état des échantillons juste avant essai, soit après séchage à 40°C.

6.3.2 COMPRESSION SIMPLE

6.3.2.1 CYLINDRES

Les essais de compression simple sur éprouvette cylindrique ($\varnothing 16 \times 32$ cm) sont réalisés sur une machine de compression type Instron 8803 équipée d'un capteur de force de 50kN. Les échantillons n'ont pas été surfacés du fait de la difficulté à les usiner de manière précise. En revanche, afin de conformer l'appareillage à des surfaces de contact non parfaitement parallèles, un plateau bas rotulé est utilisé. Le plateau haut n'est pas rotulé. Les données de force du capteur et de déplacement du plateau bas sont récupérées.

Afin de mesurer de manière plus précise la déformation longitudinale du matériau, une cage extensométrique semblable à celles utilisés pour l'évaluation du module d'Young d'éprouvettes de béton [261] est utilisé (Figure 6-9, gauche). Il est composé de deux plateaux indépendants, qui s'ancrent dans le matériau à l'aide de pointes réglables, et entre lesquels sont placés des capteurs de déplacement type LVDT. Le dispositif mesure la déformation du tiers central de l'éprouvette (soit sur 10 cm).

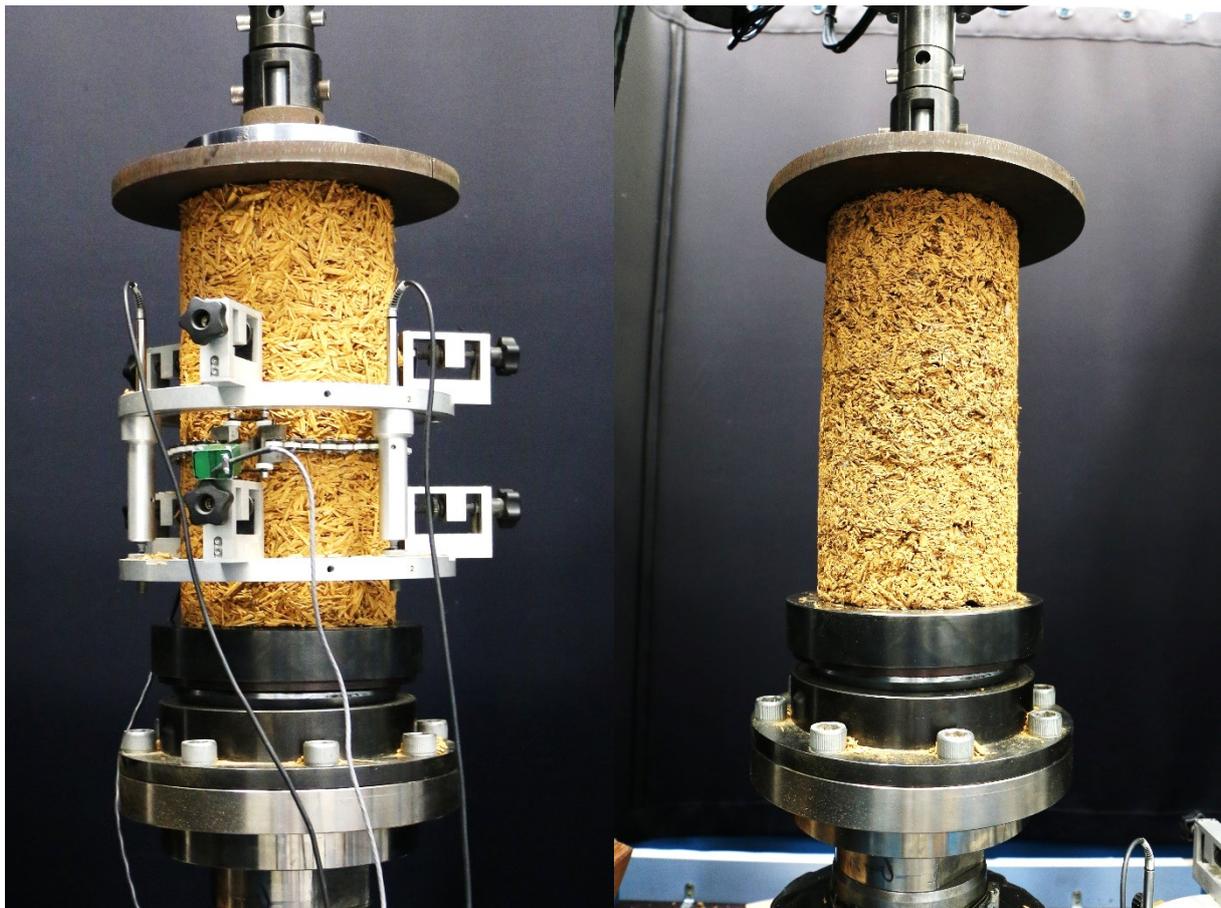


Figure 6-9: À gauche, dispositif d'acquisition de données de déformation lors d'essais de compression sur éprouvette cylindrique (extensomètres). À droite, même installation sans extensomètres.

La déformation transversale est mesurée grâce au couple extensomètre à fourche + chaînette (Figure 6-9, gauche). Ce dispositif a été développé au laboratoire et utilisé sur d'anciens travaux publiés [256]. Des dispositifs semblables sont utilisés pour la caractérisation du béton [261]. La chaînette est placée à mi-hauteur de l'échantillon.

Le protocole d'essai est le suivant :

- Chargement cyclique (1mm/min) sur plusieurs paliers de contraintes fixées ; au dernier palier déchargement complet
- Retrait des extensomètres (Figure 6-9, droite)
- Chargement monotone (1mm/min) jusqu'à rupture ou limite de déplacement de la traverse

Les essais sont réalisés en deux temps afin de permettre à la fois la mesure précise des déformations dans la phase pseudo-élastique et la caractérisation de la rupture ou de la densification, sans endommager le matériel d'acquisition. La vitesse de chargement est suffisamment lente pour considérer que l'essai est réalisé en conditions quasi-statiques.

6.3.2.2 CUBES

La Figure 6-10 présente le dispositif d'acquisition lors des essais de compression sur éprouvette cubique (10 cm de côté). Ces essais sont réalisés sur la même machine, équipée de la même façon (capteur de force 50kN et un plateau inférieur rotulé). En revanche, les déformations transverses sont mesurées à l'aide de deux capteurs de déplacement type LVDT dont les extrémités sont placées contre le centre des faces verticales. En parallèle, un système d'acquisition vidéo 2D, utilisé avec le logiciel ARAMIS (Figure 6-11, gauche), est mis en place de manière à avoir un autre moyen de mesure des déformations axiale et orthogonale. Grâce au logiciel, 3 extensomètres virtuels sont placés sur la surface du cube (Figure 6-11, droite). Les éprouvettes sont, avant essai, peintes en blanc et tachetées de noir pour créer un mouchetis repérable à l'analyse vidéo. L'aspect de surface n'est pas lisse et homogène. Les aspérités trop importantes créent des zones non analysables par le logiciel (Figure 6-11, droite).

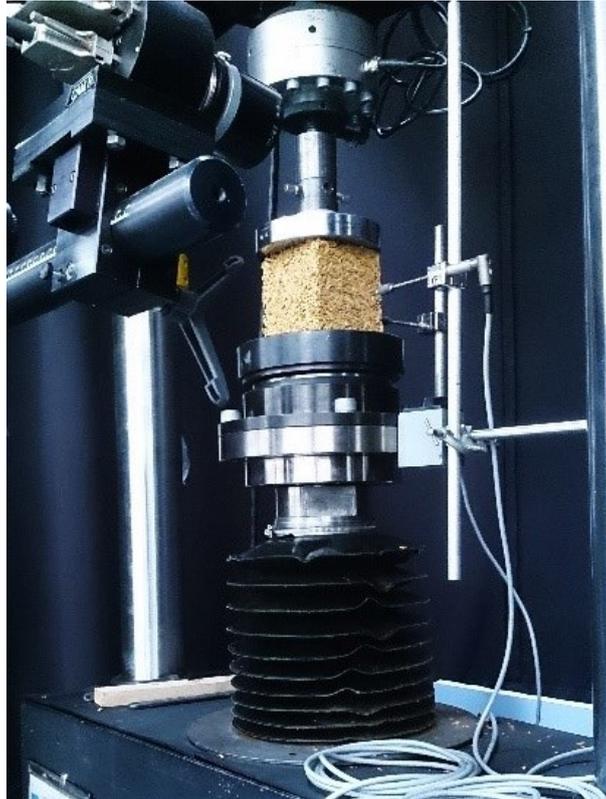


Figure 6-10: Dispositif d'acquisition pour essai de compression sur éprouvette cubique.

Le protocole d'essai est le même que pour les cylindres et les paliers sont réalisés aux mêmes contraintes. L'essai s'effectue en un seul temps, les capteurs LVDT sont enlevés au cours de l'essai pour ne pas les endommager.

Ces géométries cubiques permettent notamment de caractériser le matériau dans différents sens de compression, afin d'évaluer l'anisotropie du comportement mécanique. La Figure 6-12 présente les deux directions testées : l'essai type perpendiculaire où la force de compression est perpendiculaire aux couches du matériau (ce sens correspond à celui utilisé pour les essais sur cylindre) ; l'essai type parallèle où la force de compression est parallèle aux couches du matériau (plus représentatif d'un mur de terre-chanvre projeté).

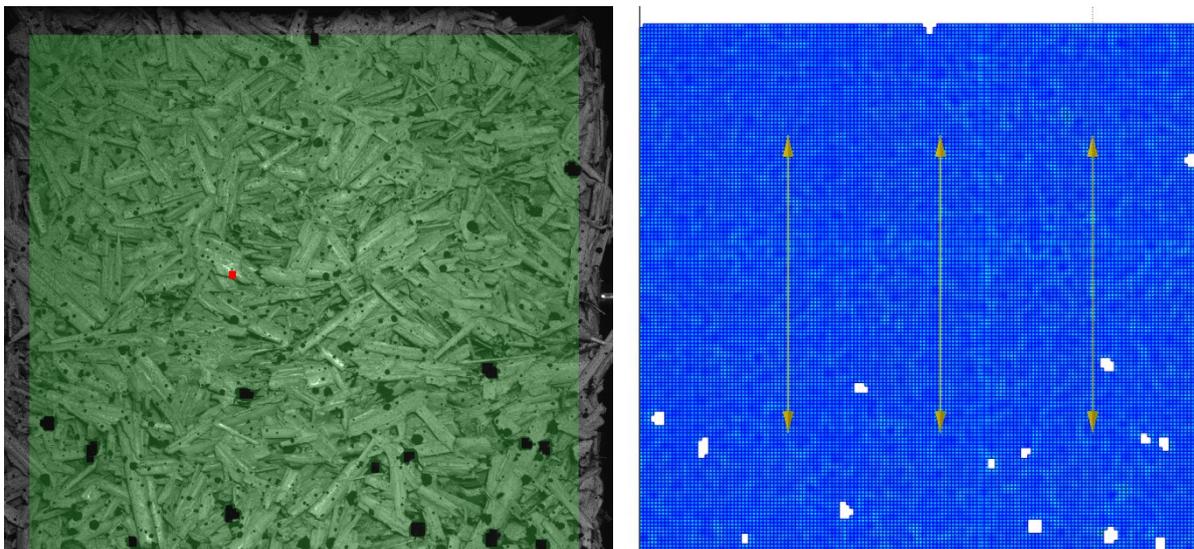


Figure 6-11: Gauche, vue caméra ARAMIS. Droite, modélisation de la surface avec trois extensomètres virtuels

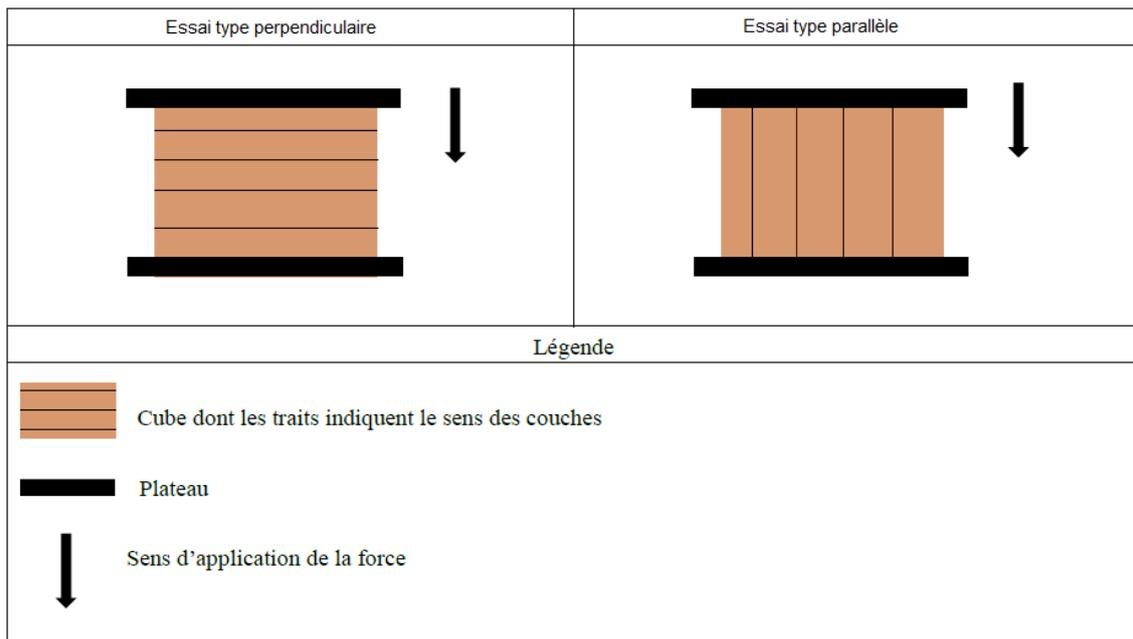


Figure 6-12: Direction d'application de la force pour caractérisation de l'anisotropie de comportement.

6.3.2.3 ÉVALUER LE MODULE ET LA LIMITE D'ÉLASTICITÉ

La Figure 6-13 présente les définitions des différents modules de compression évaluables lors d'un essai de compression. La limite d'élasticité, définie précédemment comme la valeur de contrainte au passage de la phase pseudo-élastique (phase 1) à la phase plastique (phase 2), est évaluée ici (Figure 6-13A) sous l'intersection des tangentes de ces deux phases. La pente de la tangente de la première phase donne le module d'élasticité apparent.

Afin de traiter rapidement les résultats des nombreux essais, un programme (codé en VBA sur Excel) a été développé pendant la thèse. Celui-ci réalise les actions suivantes :

- Repérage des points d'inflexion importants pour définir les extremums des cycles ;
- Calcul des pentes entre extremums, moyenne et écart type entre les trois premiers cycles ;
- Calcul des pentes maximales au sein des cycles, moyenne et écart type entre les trois premiers cycles ;
- Établissement des tangentes des phases 1 et 2 et de leur pente ;
- Recherche du point d'intersection des deux tangentes et de la correspondance sur la courbe (limite d'élasticité σ_e).

Ainsi, le programme permet le calcul d'un module de déchargement entre l'extremum haut et bas d'un cycle, et celui du module tangent (pente maximale au cours d'un cycle). Le module sécant en chargement cherché, correspond à la pente entre l'extremum bas d'un cycle et le point auquel la courbe reprend sa course initiale (hors cycle). Ce point n'est pas identifié par le programme. Nous considérons ici une différence très faible entre ce point et l'extremum haut d'un cycle. Les résultats de modules sécants et tangents présentés par la suite correspondent toujours à la moyenne entre les trois premiers cycles, avec l'écart type entre ceux-ci.

Concrètement, chaque module correspond à un cas de chargement particulier. Le module apparent permet d'observer la réponse mécanique du matériau à un chargement initial, potentiellement permanent. Ensuite, les cycles correspondent à la réponse mécanique à des sollicitations temporaires. Dans notre cas, nous effectuons ces cycles dans le domaine des petites déformations (entre 0 et 1%, Figure 6-13B). Ainsi, le module sécant mesuré en déchargement est très proche du même module en chargement.

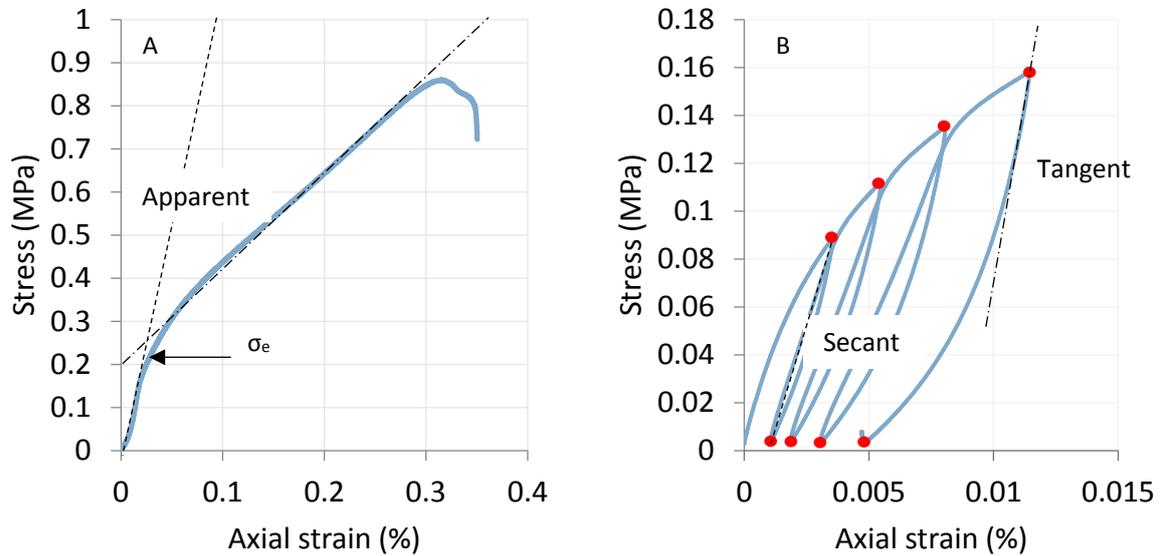


Figure 6-13: Définitions des différents modules d'élasticité en compression

Les résultats de limite d'élasticité seront toujours présentés selon les déformations globales évaluées entre plateaux. En revanche, comme nous l'avons vu précédemment, l'exploitation des résultats bruts peut amener à estimer le module d'élasticité de différentes manières suivant la géométrie de l'échantillon et les mesures exploités (capteurs du plateau, extensomètre, chaînette, vidéo...). La Figure 6-14 résume ces différentes méthodes de mesure et d'analyse des résultats. Les extensomètres et l'analyse d'image étant utilisés seulement durant les cycles et non sur l'essai complet, le module d'élasticité apparent n'est pas évalué avec ces méthodes de mesure.

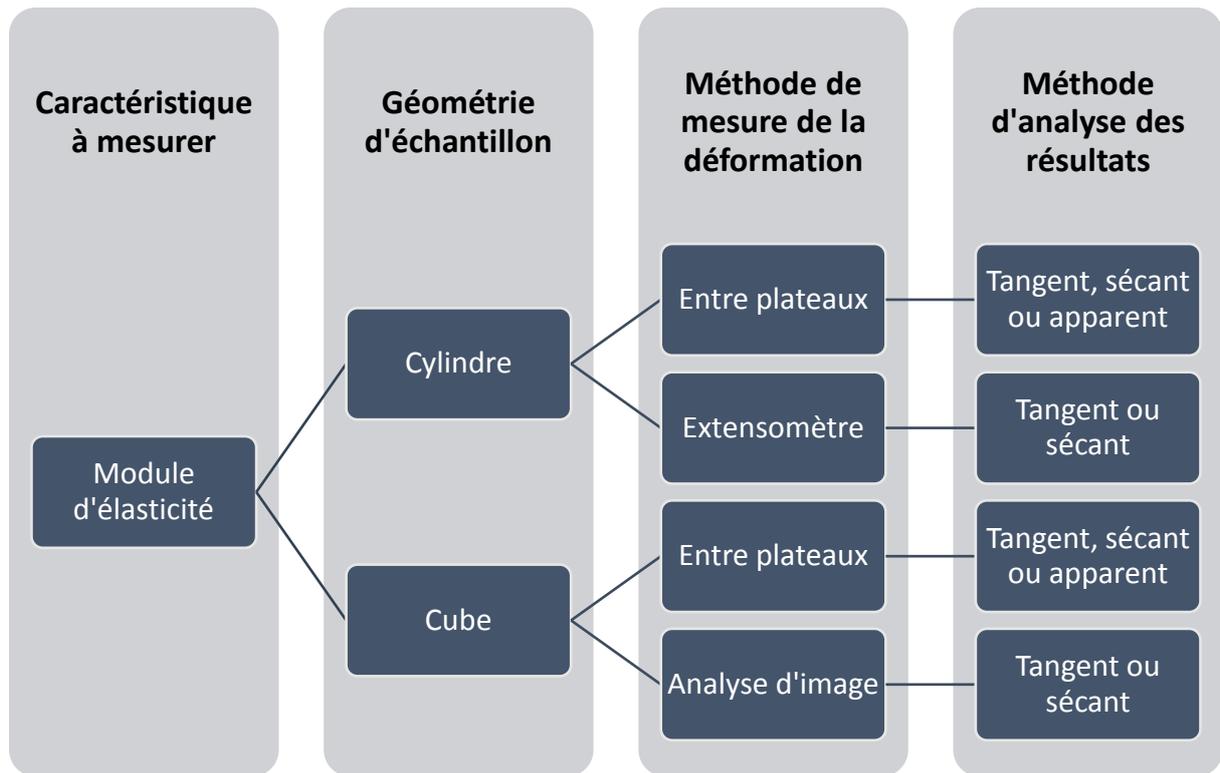


Figure 6-14: résumé des méthodes de mesure et de traitement des données pour le calcul du module d'élasticité

6.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.4.1 COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU TERRE CHANVRE

La Figure 6-15 présente des courbes types obtenues lors des essais de compression simple d'échantillons cylindriques de différentes formulations. Les déformations présentées sont les déformations globales entre plateaux.

Une diversité de comportement est notable. Premièrement, l'ensemble des échantillons présente un comportement ductile. Celui-ci varie entre ductile avec rupture (T1C3-2 et T1C3-3), écrouissage avec rupture (T1C1(S2)-3), et écrouissage puis densification sans rupture (T1C2-2 et T1C1(F)-2). Les courbes T1C3-2 et T1C3-3 indiquent par ailleurs que le comportement mécanique peut varier de manière assez significatif au sein d'une même formulation, notamment dans les phases de déformation élasto-plastique (phase 2 et 3).

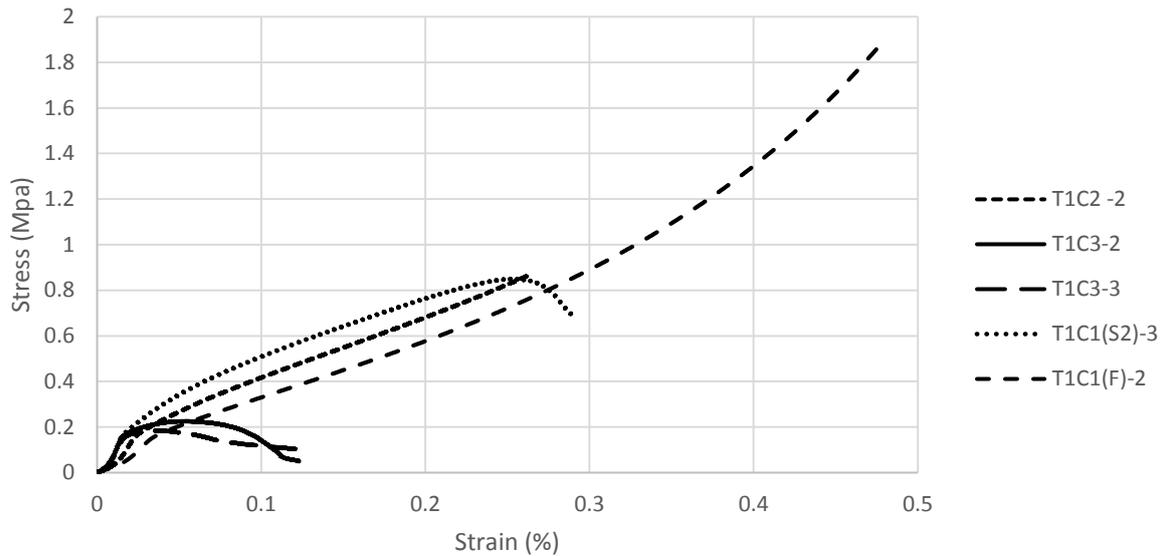


Figure 6-15: Courbes types contrainte-déformation des essais en compression simple.

La Figure 6-16 illustre ces comportements mécaniques. Y sont présentés les différentes étapes de l'essai (début, milieu, fin) de compression monotone des échantillons dont les courbes sont présentées ci-dessus (Figure 6-15). Les images de T1C2-2 montrent un comportement densifiant comparable à des mousses, sans déformation radiale. Les autres illustrations présentées permettent de rendre compte des différents types de rupture. En effet, celle-ci peut apparaître sur différentes zones de l'échantillons (haut, centre, bas). Un effet de gonflement ou effet tonneau est remarquable avant chaque rupture (sur les illustrations centrales de la Figure 6-16) avec une déformation radiale importante.



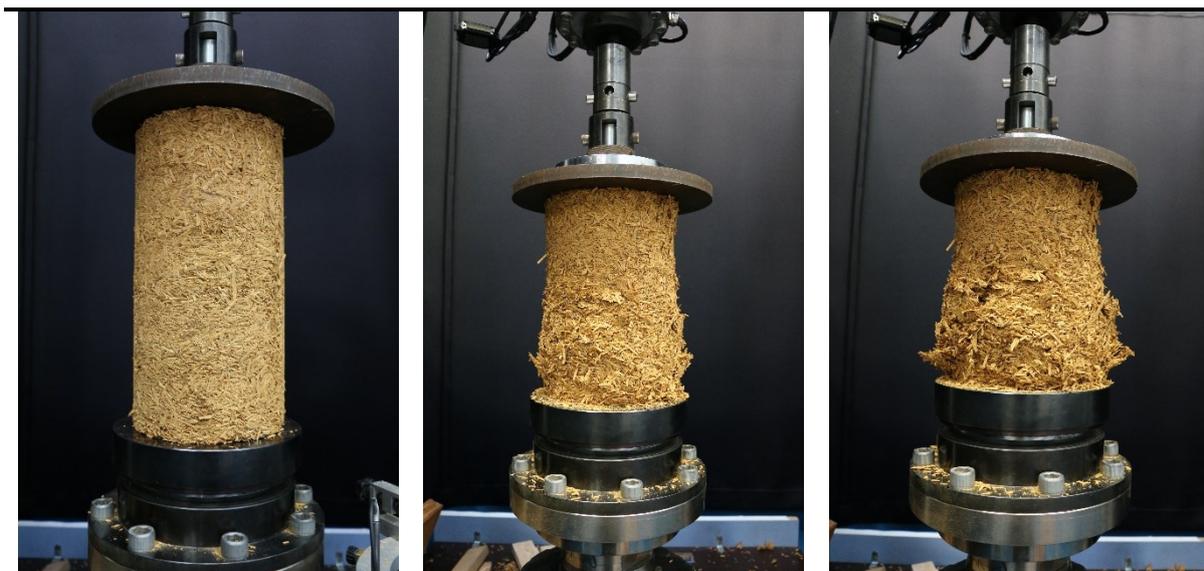
T1C2-2



T1C3-2



T1C3-3



T1C1(S2)-3

Figure 6-16: Images associées aux courbes types, illustrant les différents comportements mécaniques observés. Pour chaque échantillon : début, milieu et fin d'essai.

6.4.2 INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE DE L'ÉCHANTILLON ET DE LA MÉTHODE D'ACQUISITION

La Figure 6-17A présente des résultats de module d'élasticité en fonction de la méthode d'analyse. Les valeurs comparées sont issues d'essais sur des cylindres de la formulation T1C1. Premièrement, le module tangent est anormalement supérieur aux valeurs de modules de la littérature précédemment évoquées. Ensuite, les valeurs entre plateaux et extensomètre des modules sécants sont relativement proches (respectivement 19 et 33 MPa), mais la différence reste notable et supérieure aux écarts-types. Une faible différence est observée entre module apparent et sécant entre plateaux. Le module sécant étant calculé dans de très faibles niveaux de déformations (Figure 6-13), sa pente est proche du module apparent. Ce dernier est réalisé sur une portion de courbe plus importante.

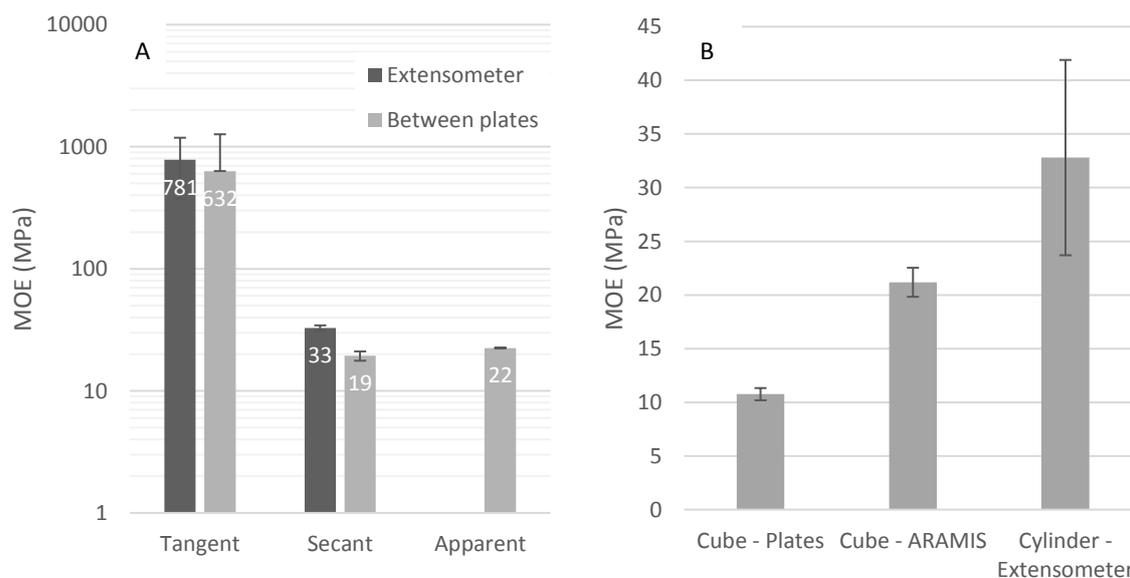


Figure 6-17: A) Influence de la méthode d'analyse des résultats de module d'élasticité des cylindres ; b) Influence de la méthode d'acquisition des déplacements lors d'essais de compression simple sur cube ou cylindre- Module d'élasticité sécant.

Les illustrations de la Figure 6-16 permettent d'observer la caractéristique locale des grandes déformations. En effet, la zone de rupture, lorsqu'elle a lieu, est toujours concentrée sur un tiers de l'échantillon. Plusieurs causes peuvent être citées : hétérogénéité de l'éprouvette, hétérogénéité de la répartition des forces (plus importantes aux extrémités de l'échantillon), frottement sur les plateaux. Si l'on souhaite que notre résultat soit représentatif d'une paroi, dont la composition et la répartition des contraintes sont hétérogènes, alors les déformations peuvent être moyennées sur l'ensemble de l'échantillon. Cela correspond au module entre plateaux, donnant une déformation importante et donc un module plus bas. Si l'on souhaite un module représentatif du matériau seul, donc homogène, alors il faut localiser l'observation des déformations, où l'hétérogénéité du matériau et des répartitions des efforts est moindre et où l'on s'extrait de l'influence des plateaux. Cela correspond au module à l'extensomètre, dans la zone centrale, où les déformations sont plus faibles et donc le module plus élevé.

La Figure 6-17B exprime l'influence de la méthode d'acquisition des déplacements sur cubes, et les compare aux résultats par extensomètre sur cylindre. Les modules comparés sont des modules sécants (toujours sur les échantillons de la formulation T1C1). Ainsi, les cubes présentent généralement un module d'élasticité inférieur aux cylindres. Le volume de ceux-ci étant plus faible, les hétérogénéités ont plus d'impact sur le comportement mécanique. Il en est de même pour l'effet de frottement des plateaux. Ensuite, de la même façon que sur le cylindre, une observation des déplacements au centre de l'échantillon cubique (zone de 5cm de côté) mène à un module d'élasticité plus élevé qu'entre plateaux. Le rapport entre ces deux derniers modules est de l'ordre de 2.

La Figure 6-18 présente l'influence de la géométrie sur l'évaluation de la limite et du module d'élasticité. Les données permettent de réaliser cette comparaison sur les modules sécants des formulations suivantes : T1C1, T1C2, T1C3, T1C1(S1), T1C1(S2), T1C1(F) et T1C1(F+S1). Sur la figure de droite sont représentés la comparaison entre modules sécants entre plateaux pour les cubes et avec extensomètre pour les cylindres (« Real values »). Pour les cubes, le facteur de correspondance entre module calculé entre plateau et module calculé avec ARAMIS est utilisé pour recalculer les valeurs expérimentales (Values*ARAMIS factor).

Les limites d'élasticité évaluées avec les cubes présentent une moins bonne répétabilité qu'avec les cylindres. La relation entre les limites d'élasticité obtenues avec les deux géométries ne paraît pas évidente (Figure 6-18). Concernant les modules d'élasticité, l'utilisation du facteur 2 obtenu par analyse d'images permet de rapprocher les résultats obtenus sur les deux géométries. Néanmoins, certaines formulations (T1C1, T1C3 et T1C1(S2)) montrent une faible corrélation des modules sur cubes et sur cylindres.

Une majorité des articles de la littérature sur les bétons de chanvre et leur comportement mécanique utilise des échantillons cylindriques. Cependant, les cubes permettent d'évaluer le comportement mécanique selon différentes directions. Youssef [142] a publié une comparaison du comportement mécanique des cylindres et cubes de chaux-chanvre comprimés. La géométrie de l'éprouvette influence grandement son comportement mécanique, mais la résistance à la compression simple reste la même dans son cas. Les résultats présentés montrent qu'il n'y a pas d'influence d'échelle entre les cubes de 7, 10 et 15 cm sur la résistance à la compression simple. Dans notre étude, la géométrie a clairement un effet sur le module et la limite d'élasticité. Et cet effet peut dépendre des formulations. Cette différence de limite d'élasticité entre cubes et cylindres est aussi connue pour les bétons conventionnels, où la résistance à la compression est toujours exprimée selon les deux types d'échantillons : C25/30 soit 25MPa pour des cylindres et 30MPa pour des cubes (rapport de 1.2). Nous observons en moyenne le même rapport de 1.2, avec un écart type de 0.18, entre les limites d'élasticité des cubes et des cylindres de terre chanvre.

Pour cette limite d'élasticité, le fait d'avoir un échantillon avec un élancement de deux augmente l'influence des défauts de mise en œuvre. L'observation des illustrations en Figure 6-16 (notamment l'échantillon T1C3-3) permet de voir que du cisaillement a lieu lors de la rupture. D'ailleurs, la forme de l'échantillon après rupture est proche des typiques cônes de rupture obtenus lors d'essais de compression sur cylindres de béton.

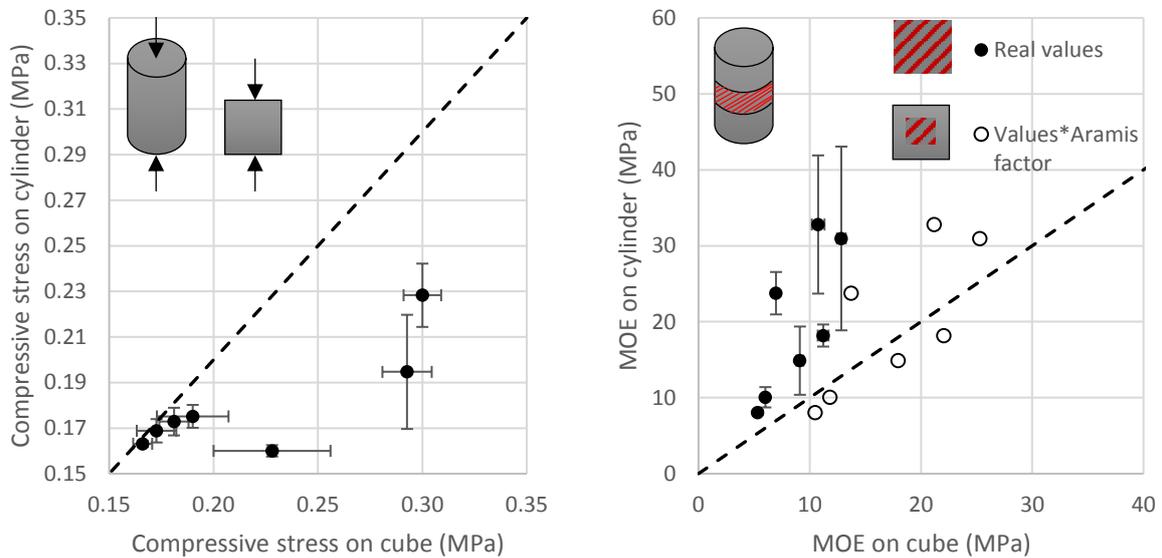


Figure 6-18: Influence de la géométrie sur les propriétés mécaniques en compression. à gauche, limites d'élasticité ; à droite, modules d'élasticité avec valeurs expérimentales et valeurs recalculées des cubes selon les résultats ARAMIS.

Par la suite, les résultats de caractérisation mécanique sur cubes seront utilisés seulement en analyse relative pour l'évaluation de l'anisotropie. Les résultats de caractérisation sur cylindre seront utilisés dans tous les autres cas (entre plateau pour les limites d'élasticité et localisé au centre de l'échantillon pour les mesures de module), notamment pour l'étude des différents paramètres d'influence sur le comportement mécanique de la terre allégée.

6.4.3 PARAMÈTRES D'INFLUENCE SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE

6.4.3.1 INTERFACE LIANT-GRANULAT ET RETRAIT

La Figure 6-19 est issue d'images MEB de l'interface terre/chanvre de la formulation T1C1. Les échantillons ont été préalablement séchés à 40°C puis laissés à l'air libre jusqu'à stabilisation de leur masse. Les images sont réalisées sans métallisation avant passage au MEB. Premièrement, les images a et b illustrent le fait que les particules de terre peuvent entrer dans les cellules de chanvrotte, en couvrir les parois, sans spécifiquement les boucher. Les images c et d illustrent l'adhésion de la terre aux parois externes des chanvrottes. Ainsi, aucune zone de transition, spécifique au chaux-chanvre et aux réactions chimiques à l'œuvre dans ces matériaux, n'est visible ici par observation au MEB.

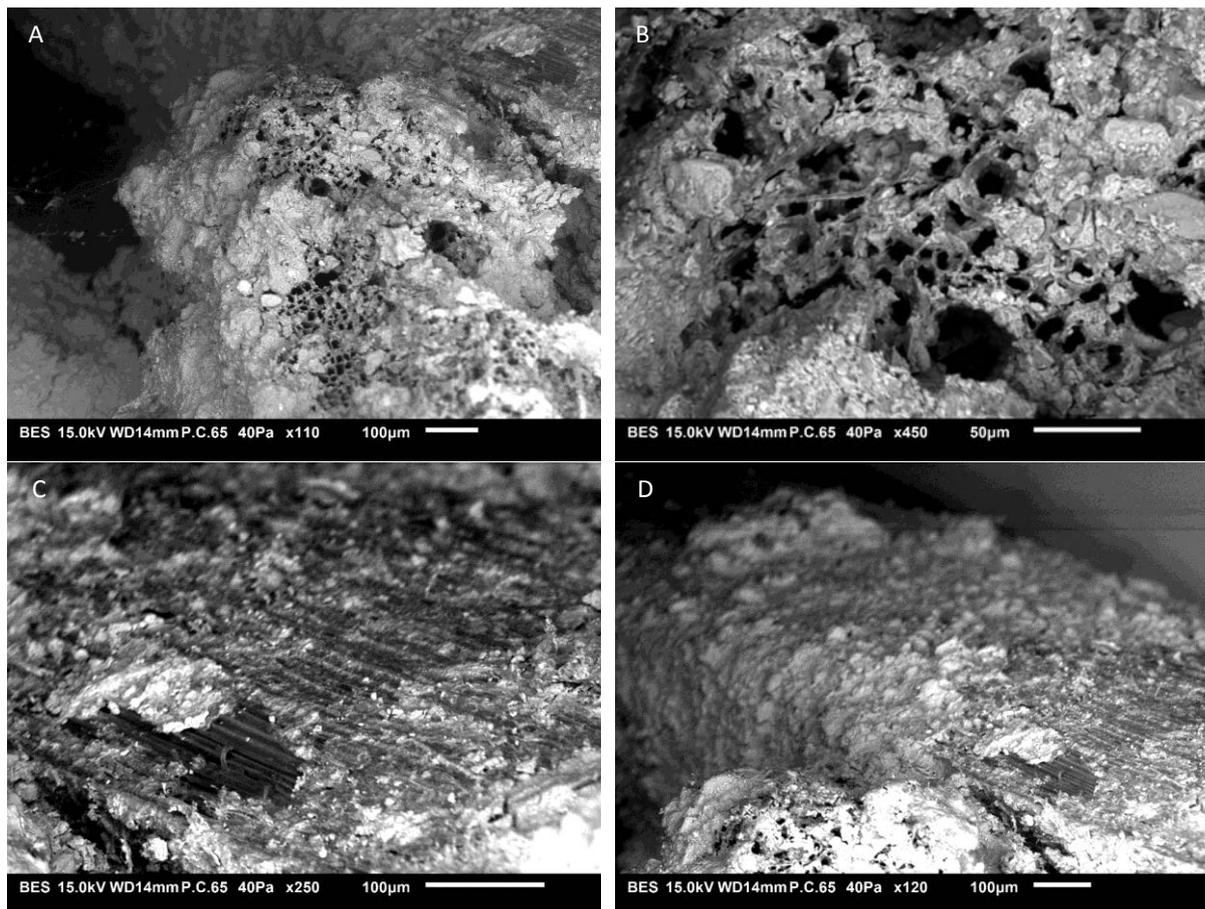


Figure 6-19: Images MEB de l'interface terre (REF) et chanvre (C1).

Une caractérisation de l'interface terre-fibre végétale a été réalisée par Danso [267]. Cette étude est réalisée sur un matériau de terre fibrée (fibre de coco, bagasse, fibre de palmier à huile), avec seulement 1% de fibres. Dans ce cas, selon l'auteur, lors du séchage la fibre présente un retrait volumique important. Ce retrait, non suivi par les particules de terre, crée des zones de porosité entre fibre et terre. Ce phénomène dégrade ainsi l'adhérence fibre-terre et l'utilité de la fibre en tant que renfort. Dans notre étude, les particules végétales sont présentes en moyenne à une hauteur de 80% en volume dans le composite sec. Le volume de ces particules végétales doit effectivement changer au cours du séchage, puisque celles-ci absorbent puis relarguent une quantité importante d'eau. Néanmoins, les images MEB confirment ici que la fine couche de terre entourant les particules de chènevotte et servant de lien suit les éventuelles déformations des particules durant le séchage.

Aussi, les dimensions des échantillons ayant été mesurées avant les essais mécaniques, il est possible d'estimer leur retrait en calculant la différence entre dimensions des moules et dimensions avant essai mécanique. La Figure 6-20 présente les retraits calculés (d'après les mesures de dimensions après séchage à 40°C) selon la hauteur des échantillons cylindriques de l'ensemble des formulations. Les retraits négatifs correspondent à des dimensions mesurées supérieures aux dimensions du moule, soit un effet de gonflement lors du séchage. Premièrement, il apparaît que ce retrait est très variable selon les formulations, et au sein d'une même formulation (écarts types importants). Deuxièmement, ces retraits varient entre -3% et 3.6%.

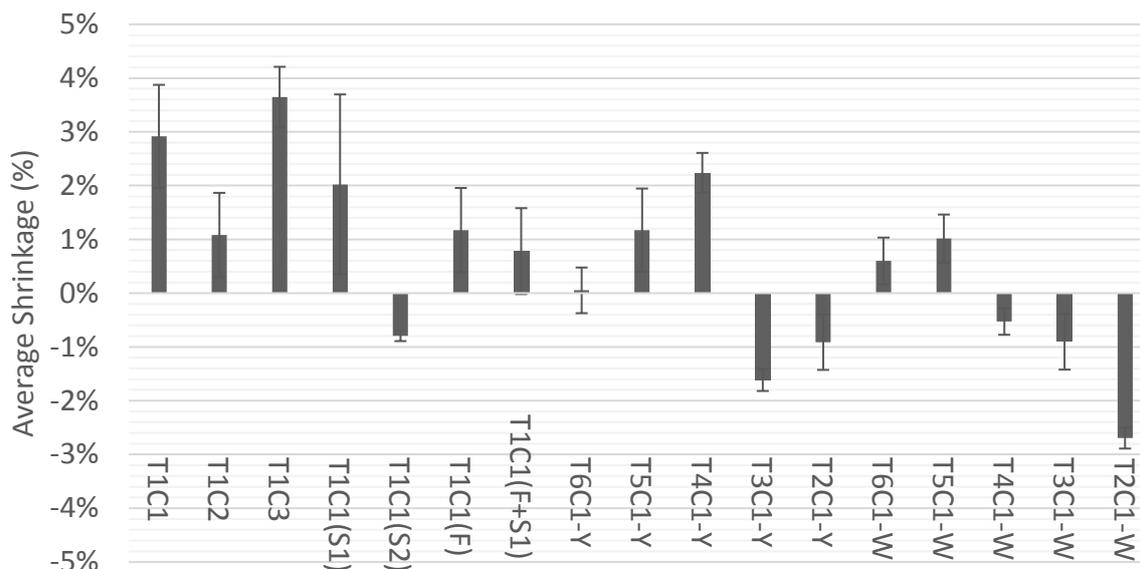


Figure 6-20: Retrait moyen calculé sur la hauteur des cylindres de l'ensemble des formulations.

Les échantillons présentant un gonflement correspondent aux formulations (T1C1(S2), T3C1 et T2C1) réalisées avec une terre peu cohésive ou additionnée de sable. Les formulations T2C1 ne sont pas validées pour la fabrication de terre-chanvre. Lors de la fabrication, ces échantillons montraient notamment une difficulté particulière au remplissage du moule. À l'inverse, les terres plus cohésive (formulation T1C1, T1C2, T6C1, T5C1 et T4C1) entraînent du retrait. Enfin, le retrait le plus important est constaté pour une terre cohésive et une granulométrie de chènevette fine (formulation T1C3).

Les valeurs de retrait paraissent ici relativement fortes. Un retrait de 3% sur un mur de 3 mètres de haut entraîne l'apparition d'un espace de 9cm. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lors de l'analyse de résultats de retrait : la méthode de mise en œuvre, et le type de système constructif. L'expérience de chantier d'Eco-Pertica montre qu'aucun retrait n'a été observé pour des mises en œuvre de terre-chanvre par projection. En revanche, un léger retrait peu apparaître pour un terre-chanvre banché. De même, si le matériau est mis en œuvre en doublage de paroi, celle-ci aura une influence importante et empêchera le retrait. Les résultats présentés ici sont issus d'échantillons fabriqués par banchage (remplissage de moule) puis démoulés aussitôt (pas d'effet de parois).

6.4.3.2 GRANDEURS MÉCANIQUES D'OBSERVATION

La Figure 6-21A présente les résultats de coefficients de Poisson (C) en fonction de la compacité. Les deux paramètres ne sont pas corrélés. Néanmoins, on constate que dans l'ensemble des cas, le coefficient de Poisson des formulations de terre-chanvre réalisées ne dépasse pas 0.07. Ainsi, lorsque le matériau est soumis à une contrainte de compression axiale, la déformation latérale est très faible et les efforts sont très peu retransmis transversalement. Tronet présente pour ses mélanges de chaux-chanvre compactés un coefficient de Poisson plus élevé allant de 0.05 à 0.12, pour des compacités aussi élevées comprises entre 0.38 et 0.56 [141].

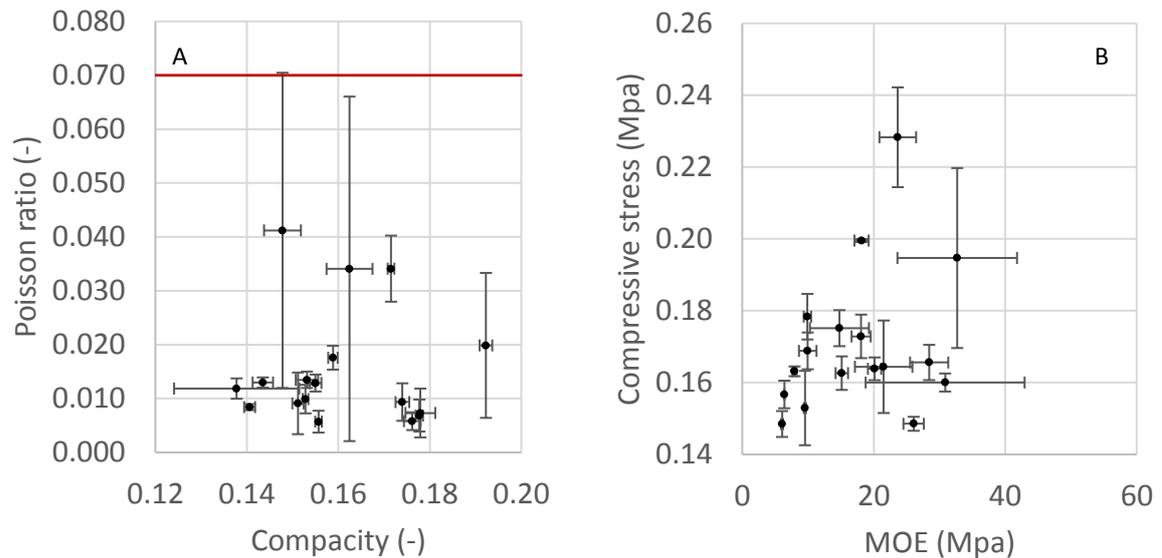


Figure 6-21: Résultats de comportement mécanique, toutes formulations confondues. A) Coefficient de poisson vs compacité ; B) limite D'élasticité vs module d'élasticité sécant.

La Figure 6-21B présente une confrontation entre la limite d'élasticité et le module d'élasticité. Là encore, les deux caractéristiques ne semblent pas ou peu liées. L'ensemble des résultats de performances mécaniques de chaque formulation est placé en annexe n°1.4. Le Tableau 6-1 présente les résultats de limite et module d'élasticité sécant conjointement avec des résultats de la littérature. Différents matériaux (terre-chanvre stabilisé ou non de Mazhoud [126], chaux-chanvre) et différentes mises en œuvre (banché de Cerezo [136], précompacté de Tronet [141] et projeté de Elfordy [138]) y sont reportés. Au final, les terre-chanvre réalisés dans cette étude se trouvent globalement dans les mêmes ordres de grandeur de performance mécanique que ce que l'on trouve dans la littérature. La limite d'élasticité reste basse dans le cas des mélanges terre-chanvre de l'étude. Mais, comme indiqué dans l'introduction de ce chapitre, une valeur plus élevée pour un matériau non-porteur n'est pas nécessaire. Enfin, le module d'élasticité paraît augmenter avec la masse volumique, c'est le cas des résultats de la littérature.

Ainsi, les résultats de la thèse montrent que la variabilité des constituants n'empêche pas d'obtenir un mélange terre-chanvre avec des performances mécaniques satisfaisantes.

Tableau 6-1: Résultats de limite et module d'élasticité sécant comparés à la littérature

Source	Matériaux	Limite d'élasticité		Module d'élastique		Coeff de Poisson		Masse volumique		Compacité moyenne		C/T		
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(-)	(-)	(kg.m-3)	(kg.m-3)	(-)	(-)	Min	Max	
Thèse		0.15	0.23	6.15	32.80	0.01	0.04	232	402	0.14	0.19	0.48	2.22	
Mazhoud	Terre chanvre	non stabilisé	0.43	1.40	2.39	50.84	-	-	373	613	-	-	0.4	0.75
Tronet		stabilisé ou non	1.72	5.53	42.00	162.40	0.05	0.12	-	-	0.38	0.56	0.4	1.9
Elfordy _ 2008	Chaux chanvre	précompacté	0.18	0.85	4.00	35.00	-	-	291	485	-	-	0.32	0.32
Cerezo _ 2005		projeté	0.32	0.94	33.00	94.00	-	-	348	510	-	-	1.73	2.59

6.4.3.3 FRACTION DE LIANT ET VARIABILITÉ DE LA TERRE

La Figure 6-22 présente les résultats de limite d'élasticité en fonction de la fraction volumique argileuse (soit le taux d'argile de la terre multiplié par la fraction volumique de terre dans la formulation). Comparé aux travaux de Tronet [141], nos matériaux ont une concentration en chanvre relativement faible. Considérant nos formulations et les résultats de limite d'élasticité, les points expérimentaux de notre étude se situeraient dans les pieds de courbes de la Figure 6-6. On considère alors que le liant régit le comportement mécanique. Ainsi, nous avons fait le choix d'utiliser le modèle suivant pour analyser les résultats :

$$\sigma_e = k(\Phi_{Argile})^a \quad \mathbf{6-3}$$

Avec k une variable d'ajustement du modèle correspondant à la résistance spécifique en compression du matériau contenu dans la fraction argileuse considérée, a la constante que l'on prend égale à 3 (comme dans le cas de la chaux). Afin d'étudier l'influence de la variabilité de la terre, et de s'affranchir de l'influence de la fraction de chanvre, seuls les points à $C/T=0.8$ sont pris en compte.

Premièrement, on constate que le modèle utilisé permet effectivement de décrire les résultats, en dissociant le comportement relatif aux différentes terres et en ayant un paramètre k correspondant à chacune de celles-ci. Seules les formulations utilisant la terre T4C1 présentent une évolution de comportement légèrement différente.

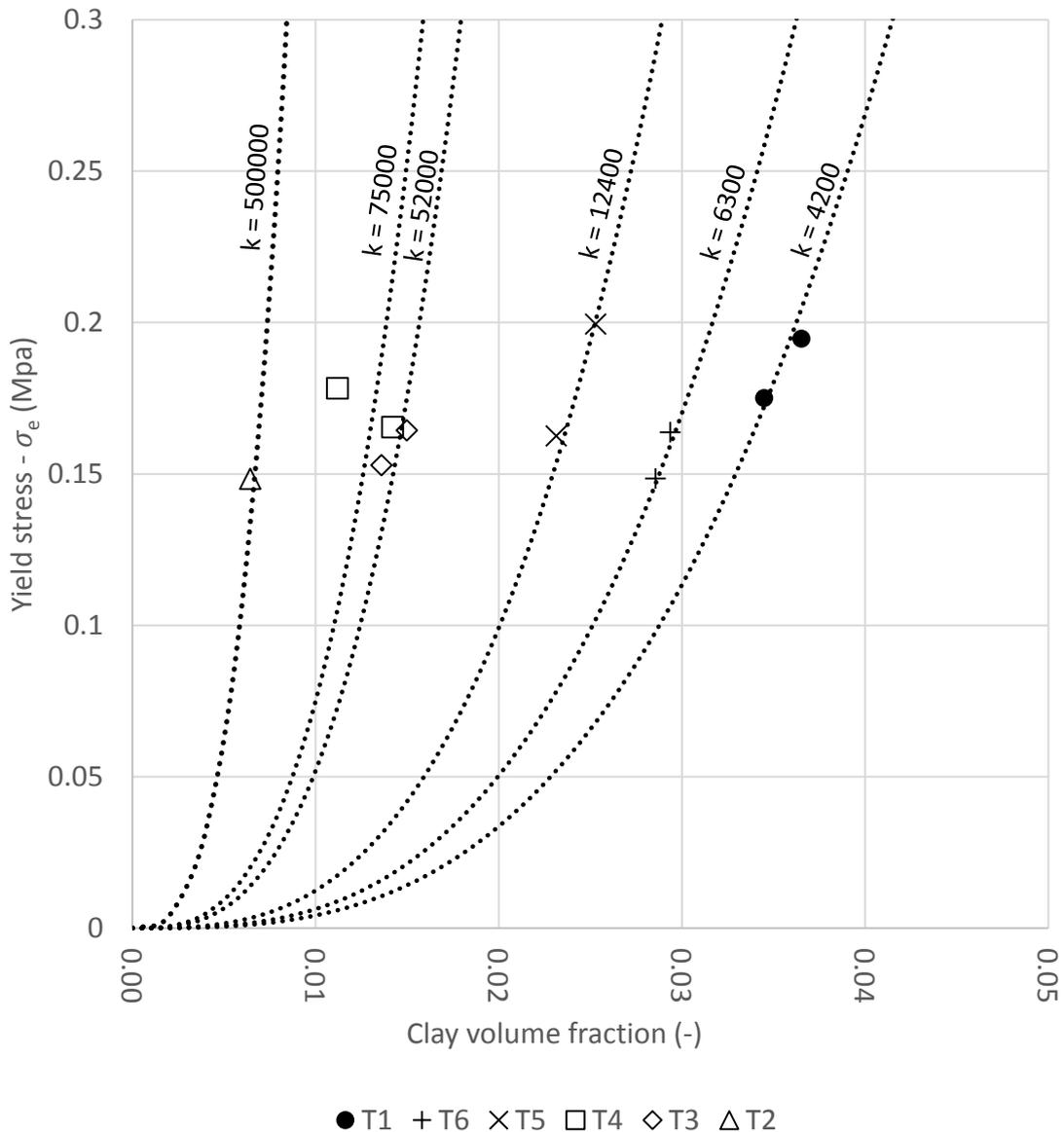


Figure 6-22: Relation entre limite d'élasticité et fraction volumique d'argile.

Plusieurs caractéristiques des terres pourraient être liées au paramètre k du modèle. Dans le cas d'une compression simple d'un matériau du génie civil, on considère souvent l'empilement granulaire comme paramètre majeur régissant la résistance mécanique [268]. La Figure 6-23 indique qu'il existe peut-être une corrélation entre la valeur du paramètre k et le diamètre de 60% des grains de la terre (D_{60}). Néanmoins, la terre forme seulement des « ponts » liant les particules de chènevette entre elles. La granulométrie ne peut pas être le seul paramètre régissant le comportement mécanique de ces ponts, puisque ces derniers peuvent être sollicités en traction ou en cisaillement (Figure 6-16).

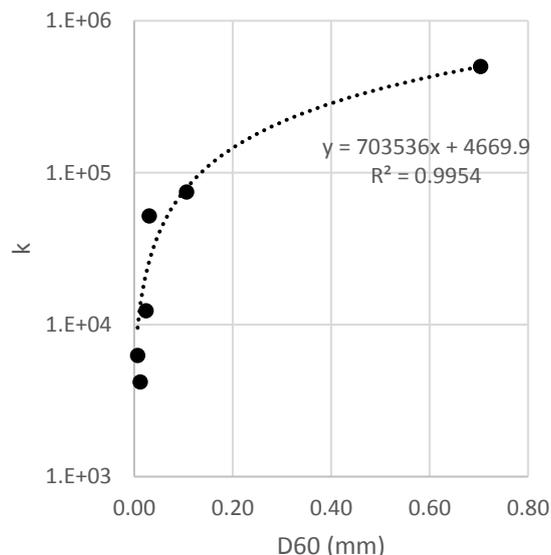


Figure 6-23: Analyse du paramètre k, en fonction de la granulométrie des terres.

Peu d'études existent sur l'impact de la variabilité de la terre sur le comportement mécanique des matériaux de construction en terre. Meimaroglou et Mouzakis [269] ont travaillé sur les enduits de terre. Ils indiquent clairement que la résistance en compression est liée au taux d'argile. Pour le pisé, Ciancio, Jaquin, et Walker [270] montrent que la granulométrie n'est pas le seul paramètre à considérer pour prédire la résistance mécanique mais que l'influence de l'un sur l'autre est importante.

Ainsi, cette corrélation n'étant pas absolue, d'autres paramètres doivent entrer en jeu. La CEC par exemple, n'apparaît pas comme un paramètre d'influence de 1^{er} ordre. Mais son influence reste non négligeable sur le module et la limite d'élasticité. En effet, si le taux d'argile et la granulométrie moyenne sont les paramètres d'influence d'ordre 1, la CEC ou l'activité argileuse (A_{CEC}) peuvent être des paramètres d'influence de second ordre. La CEC décrivant l'argilosité de la terre (voir Chapitre 1), il paraît intuitif qu'elle affecte le comportement mécanique de notre composite. Cette corrélation est notamment démontrée dans le cas des mortiers de terre [269].

Dans l'ensemble, une tendance de l'impact du taux d'argile et de la granulométrie sur le comportement mécanique se dessine. Mais plus de points expérimentaux sont nécessaires pour évaluer et comprendre correctement l'impact de chaque caractéristique sur le comportement mécanique global du terre chanvre.

6.4.3.4 TENEUR EN EAU DE LA BARBOTINE

Les résultats de limite et de module d'élasticité sécant en fonction de la teneur en eau de la barbotine sont présentés en Figure 6-24. Premièrement, la limite d'élasticité (Figure 6-24A) varie très peu en fonction de la terre utilisée, ainsi que de la teneur en eau de la barbotine correspondante. L'ensemble varie seulement entre 0.15 et 0.20 MPa. Seules deux formulations (T6C1 et T5C1) présentent une variabilité significative (en dehors des écarts types) fonction de la teneur en eau de la barbotine. À teneur en eau équivalente, ces deux formulations ont la même limite d'élasticité. A seuil de cisaillement de barbotine équivalent, le limite d'élasticité se trouve impactée différemment selon la terre.

En revanche, l'impact de la teneur en eau de la barbotine sur le module d'élasticité est significatif. À teneur en eau équivalente, on retrouve l'impact du taux d'argile de la terre utilisée (voir Chapitre 1) décrit dans le paragraphe précédent. A seuil de cisaillement de barbotine équivalent, une tendance d'équivalence entre seuil de cisaillement de la barbotine et module d'élasticité se dessine, mais la variabilité des résultats reste importante. Le Chapitre 4 a démontré un lien important entre taux d'argile et seuil de cisaillement de la terre,

dépendant aussi d'autres facteurs. Ce lien est retrouvé ici encore, entre taux d'argile et module d'élasticité. Ici, la variabilité des résultats peut être due aux différents facteurs évoqués en Chapitre 1 et Chapitre 2, tels que les difficultés à estimer le seuil de cisaillement, et les autres facteurs que le taux d'argile influençant ce même seuil de cisaillement de la barbotine.

6.4.3.5 VARIABILITÉ DU CHANVRE

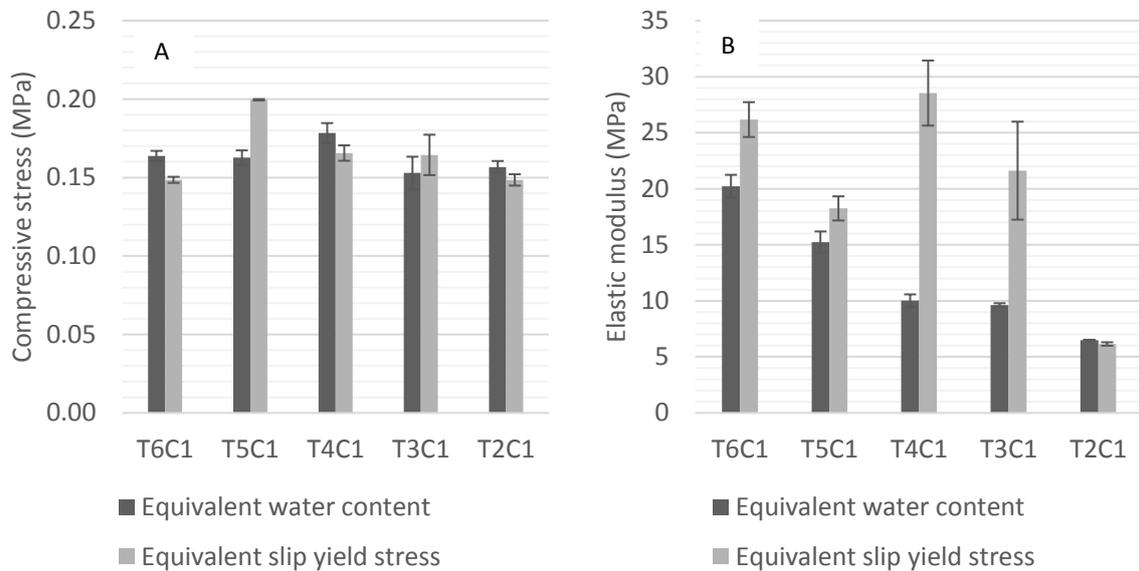


Figure 6-24: Effet de la teneur en eau de la barbotine sur la limite d'élasticité du composite terre-chanvre (A) et sur son module d'élasticité sécant (B).

La Figure 6-25 présente les courbes contrainte/déformation de trois formulations contenant les trois types de chènevottes. Est notamment remarquable le caractère ductile avec rupture de la formulation T1C3. Les deux autres formulations présentent un comportement sans rupture, avec densification.

Ces différences de comportement mécanique global ont aussi été observées par Niyigena et al. [271] dans une étude sur 13 chènevottes et 9 mélanges chaux-chanvre. L'auteur met en évidence trois comportements types classés par leur niveau de performances mécaniques (résistance mécanique et module d'élasticité : 1) faibles, 2) moyennes et 3) grandes. Entre le groupe 1 et le groupe 3, un facteur 10 sépare ces performances. Et ces comportements sont corrélés à trois groupes types de chènevottes correspondants : 1) Masse volumique et absorption d'eau élevées, granulométrie fine et surface spécifique importante ; 2) Masse volumique et absorption d'eau moyenne à élevée, granulométrie et surface spécifique moyenne ; 3) Masse volumique et absorption d'eau faible à moyenne, granulométrie grossière et surface spécifique faible. Ainsi, selon l'auteur, plus la surface spécifique est grande, plus l'interface liant/granulat est mécaniquement faible et donc moins l'échantillon sera performant.

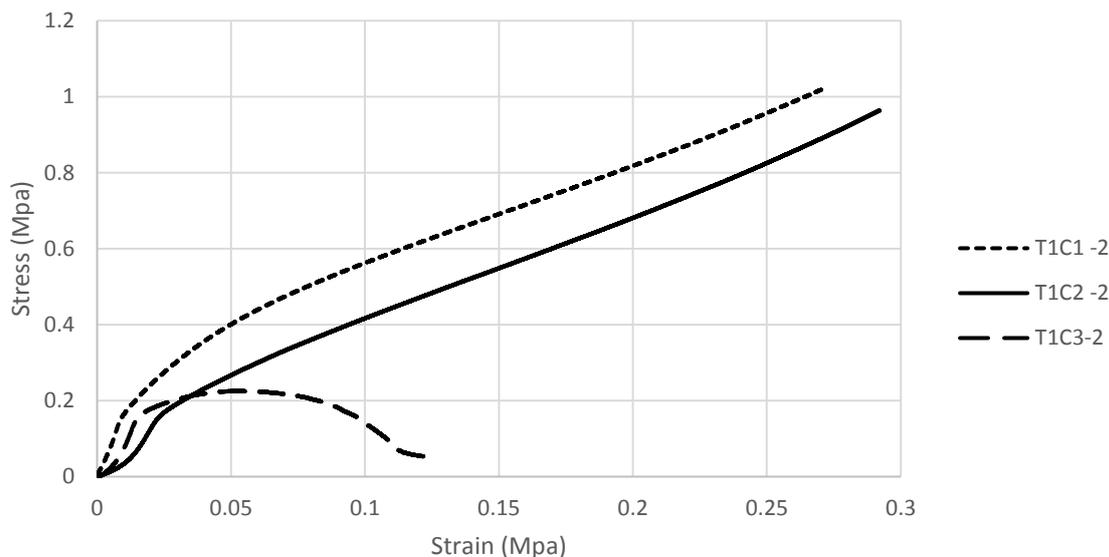


Figure 6-25: Influence du type de chènevotte sur le comportement mécanique global.

La Figure 6-26 présente les résultats de propriétés mécaniques en fonction des longueurs et largeurs médianes, notées D50. Seuls les résultats des formulations T1C1, T1C2 et T1C3 sont affichés. Sur la Figure 6-26A, on note qu'une des formulations (T1C1) présente un écart type important de limite d'élasticité. Aucune tendance claire ne se dégage concernant la limite d'élasticité. Sur la Figure 6-26B, le module d'élasticité paraît décroître en fonction de la longueur des chènevottes, mais nous manquons de données pour confirmer cette tendance.

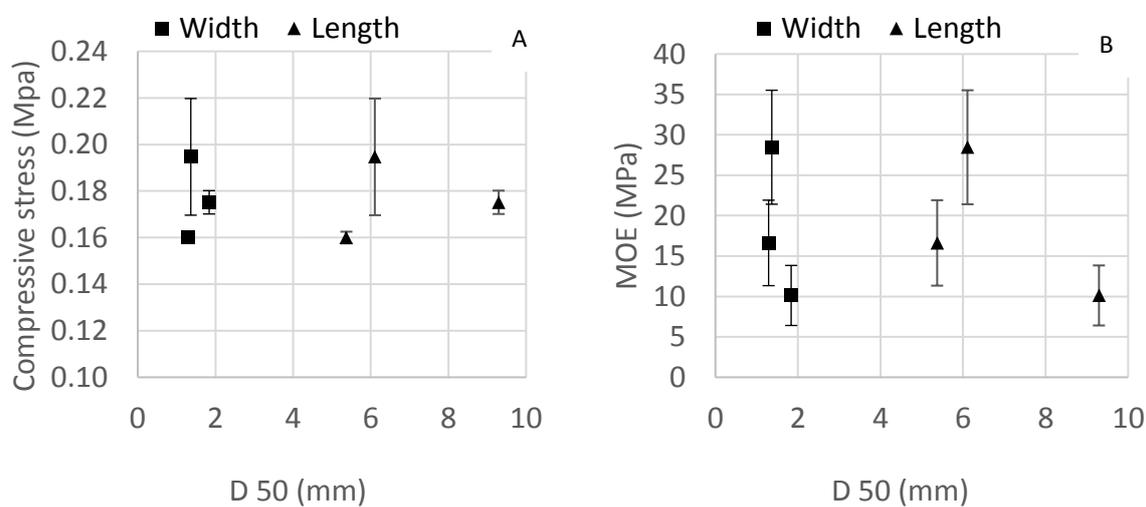


Figure 6-26: Influence de la granulométrie des chènevottes sur les propriétés mécaniques : A) limite d'élasticité ; B) Module d'élasticité sécant.

Peu de points expérimentaux sont disponibles ici et plus d'essais sont nécessaires pour augmenter les plages de performances mécaniques et de tailles de granulats et ainsi confirmer les observations faites. La littérature sur les mélanges chaux-chanvre indique une influence forte de la granulométrie des chènevottes sur les performances mécaniques. À court terme (temps de séchage inférieur ou égale à 28 jours), les performances mécaniques augmentent avec la taille des granulats [15, 19, 28, 33]. Pour certains auteurs, à long terme (temps de séchage supérieur ou égale à 90 jours) la tendance s'inverse et les performances mécaniques sont d'autant plus grandes que la taille des granulats est petite. Ces phénomènes, selon les auteurs, sont liés aux diverses

réactions chimiques ayant lieu (prise de la chaux, réaction aux interfaces chaux/chanvre). Les mélanges de terre-chaivre ne présentent pas de prise chimique. Toutefois, l'hypothèse décrite par ces mêmes auteurs est que la résistance mécanique au long terme est liée à l'enrobage des particules de chanvre par le liant. Pour une même quantité de liant, un granulats de grande taille, et donc de petite surface spécifique, sera moins bien enrobé, qu'un granulats de petite taille (grande surface spécifique). Un meilleur enrobage augmente les points de contacts granulaires, augmentant la transmission des efforts, et augmente ainsi les performances mécaniques. Mais cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée [271], et dans certains cas les performances mécaniques restent élevées pour les plus grandes granulométries.

Il y a, à ce jour, consensus sur l'influence importante de la granulométrie, mais la littérature confirme que ce ne peut être le seul paramètre permettant de prédire la performance d'un composite à base de chanvre [271]. Plus d'essais sont nécessaires afin de déterminer qui du taux d'enrobage ou de la performance de l'interaction liant/grulats est le paramètre déterminant. L'utilisation de la terre en tant que liant peu notamment répondre à cette question en évitant d'inclure le paramètre de réaction chimique aux interfaces liant/grulats. Cela permettrait d'étudier finement l'enrobage et l'hypothèse selon laquelle les points de contact au sein du liant et entre liant et granulats sont importants. Ils favorisent la reprise des efforts par la matrice granulaire. Il est ainsi probable que la rupture ou non de l'échantillon dépende de la répartition des efforts dans le composite. Si ces efforts sont majoritairement repris par les granulats végétaux, ceux-ci sont compactés et l'on observe une densification. Si ces efforts sont majoritairement repris par la matrice minérale, celle-ci à une réponse fragile aux contraintes et finit par céder.

6.4.4 CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT ANISOTROPE DES BLOCS DE TERRE ALLÉGÉE

La Figure 6-28 représente l'influence de la direction de sollicitation sur le comportement des cubes à la compression. Deux courbes types (formulation T1C1) y sont présentées. Elles sont caractéristiques de l'orthotropie du matériau, et les mêmes types de courbes sont aussi observés dans le cas du chaux-chaivre [12, 28, 34, 35]. William et al. [144] ainsi que Sinka et al. [272] mettent en évidence le même phénomène généralement observé ici : une limite d'élasticité plus haute en sollicitation perpendiculaire mais un module d'élasticité plus faible. Tronet [141] présente en partie l'origine de cette orthotropie généralement observée. Lorsque les chènevottes sont déversées en vrac, elles tendent à se déposer sur leur surface la plus large, et la compaction lors de la fabrication augmente l'anisotropie. Cette dernière est ainsi directement liée à la compacité du matériau, mais aussi à la formulation du composite.

Sur la courbe de compression selon la direction parallèle, deux manières de mesurer la limite d'élasticité sont présentées (Figure 6-28). Cette courbe présentant un maximum, on appelle limite d'élasticité maximale (σ_{e_MAX}) la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai. La limite d'élasticité utilisée précédemment, correspondant au point de courbe à l'intersection des tangentes des phases pseudo-élastique (phase 1) et plastique (phase 2), est appelée $\sigma_{e_intersection}$. Ici, la deuxième tangente n'est pas évidente à placer, nous avons choisi de l'établir entre deux points arbitraires de déformation.

La Figure 6-27 présente la comparaison des méthodes de mesures de la limite d'élasticité pour 8 formulations. Il apparaît alors que la différence entre contrainte maximale et intersection des deux tangentes est faible. Souvent, cette différence est du même ordre de grandeur que l'écart type dû à la dispersion des résultats d'une même formulation. La limite d'élasticité à l'intersection des deux tangentes est utilisée ensuite pour l'analyse des résultats.

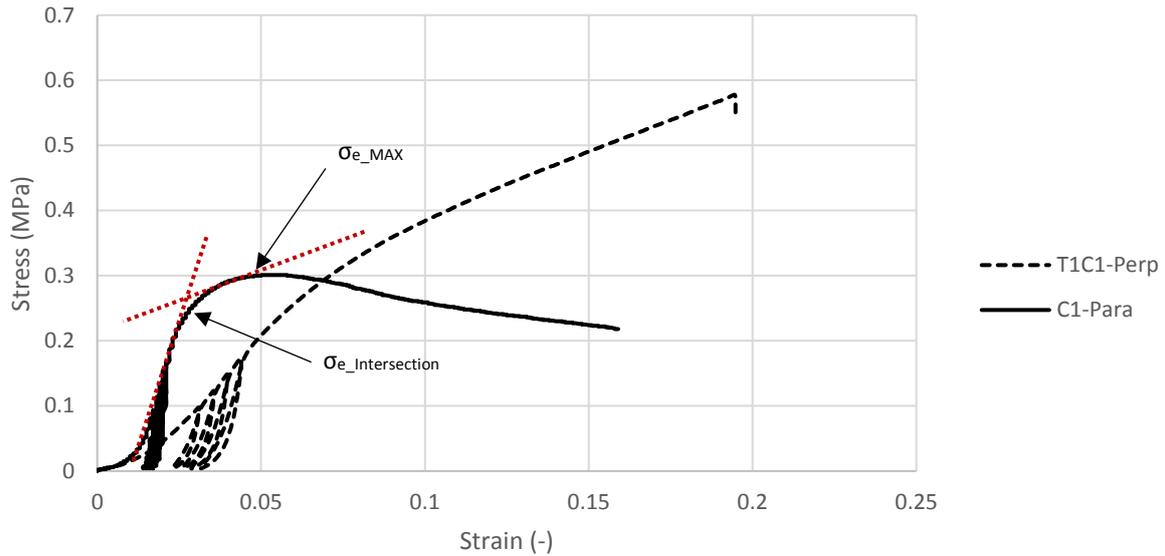


Figure 6-28: Courbes types de compression de cubes de terre chanvre selon deux directions. Définitions des différentes limites d'élasticité mesurées.

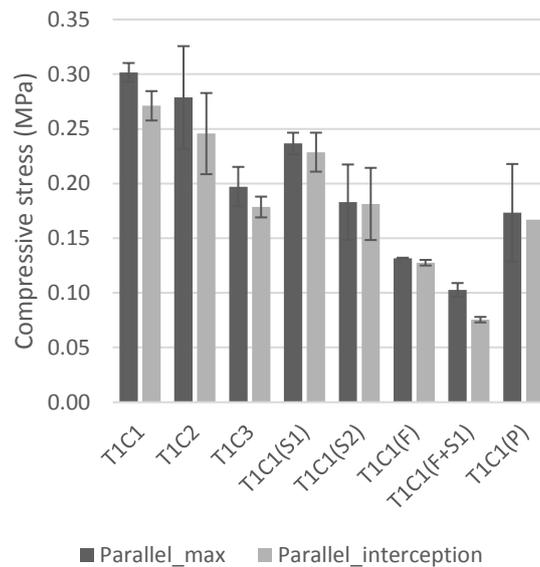


Figure 6-27: Comparaison entre limite d'élasticité maximale et limite d'élasticité à l'intersection.

La Figure 6-29 présente les résultats de caractérisation mécanique des échantillons cubiques selon deux directions différentes de compression. Sept formulations ont pu être testées : T1C1, T1C2, T1C3, T1C1(S1), T1C1(S2), T1C1(F), T1C1(F+S1) et T1C1(P). Sur l'ensemble de ces formulations, des différences notables sont enregistrées en fonction du sens de compression.

Concernant la limite d'élasticité (Figure 6-29-A), deux formulations (T1C1 et T1C1(S2)) présentent une différence faible entre compression perpendiculaire ou parallèle aux couches de matériau. T1C2 présente une limite d'élasticité supérieure lorsque le matériau est comprimé dans le sens parallèle aux couches. Les autres formulations (T1C3, T1C1(S1), T1C1(F) et T1C1(F+S1)) ont une limite d'élasticité plus faible en parallèle qu'en perpendiculaire.

Concernant les modules d'élasticité (module tangent, déformation entre plateaux), l'ensemble des formulations présente un module plus fort en parallèle qu'en perpendiculaire. Ce phénomène correspond aux résultats observés dans la littérature [142]. En effet, lorsque le sens de compression est parallèle au sens des couches de matériaux et donc à l'orientation des chènevottes, ces dernières sont très peu sollicitées. On caractérise alors plus directement le lien interfaciale granulats/liant.

Pour finir, le degré d'anisotropie (ici quantifiée en calculant le rapport entre les valeurs en compression parallèle et celles en compression perpendiculaire) du comportement mécanique est présenté en Figure 6-30, selon le rapport entre masse volumique de chènevotte dans l'échantillon (C) et masse volumique vrac des chènevottes (définie au chapitre 2). Ce rapport définit si l'arrangement des particules est plutôt aléatoire (rapport < 1) ou avec une orientation préférentielle lorsque ces particules sont fortement compactées (rapport > 1). Il apparaît que plus les chènevottes sont compactées, plus on favorise le caractère anisotrope du module d'élasticité (avec un maximum atteint aux alentours de $C/\text{shiv bulk density} = 0.9$). Aussi, les points expérimentaux montrent qu'il serait théoriquement possible d'atteindre une isotropie pour un rapport $C/\text{shiv bulk density} < 0.5$.

Le degré d'anisotropie des limites d'élasticité n'est pas présenté ici, puisque les résultats ne présentent pas de corrélation particulière avec les paramètres des formulations. Des paramètres de formulation plus variables (masse volumique, C/T) permettraient de mieux observer ces phénomènes d'anisotropie.

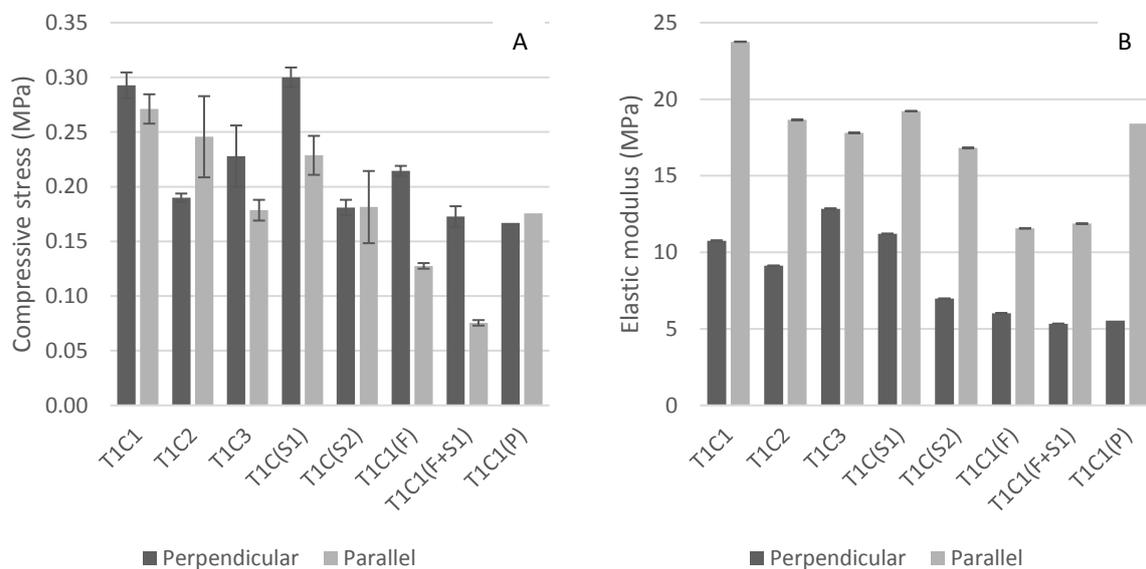


Figure 6-29: Résultats des essais de compression sur cube selon leur orientation.

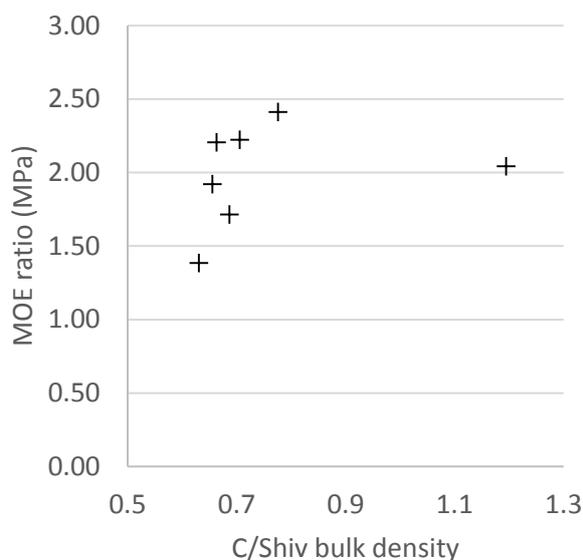


Figure 6-30: Degré d'anisotropie du module d'élasticité sécant selon le rapport entre masse volumique de chènevotte dans l'échantillon et masse volumique apparente des chènevottes.

6.5 CONCLUSION

La littérature sur la caractérisation mécanique de bétons contenant des granulats bio-sourcés ne présente pas de manière consensuelle de choix de méthode de mesure et de calcul des paramètres caractéristiques. Plusieurs questions sont soulevées dans cette étude, dans un souhait de clarifier les choix de méthode de caractérisation mécanique.

Deux échelles d'observations de la déformation sont utilisées : la hauteur complète de l'échantillon ou sa partie centrale (tiers central pour les cylindres et demi hauteur pour les cubes). Chaque échelle donne des résultats de modules d'élasticité différents et ce pour chaque géométrie. La mesure localisée donne toujours une déformation moindre, amenant un module d'élasticité sécant supérieur. Le choix dépend donc de ce que l'on souhaite représenter. Une mesure moyennée sur l'ensemble de l'échantillon sera plus représentative du comportement d'une paroi ayant une géométrie similaire. Ici, il serait donc conseillé d'utiliser un cylindre complet, de façon à être représentatif du comportement en compression simple d'une paroi classique (échantillon élancé et hétérogène). Une mesure localisée sera représentative du comportement intrinsèque du matériau, sans les défauts et hétérogénéités d'une paroi. Cette méthode est conseillée lorsqu'il s'agit de caractériser simplement le matériau, la formulation, et de le comparer à la littérature.

Ensuite, plusieurs types de modules ont été mesurés : Sécant, tangent et apparent. De la même façon, le choix doit correspondre à ce que l'on souhaite caractériser. Le module sécant, mesuré en chargement dans un cycle, est représentatif de la réponse aux sollicitations dynamiques ou ponctuelles du matériau.

La géométrie de l'échantillon influence grandement le résultat. En choisissant les mesures de déformation localisée au centre des échantillons, le module d'élasticité donne des résultats 1.5 fois supérieurs pour les cylindres par rapport aux cubes. L'inverse se produit sur les limites d'élasticité. Les cubes présentent une limite en moyenne 1.2 fois supérieures aux cylindres, avec un écart type relativement important (0.18). Considérant ces premiers éléments, le comportement mécanique global du terre chanvre est semblable à celui des mélanges chaux- chanvre. Les phases d'écrouissage, de densification ou de rupture dépendent ensuite de la formulation du matériau et peuvent même varier pour une même formulation. Les défauts dus à la mise en œuvre peuvent donc en être à l'origine.

Différents paramètres d'influence sur ce comportement ont été étudiés. Un retrait relativement significatif (entre 0 et 3.6%), dépendant des matériaux constitutifs a été observé. Ce retrait serait bien moindre dans le cas d'une mise en œuvre sur chantier, lorsque des éléments des systèmes constructifs peuvent le limiter (paroi à doubler, éléments de structure bois). L'observation au MEB des interfaces liant/chènevottes permet de constater que ce retrait est global et n'entraîne pas de zone de décohésion entre les deux composants. Aussi, étant donné que le liant sèche et ne prend pas de manière chimique, il semble qu'il n'y ait pas de zone de transition entre liant et chènevotte comme observé avec la chaux. En revanche, la composition du liant influence grandement les résultats. Selon les analyses réalisées dans cette étude, la granulométrie et notamment la teneur en argile sont des paramètres d'influence de premier ordre. Cependant, les mélanges étudiés couvrent une plage de masse volumique de 250 à 400kg/m³. Cette plage n'est pas suffisante pour modéliser correctement le comportement mécanique en fonction des fractions volumiques des composants. Parmi ces composants, la chènevotte observe aussi une grande variabilité. Et il apparaît que la granulométrie variable influence aussi grandement le comportement mécanique du composite. Mais la nature même de cette influence nécessite de plus amples recherches pour être comprise.

De manière général, les résultats de module d'élasticité et leur dispersion sont de même ordre de grandeur que pour le chaux-chanvre, malgré la variabilité des terres et des chanvres. Les limites d'élasticité des terres-chanvres se trouvent dans la limite basse de celles observées pour le chaux-chanvre. Ainsi, la grande majorité des formulations présente des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, au regard de l'application souhaitée. Le matériau doit supporter son propre poids et être éventuellement support d'enduit. Les résultats de l'étude montrent qu'il est simple de s'affranchir des variabilités des constituants pour répondre à ces critères. Un simple contrôle de la barbotine (de sa teneur en eau et de sa teneur en argile) pourrait permettre d'assurer les performances mécaniques du mélange terre-chanvre mis en œuvre.

7 CONCLUSION

7.1 RÉSUMÉ ET PRINCIPALES CONTRIBUTIONS

La présente thèse constitue une contribution à la caractérisation de la terre allégée, et particulièrement du terre-chanvre, et de ses performances en tant qu'isolant. Les caractéristiques mécaniques et hygrothermique ont été évaluées, ainsi que le comportement rhéologique des barbotines servant à la fabrication d'un terre-chanvre.

Premièrement, les échantillons de matières premières utilisées dans cette étude ont fait l'objet d'une caractérisation attentionnée. Pour la terre, une stratégie de collecte de matériaux a permis de couvrir une importante zone géographique sur les régions de Normandie et Bretagne. Cette stratégie a permis de collecter 28 terres, dont les caractéristiques géotechniques ont été comparées à la variabilité naturelle des terres de Bretagne grâce aux bases de données d'une étude de la littérature. Une méthode simple de visualisation du comportement cohésif de l'ensemble des terres collectées a été développée, appelée matrice de consistance. En faisant varier leur teneur en eau, elle permet de classer les terres selon des degrés d'attachement des grains entre eux. Parmi ces 28 terres, 6 ont été choisies pour représenter l'ensemble, et par la suite fabriquer des échantillons de terre-chanvre. Elles se caractérisent notamment par une granulométrie très variable (taux d'argile de 10 à 50%, taux de sable de 3 à 83%), et une CEC allant de 4 à 22 $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$. De plus, des essais de DRX ont permis de qualifier et quantifier les espèces minéralogiques des argiles contenues dans ces terres. Ces essais ont pu notamment montrer que la granulométrie ne permet pas toujours de retrouver le bon taux d'argile lorsque d'importantes quantités de granulats de quartz atteignent des tailles comparables aux argiles, ou que ces derniers sont difficiles à défloculer. Pour le chanvre, trois chènevottes provenant de deux cultures et trois méthodes de productions différentes ont été utilisées pour la fabrication des échantillons. Comparés aux données des chènevottes du projet CHANVRISOL, leur caractérisation a permis de montrer qu'ils couvrent une plage de variabilité de granulométrie importante.

Deuxièmement, à travers la variabilité des matériaux constitutifs s'est posée la question de la qualité des différentes mesures et essais réalisés dans cette thèse : Quels matériels, quelles méthodes d'essais et comment traiter les données pour obtenir des résultats représentatifs de matériaux tels que la terre de construction, le chanvre et le terre-chanvre. Dans le premier chapitre, une discussion sur les méthodes d'essais adaptées pour la caractérisation de matériaux terres pour la construction a été menée. Parmi les différents essais de caractérisation abordés, nous retenons les suivants, avec quelques particularités :

- Granulométrie : Tamisage puis essais à la pipette pour le passant à $80\mu\text{m}$. Attention, la fraction argileuse déterminée par cette méthode ne détermine pas la quantité exacte d'argile mais seulement une taille de granulat ;
- Caractérisation des argiles : La méthode CEC permet de caractériser correctement l'argilosité. Attention, il n'y a pas d'équivalence parfaite avec les valeurs de VBS. Les essais de DRX, d'ICP et d'ATG permettent d'avoir une vision très précise du contenu minéralogique des terres, ce qui est une information complémentaire de la CEC et la granulométrie, mais nécessite un investissement important ;
- Masse volumique particulière : La méthode au pycnomètre à eau est adaptée à la caractérisation de barbotines ;
- Consistance : il serait utile pour les laboratoires de transiter vers l'utilisation du cône de pénétration, dont les valeurs sont répétables et reproductibles.

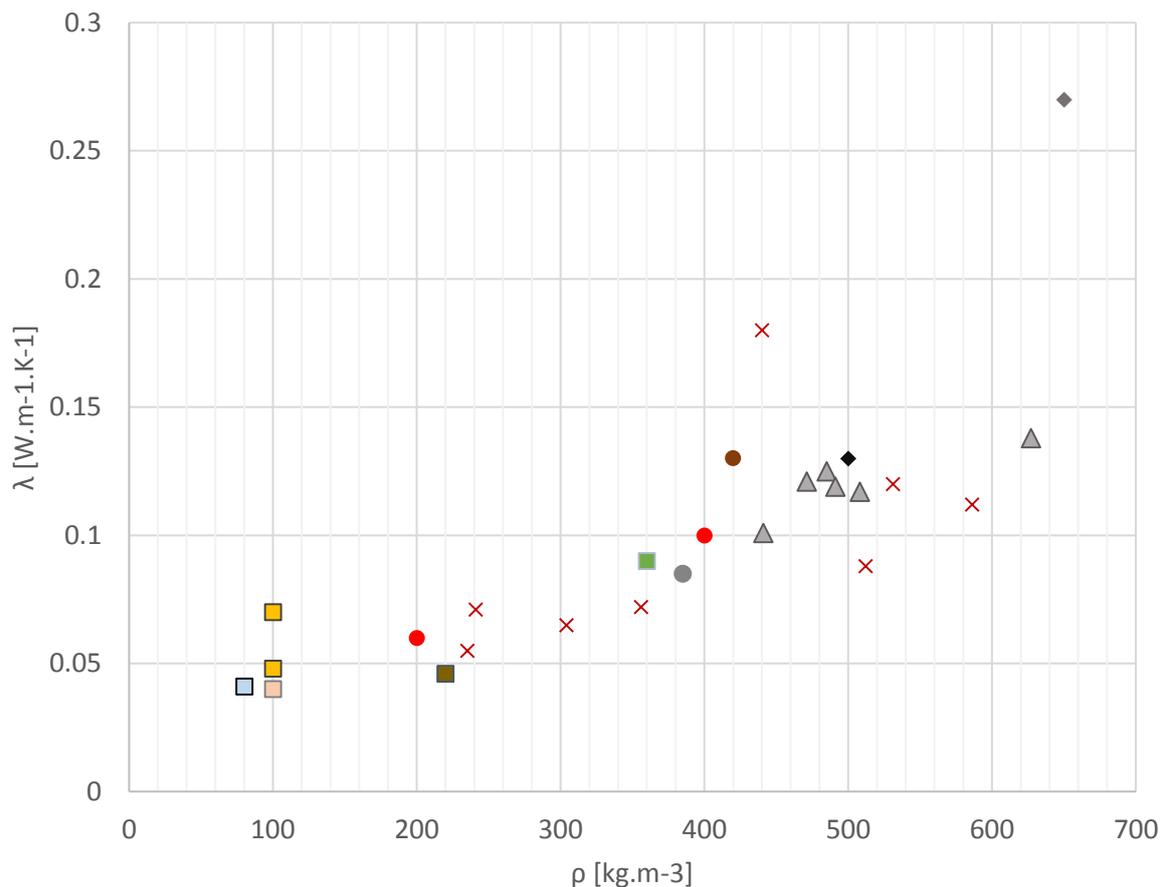
Concernant la caractérisation du chanvre, seule l'analyse des résultats de caractérisation biochimique pose encore question. Les résultats obtenus dans cette thèse sont cohérents au regard de la littérature, mais peu de variabilité a été observée.

Cette question du choix du type d'essais et de l'exploitation de ses résultats s'est aussi posée pour la caractérisation du comportement rhéologique des barbotines, mais aussi pour la caractérisation des performances hygrothermiques et mécaniques des mélanges terre-chanvre.

Le chapitre de rhéologie présente d'une part des essais de laboratoire au rhéomètre permettant d'évaluer l'influence de la variabilité des terres sur leur comportement en barbotine. D'autres part 5 tests, dont deux développés dans cette thèse, sont comparés aux mesures au rhéomètre : test d'étalement, test d'immersion, cône à paroi rugueuse, cône de Marsh et coupes de viscosité. Au final, les essais au cône de Marsh et aux coupes de viscosité ne sont pas adaptés à la plage de seuil de cisaillement des barbotines. Mais les essais d'étalement, d'immersion et de cône à paroi rugueuse ($\beta=60^\circ$ -avec extension) donne des résultats cohérents sur des plages (respectivement) de 0 à 50 Pa, 0 à 100 Pa et 3 à 200 Pa. Pour ces trois tests, un écart type maximal de 50 % a été observé, et tous ces tests sont faciles à transférer sur le terrain. Dans ce cadre, un essai permettant d'estimer rapidement la teneur en eau d'une barbotine a aussi été développé. Ainsi, ces approches quantitatives mènent à la possibilité d'évaluer la quantité d'eau à ajouter ou à enlever pour atteindre un seuil de cisaillement, correspondant à une cohésion ciblée d'une barbotine.

En caractérisation hygrothermique, une attention particulière a aussi été accordée aux protocoles et aux méthodes afin de comparer l'influence de la variabilité des matériaux constitutifs. Parmi les paramètres évalués, les conditions de séchage des échantillons sont les plus influentes sur les résultats. Ces conditions influent fortement sur la teneur en eau à laquelle est testée l'échantillon, ce qui est un paramètre essentiel dans la caractérisation de matériaux bio-sourcés. Or, la littérature ne fait pas consensus sur ces conditions. Cependant, aucune conclusion ne peut être tirée quant à la meilleure méthode.

Ensuite, les résultats de propriétés de stockage thermique et hydrique montrent que, avec les formulations testées, l'influence de la variabilité du matériau est de 3.5% pour la capacité calorifique et de 16% pour la sorption à 80%HR. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesure. Mais ces essais ont aussi permis de valider l'utilisation de lois de mélange pour l'évaluation de ces caractéristiques, ce qui permettrait d'accélérer les prochaines caractérisations. Concernant les propriétés de transfert, la Figure 7-1 retrace les minimums et maximums de masses volumiques et conductivité thermiques des matériaux de cette thèse, et les compare avec des matériaux de fonction et/ou de masses volumiques proches. Les valeurs de terre-chanvre, chaux-chanvre et terre allégée ont été présentées dans le Chapitre 5 : Caractérisation hygrothermique de composite terre-chanvre, les valeurs des autres matériaux proviennent de [109]. Le terre-chanvre réalisé dans cette étude prend une place d'isolant au même titre que les autres matériaux évoqués, et présente ainsi une alternative directe. La Figure 7-2 présente de la même façon une comparaison des résultats de facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau avec la littérature. Ici aussi, le terre-chanvre est aussi performant que les autres matériaux. Notons ici que sa perméabilité fait de lui un matériau perspirant, adapté aux systèmes constructifs dans lesquels les parois participent à la régulation de l'hygrométrie intérieure. Enfin, le coefficient d'absorption capillaire varie entre 0.027 et 0.135 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0.5}$. Ces valeurs indiquent d'une part que le matériau est fortement absorbeur ($>2 \text{ kg m}^{-2}\cdot\text{h}^{-0.5}$ selon [273]), et peut ainsi s'endommager au contact d'une quantité d'eau importante. Mais cela montre aussi que le matériau est particulièrement adapté à la rénovation de bâti vernaculaire.



- Présente étude
- Terre chanvre littérature
- × Terre allégée littérature
- ▲ Chaux chanvre littérature
- Panneau ouate de cellulose
- Bottes de paille
- Laine de bois semi-rigide
- Laine de bois haute densité
- Panneaux de liège expansé
- ◆ Béton cellulaire
- ◆ Briques alvéolées

Figure 7-1: Comparaison des résultats (min et max) de conductivité thermique avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.

Les méthodes de caractérisation mécanique du terre-chanvre ont aussi fait l'objet d'une attention particulière, notamment parce que la littérature sur ces types de matériaux ne présente pas de manière consensuelle de méthode. Dans le dernier chapitre de cette thèse, plusieurs paramètres d'étude du comportement mécanique en compression simple ont été testés :

- L'échelle d'observation de la déformation : pour une caractérisation « matériaux », il est suggéré d'utiliser une méthode permettant de localiser la mesure dans le centre de l'échantillon, notamment pour l'évaluation du module d'élasticité ;
- Le type de module mesuré (apparent, sécant, tangent) : le module sécant, mesuré en chargement dans un cycle, est représentatif de la réponse aux sollicitations fréquentes du matériau.
- La géométrie de l'échantillon (cubes ou cylindres) : Elle influence grandement le résultat, avec des modules d'élasticité des cylindres environ deux fois supérieurs à ceux des cubes, mais une limite d'élasticité en moyenne 1.2 fois inférieure.

Les comportements mécaniques observés sont semblables à ceux des mélanges chaux-chanvre de la littérature. Les phases d'écrouissage, de densification ou de rupture dépendent de la formation du matériau et peuvent même varier pour une même formulation. Les courbes présentant rarement un maximum, et ce dernier ne représentant pas une limite d'élasticité, une méthode d'évaluation de cette limite, déjà présente dans la littérature, a été utilisée.

La Figure 7-3 présente une comparaison des résultats de comportement mécanique évalué sur cylindre, entre les matériaux de la thèse, la terre allégée et le chaux-chanvre présents dans la littérature. Les données utilisées ont été présentées dans le Chapitre 6 et sont choisies parce que les méthodes d'essais sont présentées et comparables. Ici, les mélanges terre-chanvre de l'étude présentent presque tous des résultats satisfaisants : le matériau doit supporter son propre poids et être support d'enduit. Les résultats de la thèse montrent qu'il est simple de s'affranchir des variabilités des constituants pour répondre à ces critères.

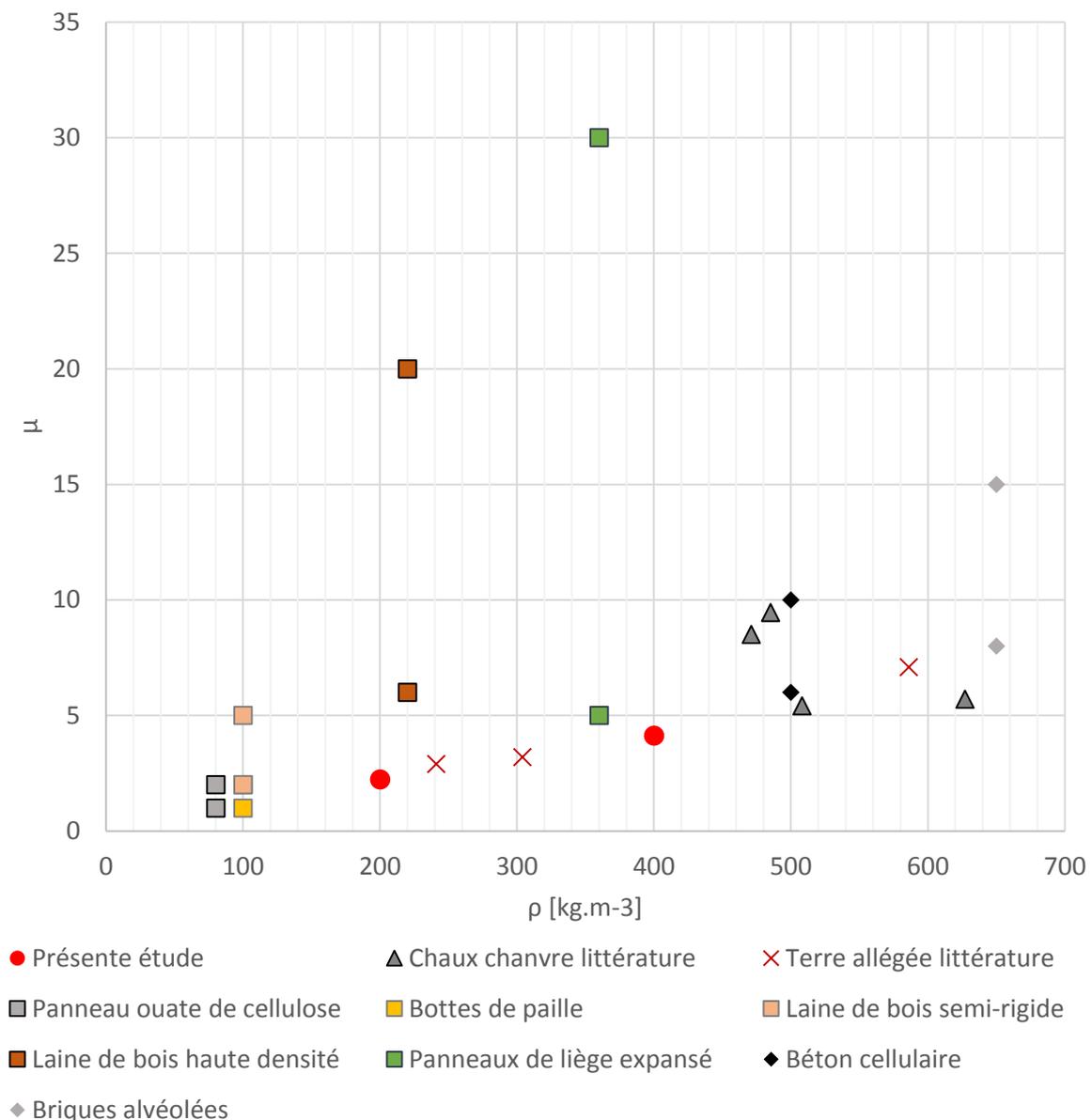


Figure 7-2: Comparaison des résultats (min et max) de facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.

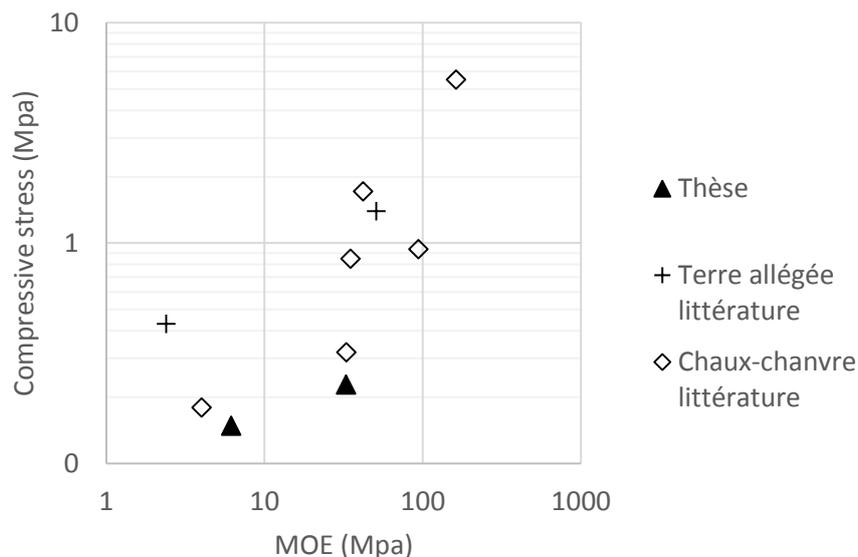


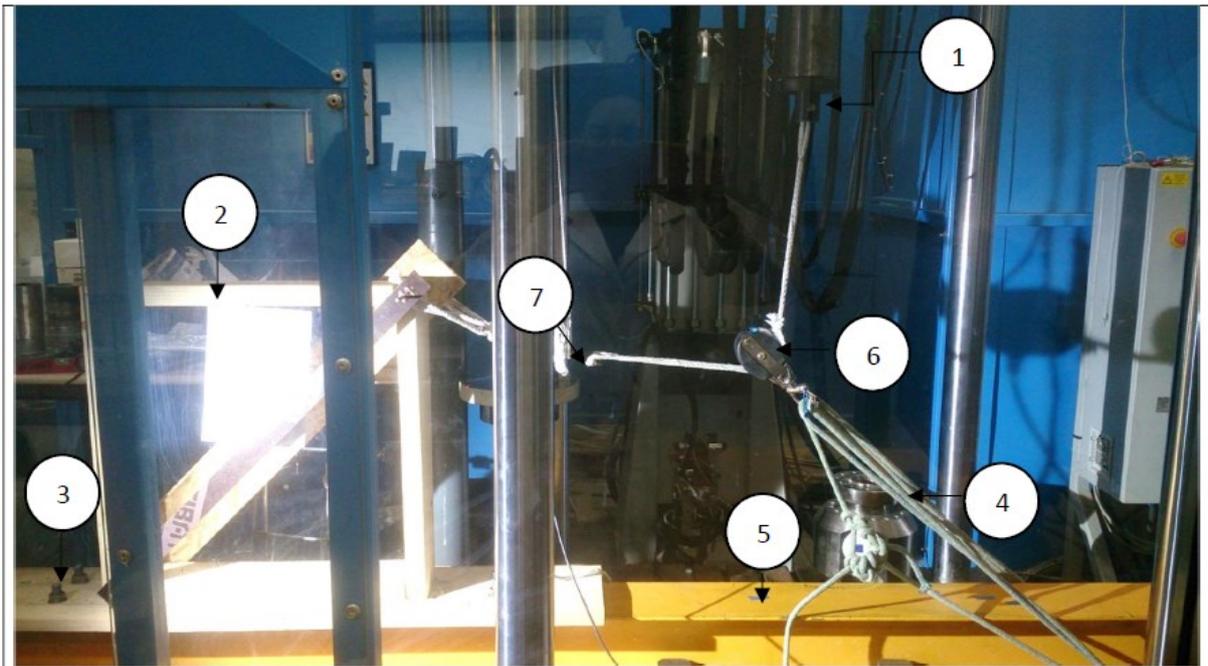
Figure 7-3: Comparaison des résultats (min et max) de comportement mécanique avec la littérature pour des matériaux de fonction et gamme de masse volumique proches.

7.2 PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET TRAVAUX PROSPECTIFS

Premièrement, des essais de laboratoire au rhéomètre nous ont permis de quantifier le seuil de cisaillement de barbotines réalisées avec six différentes terres. Un travail de modélisation de ce comportement rhéologique a été entamé et a permis de démontrer que le seuil de cisaillement d'une barbotine dépend fortement de la fraction volumique solide (teneur en eau) de la suspension, et cette dépendance est notamment régie par les caractéristiques géotechniques des terres. Le modèle utilisé est de type YODEL, il est présent notamment dans la littérature sur les pâtes cimentaires. Son utilisation sur les barbotines de cette étude a mis en avant le fait que la granulométrie d'une terre, et particulièrement sont taux d'argile, sont des paramètres de première importance. Ainsi, pour une même fraction volumique, plus une terre est argileuse, plus son seuil de cisaillement est élevé. Mais la modélisation n'est pas parfaite et nécessite une base de données plus importante pour l'alimenter. Ces travaux permettraient de mieux voir l'influence des caractéristiques des argiles (CEC, nature). D'autres méthodes statistiques pourraient aussi être utilisées pour analyser ces données.

Deuxièmement, un modèle a pu être utilisé pour analyser les résultats de caractérisation mécanique. Les formulations de terre-chanvre réalisées et testées mécaniquement ont permis de montrer que, pour un même rapport Chanvre/Terre, la granulométrie et notamment la teneur en argile sont des paramètres d'influence de premier ordre sur le comportement mécanique. Cependant, les mélanges étudiés couvrent seulement une plage de masse volumique allant de 250 à 400kg/m³. Une plage de variation plus importante de la masse volumique et des fractions volumiques des composants permettrait de mieux modéliser le comportement mécanique de ces mélanges. Ces travaux donneraient la possibilité dans le même temps d'évaluer les limites des formulations de terre-chanvre. Soit, pour une terre données quelle plage de formulation de C/T est possible.

Dans l'optique de compléter l'analyse du comportement mécanique du terre-chanvre, des travaux sur des essais de cisaillement ont été entamés. La Figure 7-4 présente un montage typique réalisé au laboratoire, permettant de faire des essais sur des cadres de 60*60*12.5 cm. La Figure 7-5 présente une illustration d'un échantillon testé, conjointement avec trois courbes types (contrainte et déformation) d'essais. De plus amples travaux et plusieurs formulations doivent être réalisés pour valider ces essais et leurs résultats.



Légende

1 : Tête de traction de 200 kN	5 : IPN
2 : Cadre testé (cadre visé à la planche)	6 : Poulie de renvoi des forces
3 : Module de fixation à l'IPN (planche + Vis et boulon)	7 : Capteur de force de 50 kN
4 : Système de cordage permettant le renvoi des forces	

Figure 7-4: Dispositif d'essais de cisaillement de cadres.

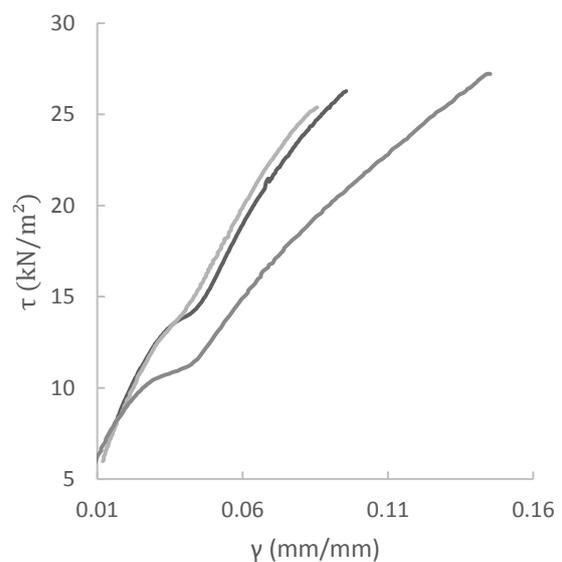


Figure 7-5: à gauche, exemple de cadre de terre chanvre cisailé; à droite, courbes types de trois échantillons testés.

7.3 QUESTIONS PRATIQUES

Le terre-chanvre est utilisé depuis plusieurs années sur des chantiers allant de la rénovation de maison individuelle aux chantiers plus importants de rénovation de bâtiments de collectivités. Pour terminer cette conclusion, une liste de questions issues de la pratique de chantier est présentée, avec les réponses apportées par les travaux de recherches de cette thèse :

1. Peut-on obtenir des abaques indiquant les performances du terre-chanvre selon le/les paramètre(s) adapté(s) (masse volumique, concentration de chanvre...) ?

→ Le Tableau 5-6 récapitulant les données nécessaires à la modélisation de comportement hygrothermique de parois (WUFI) a été construit durant la thèse. En revanche, de plus amples travaux sont nécessaires pour construire un abaque donnant un lien direct entre type de terre, formulations et performances hygrothermiques et mécaniques.

2. Est-ce qu'il y a un effet du type de terre ou de chanvre sur ces performances ? Pour une terre donnée, quelle masse volumique minimale est atteignable ?

Le chapitre 5 montre que les performances hygrothermiques dépendent peu du type de chanvre ou de terre utilisé, mais beaucoup plus de la formulation chanvre/terre. Néanmoins, dans le chapitre 6, le lien entre type de chanvre et comportement mécanique est observé. Mais cette variabilité n'influence en rien la possibilité de réaliser un terre-chanvre performant. De même, l'utilisation d'un modèle de comportement mécanique a démontré le lien entre performances mécaniques et taux d'argile de la terre. Il convient ainsi de porter une attention particulière au choix de terre suffisamment argileuse. Dans cette thèse, une terre très sableuse et avec peu d'argile a été utilisée (10% d'argile et plus 80% de sable), ce type de terre ne convient pas au terre chanvre, car elle ne permet pas de réaliser un mélange mécaniquement fiable. Selon les terres utilisées la limite en terme de taux d'argile doit se trouver entre 10% et 20%. En revanche, de plus amples travaux sont nécessaires pour déterminer, en fonction d'une terre donnée, quelle masse volumique minimale est atteignable.

3. Comment caractériser la barbotine sur chantier ? Et quel est l'effet d'une barbotine trop grasse, ou à l'inverse, trop diluée, sur les performances ?

Dans le Chapitre 4 sont présentés différents moyens de mesurer le seuil de cisaillement d'une barbotine. Ce seuil correspond à de la cohésion interne. Les tests présentés sont facilement adaptables au chantier. La question de la teneur en eau (barbotine trop grasse ou trop diluée) est relativement secondaire, sauf en cas de projection de celle-ci (la barbotine doit être pompable à travers un tuyau). Effectivement, c'est la fraction volumique de terre, et plus particulièrement d'argile, qui influe directement sur le comportement mécanique. Il faut donc prêter plus d'attention à la formulation, soit au rapport Chanvre/Terre, qu'à la teneur en eau de la barbotine. En revanche, il doit toujours y avoir suffisamment d'eau pour compenser l'absorption d'eau des chènevottes. Ces dernières absorbent 3 fois leur poids en 8 heures, on considère donc qu'il faut avoir au minimum trois fois la masse de chanvre en eau pour assurer la cohésion de l'ensemble du mélange durant le séchage.

4. Quelles sont les différences de performances entre terre-chanvre, terre-paille, chaux-chanvre (et autre béton biosourcés) ?

Ces éléments ont été présentés dans les Figure 7-1 et Figure 7-2 et Figure 7-3 de cette conclusion.

5. Quelles sont les différences entre des mises en œuvre projetées et banchées ? (Anisotropie)

Dans cette étude, un type d'échantillon de projeté a été testé. Des précautions sont à prendre quand l'interprétation de ces résultats, puisque l'échantillon testé ne représente pas vraiment ce qu'il est possible de fabriquer en projection. En termes de performances hygrothermiques, le Chapitre 5 indique que seule les propriétés de transferts sont affectées par l'orientation des particules. En revanche, pour une même masse volumique, un terre-chanvre projeté aura une conductivité thermique et un facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau plus faible qu'un terre-chanvre banché. Concernant le comportement mécanique, des essais de caractérisation de l'anisotropie ont été menés sur l'ensemble des formulations. Ils montrent que la limite d'élasticité est plus importante et le module d'élasticité plus faible lorsque la pression est effectuée parallèlement à l'orientation préférentielle des chènevottes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. DETRIE, Besoins et consommations d'énergie dans les bâtiments Synthèse bibliographique, (2007).
- [2] L. Antilla, Climate of scepticism: US newspaper coverage of the science of climate change, *Glob. Environ. Change.* 15 (2005) 338–352. doi:10.1016/j.gloenvcha.2005.08.003.
- [3] L. Meyer, S. Brinkman, L. van Kesteren, N. Leprince-Ringuet, F. van Boxmeer, Technical Support Unit for the Synthesis Report, (n.d.) 169.
- [4] GIEC, Changements climatiques 2013 - les éléments scientifiques, (2014). http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf (accessed August 23, 2017).
- [5] J.C. Semenza, D.E. Hall, D.J. Wilson, B.D. Bontempo, D.J. Sailor, L.A. George, Public Perception of Climate Change, *Am. J. Prev. Med.* 35 (2008) 479–487. doi:10.1016/j.amepre.2008.08.020.
- [6] International Energy Agency, Energy and Air Pollution _ World Energy Outlook _ Special Report, IEA PUBLICATIONS, 9 rue de la Fédération, 75739 PARIS CEDEX 15, 2016.
- [7] G. Albrecht, 'Solastalgia' A New Concept in Health and Identity, *PAN Philos. Act. Nat.* No 3. (2005) 16.
- [8] E. Universalis, ERNST HEINRICH HAECKEL, *Encycl. Universalis.* (n.d.). <https://www.universalis.fr/encyclopedie/haeckel-ernst-heinrich-1834-1919/> (accessed September 18, 2019).
- [9] Y. Cochet, L'effondrement, catabolique ou catastrophique ?, (2011) 7.
- [10] Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes, Pablo Servigne. (2015). <https://pabloservigne.com/comment-tout-peut-seffondrer/> (accessed February 20, 2019).
- [11] J.A. Tainter, T.G. Taylor, Complexity, problem-solving, sustainability and resilience, *Build. Res. Inf.* (2014) 15.
- [12] 2018 Global Status Report - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, World Green Build. Council. (n.d.). <https://www.worldgbc.org/> (accessed September 17, 2019).
- [13] Exigences réglementaires pour la construction des bâtiments, Ministère Transit. Écologique Solidaire. (n.d.). <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments> (accessed September 17, 2019).
- [14] RE2020 : ce qu'il faut savoir de l'expérimentation E+C-, Legrand. (n.d.). <https://www.legrand.fr/pro/actualites/re2020-ce-quil-faut-savoir-de-lexperimentation-ec> (accessed September 17, 2019).
- [15] Formation Bâtiment Durable: Rénovation à haute performance énergétique: détails techniques - PDF, (n.d.). <https://docplayer.fr/48178787-Formation-batiment-durable-renovation-a-haute-performance-energetique-details-techniques.html> (accessed September 17, 2019).
- [16] Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, n.d.
- [17] *fiche-evolution-habitat-2050.pdf*, (n.d.). <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-evolution-habitat-2050.pdf> (accessed September 10, 2019).
- [18] *6-Batiment-résidentiel-privé-version-longue.pdf*, (n.d.). <http://decarbonizeurope.org/wp-content/uploads/2016/11/6-Batiment-r%C3%A9sidentiel-priv%C3%A9-version-longue.pdf> (accessed September 18, 2019).
- [19] *7-Batiment-public-version-longue.pdf*, (n.d.). <http://decarbonizeurope.org/wp-content/uploads/2016/11/7-Batiment-public-version-longue.pdf> (accessed September 18, 2019).
- [20] E. Hamard, J.-C. Morel, F. Salgado, A. Marcom, N. Meunier, A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 109–115. doi:10.1016/j.culher.2012.04.005.
- [21] P. Walker, ed., *Rammed earth: design and construction guidelines*, BRE Bookshop, Watford, 2005.
- [22] J. Lanas, J.I. Alvarez-Galindo, Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 1867–1876. doi:10.1016/S0008-8846(03)00210-2.
- [23] S. Thiers, B. Peuportier, Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings, *Build. Environ.* 51 (2012) 276–284. doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.018.
- [24] La RT 2020, (n.d.). <http://www.rt-2020.com/> (accessed February 20, 2019).

- [25] Batiactu, Le marché des isolants a progressé de 5% en 2017, Batiactu. (2018). <https://www.batiactu.com/edito/marche-isolants-a-progresse-5-2017-54485.php> (accessed September 17, 2019).
- [26] T. Lecompte, Matériaux bio-sourcés pour le bâtiment et stockage temporaire de carbone, *Technique de l'ingénieur*. (à paraître).
- [27] U. Röhlen, C. Ziegert, *Construire en terre crue - Construction - Rénovation - Finition*, Le Moniteur, Paris, 2013.
- [28] R. Busbridge, Hemp-Clay: an initial investigation into the thermal, structural and environmental credentials of monolithic clay and hemp walls., (2009).
- [29] J.-C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker, Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, *Build. Environ.* 36 (2001) 1119–1126. doi:10.1016/S0360-1323(00)00054-8.
- [30] fdes_acoustilaine_035_280_mm.pdf, (n.d.). https://pim.knaufinsulation.com/files/download/fdes_acoustilaine_035_280_mm.pdf?_ga=2.234048478.1143449908.1568794777-955567861.1568794777 (accessed September 18, 2019).
- [31] L. Floissac, A. Marcom, A.-S. Colas, Q.-B. Bui, J.-C. Morel, How to assess the sustainability of building construction processes, in: *Fifth Urban Res. Symp.*, 2009: pp. 1–17.
- [32] H. Dahlbo, J. Bachér, K. Lähtinen, T. Jouttijärvi, P. Suoheimo, T. Mattila, S. Sironen, T. Myllymaa, K. Saramäki, Construction and demolition waste management – a holistic evaluation of environmental performance, *J. Clean. Prod.* 107 (2015) 333–341. doi:10.1016/j.jclepro.2015.02.073.
- [33] S.O. Ajayi, L.O. Oyedele, Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion, *J. Clean. Prod.* 147 (2017) 57–65. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.075.
- [34] C. Llatas, A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list, *Waste Manag.* 31 (2011) 1261–1276. doi:10.1016/j.wasman.2011.01.023.
- [35] C.S. Vieira, P.M. Pereira, Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review, *Resour. Conserv. Recycl.* 103 (2015) 192–204. doi:10.1016/j.resconrec.2015.07.023.
- [36] Les sols ont-ils de la mémoire ? - 80 clés pour comprendre les sols - Jérôme Balesdent, Etienne Dambrine, Jean-Claude Fardeau (EAN13 : 9782759223107), *Librairie Quae : des livres au coeur des sciences*, Libr. Quae. (n.d.). <https://www.quae.com/produit/1303/9782759223107/les-sols-ont-ils-de-la-memoire> (accessed April 23, 2019).
- [37] P. Boulouc, Le chanvre industriel production et utilisations, 2006. https://www.unitheque.com/Livre/france_agricole/Produire_mieux/Le_chanvre_industriel_production_et_utilisations-6525.html (accessed June 18, 2019).
- [38] R. Anger, L. Fontaine, T. Joffroy, E. Ruiz, *Construire en terre, une autre voie pour loger la planète*, (2011). craterre.org.
- [39] R. Anger, L. Fontaine, *Bâtir en terre: du grain de sable à l'architecture*, 2014. <https://craterre.hypotheses.org/451> (accessed September 19, 2019).
- [40] Bairuolong, Svenska: Närbild på strukturen av den Kinesiska muren från Handynastin i Gansu, 2014. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34811375> (accessed September 27, 2019).
- [41] Le Tulou de Chuxi - Province du Fujian - découverte et visite, *China Roads*. (n.d.). <https://www.china-roads.fr/voyage/fujian/tulou-de-chuxi/> (accessed September 27, 2019).
- [42] Les Maçons de Djenné, *Cult. Afr. Ouest.* (2018). <https://www.culturesofwestafrica.com/fr/macons-de-djenne/> (accessed September 27, 2019).
- [43] J. Sheldon, Grand Designs 2018: 'Insane' giant cob castle to make history? Kevin McCloud finds out, *Express.Co.Uk.* (2018). <https://www.express.co.uk/life-style/property/1039091/Grand-Designs-2018-castle-Kevin-McCloud-news-latest-pictures> (accessed September 27, 2019).
- [44] Bâti en terre, Région Normandie. (n.d.). <https://www.normandie.fr/bati-en-terre> (accessed September 27, 2019).
- [45] 5 maisons à pans de bois à Rouen à ne pas rater, *Rouen Tour.* (2018). <https://www.rouentourisme.com/5-maisons-a-pans-de-bois-a-rouen/> (accessed September 27, 2019).
- [46] E. Gallo, *Modernité technique et valeur d'usage: le chauffage des bâtiments d'habitation en France*, 2006. <http://emmanuelgallo.free.fr/pdf/TdM.pdf> (accessed September 19, 2019).
- [47] A. Marcom, *Construire en terre paille, Terre vivante*, 2011. <https://boutique.terrevivante.org/librairie/livres/2500/conseils-d-expert/458-construire-en-terre-paille.htm> (accessed September 19, 2019).

- [48] Horst Schroeder, The New DIN Standards in Earth Building—The Current Situation in Germany, *J. Civ. Eng. Archit.* 12 (2018). doi:10.17265/1934-7359/2018.02.005.
- [49] F. Volhard, *Construire en terre allégée*, Actes sud, 2016.
- [50] ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, Collectif Terreux Armoricaïns, FFB, Fédération des SCOP du BTP, Maisons Paysannes de France, Réseau Ecobâtir, TERA, Guides de Bonnes Pratiques de la Construction en Terre Crue, (2018).
- [51] *Construire en chanvre - Construire En Chanvre*, (n.d.). <https://www.construire-en-chanvre.fr/missions> (accessed September 19, 2019).
- [52] L. Liu, H. Li, A. Lazzaretto, G. Manente, C. Tong, Q. Liu, N. Li, The development history and prospects of biomass-based insulation materials for buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69 (2017) 912–932. doi:10.1016/j.rser.2016.11.140.
- [53] PÔLE PRÉVENTION PRODUITS | AQC, (n.d.). <http://www.qualiteconstruction.com/pole-prevention-produits> (accessed September 28, 2019).
- [54] Techniques courantes/non courantes : Innover en responsabilité : FFB, (n.d.). https://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=2820 (accessed September 28, 2019).
- [55] J.-L. Briaud, *Geotechnical Engineering : Unsaturated and Saturated Soils*, Jossey-Bass, 2013. <http://scholarvox.ezproxy.univ-ubs.fr/catalog/book/docid/88819105> (accessed April 23, 2019).
- [56] E. Hamard, *Rediscovering of vernacular adaptative construction strategies for sustainable modern building : application to cob and rammed earth*, thesis, Lyon, 2017. <http://www.theses.fr/2017LYSET011> (accessed April 23, 2019).
- [57] S.L. Pagliolico, S. Ronchetti, E.A. Turcato, G. Bottino, L.M. Gallo, R. DePaoli, Physicochemical and mineralogical characterization of earth for building in North West Italy, *Appl. Clay Sci.* 50 (2010) 439–454. doi:10.1016/j.clay.2010.08.027.
- [58] K.A. Coventry, SPECIFICATION DEVELOPMENT FOR THE USE OF DEVON COB IN EARTHEN CONSTRUCTION, (2004). <https://pearl.plymouth.ac.uk/handle/10026.1/1291> (accessed August 3, 2019).
- [59] J. Watez, *Enregistrement sédimentaire de l’usage de la terre crue dans les établissements néolithiques du sud de la France : le cas des sites du Néolithique Final de La Capoulière 2 et du Mas de Vignoles IV*, (2003). <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00749975> (accessed August 3, 2019).
- [60] E. Hamard, B. Lemercier, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, A new methodology to identify and quantify material resource at a large scale for earth construction – Application to cob in Brittany, *Constr. Build. Mater.* 170 (2018) 485–497. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.097.
- [61] J. Morel, R. Charef, What are the barriers affecting the use of earth as a modern construction material in the context of circular economy?, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 225 (2019) 012053. doi:10.1088/1755-1315/225/1/012053.
- [62] E. Hamard, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J.-C. Morel, Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building, *Build. Environ.* 106 (2016) 103–119. doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.009.
- [63] M. Lark, M. Budiman, The Newsletter of the Pedometrics Commission of the IUSS, (n.d.). <http://www.pedometrics.org/Pedometron/pedometron28.pdf> (accessed September 22, 2019).
- [64] Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents - art%3A10.1007%2FBF02481707.pdf, (n.d.). http://download-v2.springer.com/static/pdf/59/art%253A10.1007%252FBF02481707.pdf?token2=exp=1430747975~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F59%2Fart%25253A10.1007%25252FBF02481707.pdf*~hmac=295f9bf7c746a32bbfcab4c40352adb7c1dd24ab5d944905eed5222a3a7f12 (accessed May 4, 2015).
- [65] P. Dhandhukia, D. Goswami, P. Thakor, J.N. Thakker, Soil property apotheosis to corral the finest compressive strength of unbaked adobe bricks, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 948–953. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.043.
- [66] L.N. Reddi, A.K. Jain, H.-B. Yun, Soil materials for earth construction: properties, classification and suitability testing, in: M.R. Hall, R. Lindsay, M. Krayenhoff (Eds.), *Mod. Earth Build. - Mater. Engineering Constr. Appl.*, Woodhead Publishing, Oxford, 2012: p. 776.
- [67] M. Hall, Y. Djerbib, Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction, *Constr. Build. Mater.* 18 (2004) 269–280. doi:10.1016/j.conbuildmat.2003.11.002.
- [68] M. Hall, Y. Djerbib, Moisture ingress in rammed earth: Part 2 – The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 374–383. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.035.

- [69] A. Meunier, *Argiles*, Scientifiques GB, Paris, 2010.
- [70]. J.K.mitchell&K.soga - *Fundamentals of Soil Behaviour | Génie géotechnique | Minéral argileux*, Scribd. (1976). <https://www.scribd.com/document/339250720/18-J-K-mitchell-K-soga-Fundamentals-of-Soil-Behaviour> (accessed July 12, 2019).
- [71] *Book_Geotechnical Engineering of Dams.pdf*, (n.d.). http://cefcic.uni.edu.pe/archivos/taludes/clase%2009.07.2016/Bibliografia%20Basica/Book_Geotechnical%20Engineering%20of%20Dams.pdf (accessed July 31, 2019).
- [72] B. Velde, A. Meunier, *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*, Springer, Berlin, 2008.
- [73] R.M. Schmitz, C. Schroeder, R. Charlier, Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits, *Appl. Clay Sci.* 26 (2004) 351–358. doi:10.1016/j.clay.2003.12.015.
- [74] R.J. Flatt, P. Bowen, Yodel: A Yield Stress Model for Suspensions, *J. Am. Ceram. Soc.* 89 (2006) 1244–1256. doi:10.1111/j.1551-2916.2005.00888.x.
- [75] H. Van Damme, *La terre , un béton d’argile*, *Pour Sci.* (2013) 50–57.
- [76] M.P. Allen, D.J. Tildesley, *Computer Simulation of Liquids: Second Edition*, Oxford University Press, 2017.
- [77] F. Soulié, *Etude micromécanique de la cohésion par capillarité dans les milieux granulaires humides*, (n.d.) 13.
- [78] *Phys. Rev. Lett.* 80, 3141 (1998) - *How Sandcastles Fall*, (n.d.). <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.80.3141> (accessed April 25, 2019).
- [79] C. BECKETT, S. THOMAS, *The role of material structure in compacted earthen building materials: implications for design and construction*, Durham University, 2011. <http://etheses.dur.ac.uk/3313/> (accessed May 4, 2015).
- [80] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, P. Walker, Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Constr. Build. Mater.* 54 (2014) 163–169. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067.
- [81] R. Xu, *Particle Characterization: Light Scattering Methods*, Springer Science & Business Media, 2001.
- [82] H.C. Hulst, H.C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, Courier Corporation, 1981.
- [83] L.P. Bayvel, A.R. Jones, *Electromagnetic scattering and its applications*, Applied Science, London ; Englewood, N.J, 1981.
- [84] M. Heuer, K. Leschonski, Results Obtained with a New Instrument for the Measurement of particle size distributions from diffraction patterns, *Part. Part. Syst. Charact.* (1985). doi:10.1002/ppsc.19850020102.
- [85] J.-L. Loizeau, D. Arbouille, S. Santiago, J.-P. Vernet, Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments, *Sedimentology.* 41 (1994) 353–361. doi:10.1111/j.1365-3091.1994.tb01410.x.
- [86] H. Pincus, E. Cokca, A. Birand, Determination of Cation Exchange Capacity of Clayey Soils by the Methylene Blue Test, *Geotech. Test. J.* 16 (1993) 518. doi:10.1520/GTJ10291J.
- [87] S. Laribi, M. Audiguier, R. Cojean, Assessing shrink/swell properties of two argillaceous soils from the Paris Basin: a comparison of cation exchange determination methods, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67 (2008) 415–424. doi:10.1007/s10064-008-0149-y.
- [88] M.D. Raven, P.G. Self, Accuracy in quantitative phase analysis of complex mineral assemblages: A decade of Reynolds Cup round robins, (n.d.) 36.
- [89] T. Monecke, S. Kohler, R. Kleeberg, P.M. Herzig, J.B. Gemmel, QUANTITATIVE PHASE-ANALYSIS BY THE RIETVELD METHOD USING X-RAY POWDER-DIFFRACTION DATA: APPLICATION TO THE STUDY OF ALTERATION HALOS ASSOCIATED WITH VOLCANIC-ROCK-HOSTED MASSIVE SULFIDE DEPOSITS, *Can. Mineral.* 39 (2001) 1617–1633. doi:10.2113/gscanmin.39.6.1617.
- [90] S. Jermouni, *Etude sur la nocivité des argiles dans les sables utilisés dans les couches de roulement.*, AFPA, 2015.
- [91] M. Duc, *Contribution à l’étude des mécanismes de sorption aux interfaces solide-liquide: application aux cas des apatites et des oxy-hydroxydes*, (n.d.) 380.
- [92] G. Brown, *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 1982.
- [93] RHÉOLOGIE - *Encyclopædia Universalis*, (n.d.). <https://www.universalis.fr/encyclopedie/rheologie/> (accessed May 14, 2019).
- [94] E. Hrubesova, B. Lunackova, O. Brodzki, Comparison of Liquid Limit of Soils Resulted from Casagrande Test and Modified Cone Penetrometer Methodology, *Procedia Eng.* 142 (2016) 364–370. doi:10.1016/j.proeng.2016.02.063.
- [95] A. Perrot, D. Rangeard, A. Levigneux, Linking rheological and geotechnical properties of kaolinite materials for earthen construction, *Mater. Struct.* 49 (2016) 4647–4655. doi:10.1617/s11527-016-0813-9.

- [96] F.A. Andrade, H.A. Al-Qureshi, D. Hotza, Measuring the plasticity of clays: A review, *Appl. Clay Sci.* 51 (2011) 1–7. doi:10.1016/j.clay.2010.10.028.
- [97] B. Suner, *Approche des matériaux bio-sourcés dans la formation des architectes à Nantes*, (n.d.) 15.
- [98] Jean-Loup Castaigne, *Experiential Learning in Architecture Education*, (09:45:05 UTC). https://www.slideshare.net/JeanLoup_Castaigne/experiential-learning-in-architecture-education (accessed August 3, 2019).
- [99] C.-W. Chen, A mineralogical approach to use the non-qualified fine aggregates in asphalt concrete pavement, (n.d.) 249.
- [100] S. Benet, *Early Diffusion and Folk Uses of Hemp*, in: V. Rubin (Ed.), *Cannabis Cult.*, DE GRUYTER MOUTON, Berlin, New York, 1975. doi:10.1515/9783110812060.39.
- [101] Pliny L'ancien, *Histoire Naturelle*, E. LITTRE, Dubochet, Paris, 1848.
- [102] A. Chevalier, *Histoire de deux plantes cultivées d'importance primordiale. Le Lin et le Chanvre.*, *Rev. Bot. Appliquée Agric. Colon.* 24 (1944) 51–71. doi:10.3406/jatba.1944.6107.
- [103] M. Bur, H. Richard, *Histoire et palynologie. Occupation du sol et peuplement dans la vallée du Thin (Ardennes) au haut Moyen Âge*, *Archéologie Médiév.* 17 (1987) 93–103. doi:10.3406/arcme.1987.1188.
- [104] J.C.V. de Bomare, *Dictionnaire raisonné universel d'Histoire Naturelle...*, 1769.
- [105] R. Rhydwen, *Building with Hemp and Lime*, (n.d.) 26.
- [106] D. Jones, C. Brischke, *Performance of Bio-based Building Materials*, Woodhead Publishing, 2017.
- [107] S. Fideluis, *Etude de la mise en oeuvre du béton de chanvre pour la construction*, Lorient, 2008.
- [108] E.G. Jan, *Environmental benefits of natural fibre production and use*, (2009).
- [109] S. Courgey, J.-P. Oliva, *L'isolation thermique écologique _ Conception, matériaux, mise en oeuvre - Neuf et réhabilitation*, Terre vivante, 2001.
- [110] W.H. Fuller, A.G. Norman, C.P. Wilsie, *The retting of hemp I. Field retting of hemp in Iowa*, (n.d.) 62.
- [111] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, M. Sonebi, *Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity*, *Mater. Struct.* 50 (2017) 167. doi:10.1617/s11527-017-1029-3.
- [112] S. Amziane, F. Collet, *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, eds., Bio-aggregates based building materials: State-of-the-art report of the Rilem Technical Committee 236-BBM*, Springer, Dordrecht, 2017.
- [113] S. Amziane, L. Arnaud, eds., *Bio-aggregate-based building materials: applications to hemp concretes*, ISTE, London, 2013.
- [114] Picandet_2012-Caractérisation granulométrique des chènevotte.pdf, (n.d.).
- [115] Amziane et al_2013_Bio-aggregate-based Building Materials.pdf, (n.d.).
- [116] G. Delannoy, S. Marceau, P. Glé, E. Gourlay, M. Guéguen-Minerbe, D. Diafi, I. Nour, S. Amziane, F. Farcas, *Aging of hemp shiv used for concrete*, *Mater. Des.* 160 (2018) 752–762. doi:10.1016/j.matdes.2018.10.016.
- [117] M. Degrave-Lemeurs, P. Glé, A. Hellouin de Menibus, *Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders*, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 462–474. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.064.
- [118] Y. Jiang, M. Lawrence, M.P. Ansell, A. Hussain, *Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv*, *R. Soc. Open Sci.* 5 (2018) 171945. doi:10.1098/rsos.171945.
- [119] D.J. Krasznai, B. Eng, *MULTIVARIATE CHARACTERIZATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS AND GRAFT MODIFICATION OF NATURAL POLYMERS*, (n.d.) 192.
- [120] AFNOR, *NF V18-122 - Aliments des animaux — Détermination séquentielle des constituants pariétaux — Méthode par traitement aux détergents neutre et acide et à l'acide sulfurique*, 1997. <https://sagaweb.ezproxy.univ-ubs.fr/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1405508/?Ing=FR&supNumDos=FA179829> (accessed July 18, 2019).
- [121] P.J. Van Soest, J.B. Robertson, B.A. Lewis, *Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition*, *J. Dairy Sci.* 74 (1991) 3583–3597. doi:10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2.
- [122] M. Viel, F. Collet, C. Lanos, *Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material*, *Ind. Crops Prod.* 120 (2018) 214–237. doi:10.1016/j.indcrop.2018.04.025.
- [123] P.J. Van Soest, *Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin*, *J. AOAC.* (1963).
- [124] Amziane et al. - 2017 - Recommendation of the RILEM TC 236-BBM characteri.pdf, (n.d.).

- [125] C. Baley, Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 33 (2002) 939–948. doi:10.1016/S1359-835X(02)00040-4.
- [126] B. Mazhoud, Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés, (2017) 213.
- [127] J.-E. Aubert, *Panorama sur la construction en terre crue*, (n.d.) 34.
- [128] Société d'édition du bâtiment et des travaux publics, *Construire en chanvre règles professionnelles d'exécution*, SEBTP, Paris, 2012.
- [129] c2011-05-16RèglesProBétonsdeChanvretroitVersion2.8.pdf, (n.d.).
- [130] c2011-05-16RèglesProBétonsdechanvreSolVersion2.8.pdf, (n.d.).
- [131] c2011-05-16RèglesProBétonsdechanvreMurVersion2.8.pdf, (n.d.).
- [132] c2011-05-16RèglesProBétonsdeChanvreenduitVersion2.8.pdf, (n.d.).
- [133] GBP_CTC_2018_web.pdf, (n.d.).
- [134] P.B. De Bruijn, K.-H. kan Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres, (2009) 6.
- [135] A. Younes, A. Youssef, Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre, (2017) 207.
- [136] V. Cerezo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, (2005).
- [137] Y. Brouard, caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat, (n.d.) 173.
- [138] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process, (n.d.) 2007.
- [139] R. Illampas, I. Ioannou, D.C. Charmpis, Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 83–90. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103.
- [140] J.E. Aubert, A. Fabbri, J.C. Morel, P. Maillard, An earth block with a compressive strength higher than 45MPa!, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 366–369.
- [141] P. Tronet, CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MATERIAUX CHAUX-CHANVRE INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LES PROPRIETES.pdf, Université Bretagne Sud, 2012.
- [142] A. Youssef, V. Picandet, T. Lecompte, N. Challamel, Comportement du beton de chanvre en compression simple et cisaillement, (2015) 9.
- [143] F. Collet, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, (2004).
- [144] J. Williams, M. Lawrence, P. Walker, The influence of constituents on the properties of the bio-aggregate composite hemp-lime, *Constr. Build. Mater.* 159 (2018) 9–17. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.10.109.
- [145] Q. Piattoni, E. Quagliarini, S. Lenci, Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2067–2075. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039.
- [146] T. Pierre, T. Colinart, P. Glouannec, Measurement of Thermal Properties of Biosourced Building Materials, *Int. J. Thermophys.* 35 (2014) 1832–1852. doi:10.1007/s10765-013-1477-0.
- [147] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateaneuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, C. Lanos, G. Escadeillas, M. Lawrence, C. Magniont, S. Marceau, S. Pavia, U. Peter, V. Picandet, M. Sonebi, P. Walker, Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Mater. Today Commun.* 7 (2016) 122–133. doi:10.1016/j.mtcomm.2016.03.003.
- [148] GBP_CTC_2018_web.pdf, (n.d.). http://www.arpe-normandie.com/wp-content/uploads/2019/05/GBP_CTC_2018_web.pdf (accessed May 21, 2019).
- [149] N. Martin, N. Mouret, P. Davies, C. Baley, Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites, *Ind. Crops Prod.* 49 (2013) 755–767. doi:10.1016/j.indcrop.2013.06.012.
- [150] H.S.S. Sharma, G. Faughey, G. Lyons, Comparison of physical, chemical, and thermal characteristics of water-, dew-, and enzyme-retted flax fibers, (n.d.) 5.
- [151] M. Moevus-Dorvaux, L. Couvreur, B. Cloquet, L. Fontaine, R. Anger, P. Doat, Béton d'argile environnemental, (n.d.) 45.
- [152] NF P 94-056 - Analyse granulométrique par tamisage - Méthode par tamisage à sec après lavage, Norme Française, AFNOR, Paris, 1996.
- [153] NF P 94-057 - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation, Norme Française, AFNOR, Paris, 1992.
- [154] NF P 94-051 - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau, Norme Française, AFNOR, Paris, 1993.

- [155] NF P 94-068 - Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache, Norme Française, AFNOR, Paris, 1998.
- [156] A. Perrot, D. Rangeard, T. Lecompte, Field-oriented tests to evaluate the workability of cob and adobe, *Mater. Struct.* 51 (2018). doi:10.1617/s11527-018-1181-4.
- [157] G. Azeredo, J.-C. Morel, C.-H. Lamarque, Applicability of rheometers to characterizing earth mortar behavior. Part I: experimental device and validation, *Mater. Struct.* 41 (2008) 1465–1472. doi:10.1617/s11527-007-9343-9.
- [158] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, N. Meunier, Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth, *Mater. Struct.* 42 (2009) 1101–1116. doi:10.1617/s11527-008-9446-y.
- [159] M. Moevus, Y. Jorand, C. Olagnon, S. Maximilien, R. Anger, L. Fontaine, L. Arnaud, Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase, *Mater. Struct.* 49 (2016) 1555–1568. doi:10.1617/s11527-015-0595-5.
- [160] Z. Vryzas, V.C. Kelessidis, L. Nalbantian, V. Zaspalis, D.I. Gerogiorgis, Y. Wubulikasimu, Effect of temperature on the rheological properties of neat aqueous Wyoming sodium bentonite dispersions, *Appl. Clay Sci.* 136 (2017) 26–36. doi:10.1016/j.clay.2016.11.007.
- [161] P. Coussot, S. Boyer, Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test, *Rheol. Acta.* 34 (1995) 534–543. doi:10.1007/BF00712314.
- [162] M.T. Balhoff, L.W. Lake, P.M. Bommer, R.E. Lewis, M.J. Weber, J.M. Calderin, Rheological and yield stress measurements of non-Newtonian fluids using a Marsh Funnel, *J. Pet. Sci. Eng.* 77 (2011) 393–402. doi:10.1016/j.petrol.2011.04.008.
- [163] A.D.A. Givanildo, Mise au point de procédures d'essais mécaniques sur mortiers de terre, application à l'étude de leur rhéologie, 2005.
- [164] J.-C. Baudez, F. Chabot, P. Coussot, Rheological Interpretation of the Slump Test, *Appl. Rheol.* 12 (2002) 133–141. doi:10.1515/arh-2002-0008.
- [165] F. Mahaut, S. Mokéddem, X. Chateau, N. Roussel, G. Ovarlez, Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1276–1285. doi:10.1016/j.cemconres.2008.06.001.
- [166] A. Perrot, T. Lecompte, H. Khelifi, C. Brumaud, J. Hot, N. Roussel, Yield stress and bleeding of fresh cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 42 (2012) 937–944. doi:10.1016/j.cemconres.2012.03.015.
- [167] N. Roussel, P. Coussot, "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow, *J. Rheol.* 49 (2005) 705–718. doi:10.1122/1.1879041.
- [168] T. Lecompte, A. Perrot, Non-linear modeling of yield stress increase due to SCC structural build-up at rest, *Cem. Concr. Res.* 92 (2017) 92–97. doi:10.1016/j.cemconres.2016.11.020.
- [169] D18 Committee, Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries, ASTM International, n.d. doi:10.1520/D6910_D6910M-09.
- [170] AFNOR, SNF EN ISO 2431, (n.d.). <https://sagaweb.ezproxy.univ-ubs.fr/fr-FR/sw/Consultation/Xml/1286004/?Ing=FR&supNumDos=FA159983> (accessed June 11, 2019).
- [171] M. Sonebi, L. Svermova, P.J.M. Bartos, Statistical modelling of cement slurries for self-compacting SIFCON containing silica fume, (2003) 9.
- [172] A. Perrot, T. Lecompte, P. Estellé, S. Amziane, Structural build-up of rigid fiber reinforced cement-based materials, *Mater. Struct.* 46 (2013) 1561–1568. doi:10.1617/s11527-012-9997-9.
- [173] S. Amziane, A. Perrot, T. Lecompte, A novel settling and structural build-up measurement method, *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008) 105702. doi:10.1088/0957-0233/19/10/105702.
- [174] C.M. Ouellet-Plamondon, G. Habert, Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept, *J. Clean. Prod.* 117 (2016) 160–168. doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.048.
- [175] V.B.Q. Nguyen, H.-S. Kang, Y.-T. Kim, Effect of clay fraction and water content on rheological properties of sand-clay mixtures, *Environ. Earth Sci.* 77 (2018) 576. doi:10.1007/s12665-018-7748-0.
- [176] G. Ovarlez, Caractérisation rhéologique des fluides à seuil, 20 (2011) 17.
- [177] P. Coussot, Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel, *J. Hydraul. Res.* 32 (1994) 535–559. doi:10.1080/00221686.1994.9728354.
- [178] J. O'Brien, P. Julien, Laboratory analysis of mudflow properties, (1988).
- [179] J.D. Parsons, K.X. Whipple, A. Simoni, Experimental Study of the Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows, *J. Geol.* 109 (2001) 427–447. doi:10.1086/320798.
- [180] J.J. Major, T.C. Pierson, Debris flow rheology, experimental analysis of fine-grained slurries any rotating of FI Imposed on the rotor, (n.d.).

- [181] J.G. Marr, P.A. Harff, G. Shanmugam, G. Parker, Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures, *Geol. Soc. Am. Bull.* (2001) 11.
- [182] T. Ilstad, J.G. Marr, A. Elverhøi, C.B. Harbitz, Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress, *Mar. Geol.* 213 (2004) 403–414. doi:10.1016/j.margeo.2004.10.016.
- [183] S.W. Jeong, Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows, *Geosci. J.* 14 (2010) 359–369. doi:10.1007/s12303-010-0036-y.
- [184] S.W. Jeong, J. Locat, S. Leroueil, J.-P. Malet, Rheological properties of fine-grained sediment: the roles of texture and mineralogy, *Can. Geotech. J.* 47 (2010) 1085–1100. doi:10.1139/T10-012.
- [185] S.W. Jeong, INFLUENCE OF PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF FINE-GRAINED SEDIMENTS ON THEIR RHEOLOGICAL BEHAVIOR, (n.d.) 243.
- [186] F.J. Williams, M. Neznayko, D.J. Weintritt, The Effect of Exchangeable Bases on the Colloidal Properties of Bentonite, *J. Phys. Chem.* 57 (1953) 6–10. doi:10.1021/j150502a002.
- [187] H. Van Olphen, An introduction to clay colloid chemistry, Interscience Publishers, New York, 1964. doi:10.1002/jps.2600530238.
- [188] G. Churchman, J. Skjemstad, J. Oades, Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils, *Soil Res.* 31 (1993) 779. doi:10.1071/SR9930779.
- [189] F. Miano, M.R. Rabaioli, Rheological scaling of montmorillonite suspensions: the effect of electrolytes and polyelectrolytes, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 84 (1994) 229–237. doi:10.1016/0927-7757(93)02724-S.
- [190] P.F. Luckham, S. Rossi, The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions, *Adv. Colloid Interface Sci.* 82 (1999) 43–92. doi:10.1016/S0001-8686(99)00005-6.
- [191] A. Pierre, A. Perrot, A. Histace, S. Gharsalli, E.-H. Kadri, A study on the limitations of a vane rheometer for mineral suspensions using image processing, *Rheol. Acta.* 56 (2017) 351–367. doi:10.1007/s00397-017-0993-4.
- [192] R.J. Flatt, P. Bowen, Yield Stress of Multimodal Powder Suspensions: An Extension of the YODEL (Yield Stress mODEL), *J. Am. Ceram. Soc.* 90 (2007) 1038–1044. doi:10.1111/j.1551-2916.2007.01595.x.
- [193] J.-M. Collin, G. Mauvoisin, P. Pilvin, Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches, *Mater. Des.* 31 (2010) 636–640. doi:10.1016/j.matdes.2009.05.043.
- [194] J.-M. Collin, G. Mauvoisin, P. Pilvin, Identification des paramètres de lois de comportement des métaux par test d'indentation sphérique, *Matér. Tech.* 96 (2008) 105–113. doi:10.1051/mattech/2009021.
- [195] C09 Committee, Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, n.d. doi:10.1520/C0143_C0143M-15A.
- [196] C01 Committee, Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, n.d. doi:10.1520/C0230_C0230M-14.
- [197] A. Pierre, C. Lanos, P. Estellé, Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation, (2013) 23.
- [198] J. Engmann, C. Servais, A.S. Burbidge, Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 132 (2005) 1–27. doi:10.1016/j.jnnfm.2005.08.007.
- [199] G. Lombardi, The role of cohesion in cement grouting of rock, 15ème Congrès Gd. Barrages Lausanne. (1985).
- [200] M. Maillard, J. Bleyer, A.L. Andrieux, J. Boujlel, P. Coussot, Dip-coating of yield stress fluids, *Phys. Fluids.* 28 (2016) 053102. doi:10.1063/1.4947473.
- [201] S. Clayton, T.G. Grice, D.V. Boger, Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions, *Int. J. Miner. Process.* 70 (2003) 3–21. doi:10.1016/S0301-7516(02)00148-5.
- [202] M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, J.-E. Aubert, From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential, *Build. Environ.* 97 (2016) 69–81. doi:10.1016/j.buildenv.2015.12.004.
- [203] E. Gourlay, P. Glé, S. Marceau, C. Foy, S. Moscardelli, Effect of water content on the acoustical and thermal properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 139 (2017) 513–523. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.018.
- [204] J. Berger, S. Guernouti, M. Woloszyn, C. Buhe, Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation, *J. Build. Eng.* 3 (2015) 1–15. doi:10.1016/j.jobe.2015.04.008.
- [205] WUFI (en), (n.d.). <https://wufi.de/en/> (accessed September 25, 2019).
- [206] Bauklimatik Dresden: Software für Bauphysik und Bauklimatik, (n.d.). <http://www.bauklimatik-dresden.de/> (accessed September 25, 2019).

- [207] M. Woloszyn, C. Rode, Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings, *Build. Simul.* 1 (2008) 5–24. doi:10.1007/s12273-008-8106-z.
- [208] J. Williams, M. Lawrence, P. Walker, The influence of the casting process on the internal structure and physical properties of hemp-lime, *Mater. Struct.* 50 (2016) 108. doi:10.1617/s11527-016-0976-4.
- [209] M. Palumbo, A.M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea, P. Walker, Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016) 269–275. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106.
- [210] R. Walker, S. Pavía, Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes, *Constr. Build. Mater.* 64 (2014) 270–276. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081.
- [211] B. Mazhoud, F. Collet, S. Pretot, J. Chamoin, Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters, *Build. Environ.* 96 (2016) 206–216. doi:10.1016/j.buildenv.2015.11.013.
- [212] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete block. Part II: Hygric properties, *J. Build. Eng.* 24 (2019) 100579. doi:10.1016/j.job.2018.09.007.
- [213] B. Seng, C. Magniont, S. Lorente, Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties, *J. Build. Eng.* 24 (2019) 100540. doi:10.1016/j.job.2018.07.016.
- [214] S. Goodhew, R. Griffiths, Sustainable earth walls to meet the building regulations, *Energy Build.* 37 (2005) 451–459. doi:10.1016/j.enbuild.2004.08.005.
- [215] R. Busbridge, R. Rhydwen, AN INVESTIGATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF HEMP AND CLAY MONOLITHIC WALLS, (2010) 10.
- [216] K. Holzhueter, K. Itonaga, The Potential for Light Straw Clay Construction in Japan: An Examination of the Building Method and Thermal Performance, *J. Asian Archit. Build. Eng.* 16 (2017) 209–213. doi:10.3130/jaabe.16.209.
- [217] Hygrothermal performance of various Typha–clay composite - Ibrahim Niang, Chadi Maalouf, Tala Moussa, Christophe Bliard, Etienne Samin, Céline Thomachot-Schneider, Mohamed Lachi, Hervé Pron, Ton Hoang Mai, Salif Gaye, 2018, (n.d.). <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1744259118759677> (accessed September 25, 2019).
- [218] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, N. Ranganathan, S. Méo, Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 196–207. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140.
- [219] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, J.-E. Aubert, Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials, *Waste Biomass Valorization.* 9 (2018) 1095–1112. doi:10.1007/s12649-017-9895-z.
- [220] H. Cagnon, J.E. Aubert, M. Coutand, C. Magniont, Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy Build.* 80 (2014) 208–217. doi:10.1016/j.enbuild.2014.05.024.
- [221] AFNOR, NF EN ISO 12570 - Détermination du taux d’humidité par séchage à chaud, (2000).
- [222] AFNOR, NF ISO 11464 - Qualité du sol - Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques, (2006).
- [223] AFNOR, NF EN 14063-1 - Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Isolation thermique formée en place à base de granulats légers d’argile expansée - Partie 1 : spécification des produits en vrac avant la mise en place, (2005).
- [224] AFNOR, NF EN 13171+A1 - Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en fibres de bois (WF) - Spécification, (2015).
- [225] ISO 13061-1/A1:2017 - Amendement 1 à la norme ISO 13061-1 d’octobre 2014, (2017).
- [226] L.-O. Nilsson, *Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures*, Springer, Cham, n.d.
- [227] AFNOR, NF EN ISO 12571 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique, (2013).
- [228] ARESO, NF EN ISO 11357-4 - Plastiques - Analyse calorimétrique différentielle (DSC) - Partie 4 : détermination de la capacité thermique massique, (carré).
- [229] P. Carré, R. Le Gall, Définition et détermination des conductivités thermiques dans la structures multicouches C.V.R. – balsa, *Rev. Générale Therm.* Vol 340. (1990).
- [230] AFNOR, NF EN 12664 - Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique, (2001).
- [231] AFNOR, NF EN ISO 12572 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d’eau - Méthode de la coupelle, (2016).
- [232] AFNOR, NF EN ISO 15148 - Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du coefficient d’absorption d’eau par immersion partielle, (2003).

- [233] A. Fabbri, L. Soudani, F. McGregor, J.-C. Morel, Analysis of the water absorption test to assess the intrinsic permeability of earthen materials, *Constr. Build. Mater.* 199 (2019) 154–162. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.014.
- [234] Q.-B. Bui, M. Labat, J.E. Aubert, Comparison of the Saturated Salt Solution and the Dynamic Vapor Sorption techniques based on the measured sorption isotherm of barley straw, *Constr. Build. Mater.* 141 (2017) 140–151. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.005.
- [235] D.W. Waples, J.S. Waples, A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks, *Nat. Resour. Res.* 13 (2004) 97–122. doi:10.1023/B:NARR.0000032647.41046.e7.
- [236] A. Skauge, N. Fuller, L.G. Hepler, Specific heats of clay minerals: Sodium and calcium kaolinites, sodium and calcium montmorillonites, illite, and attapulgite, *Thermochim. Acta.* 61 (1983) 139–145. doi:10.1016/0040-6031(83)80310-4.
- [237] W.F. Woodruff, A. Revil, CEC-normalized clay-water sorption isotherm, *Water Resour. Res.* 47 (2011). doi:10.1029/2011WR010919.
- [238] A. Revil, N. Lu, Unified water isotherms for clayey porous materials, *Water Resour. Res.* 49 (2013) 5685–5699. doi:10.1002/wrcr.20426.
- [239] E.E. Thybring, Explaining the heat capacity of wood constituents by molecular vibrations, *J. Mater. Sci.* 49 (2014) 1317–1327. doi:10.1007/s10853-013-7815-6.
- [240] K. Kulasinski, Physical and Mechanical Aspects of Moisture Adsorption in Wood Biopolymers Investigated with Atomistic Simulations, ETH Zurich, 2015. doi:10.3929/ethz-a-010564673.
- [241] E.T. Engelund, L.G. Thygesen, S. Svensson, C.A.S. Hill, A critical discussion of the physics of wood–water interactions, *Wood Sci. Technol.* 47 (2013) 141–161. doi:10.1007/s00226-012-0514-7.
- [242] Y. Jiang, M. Lawrence, A. Hussain, M. Ansell, P. Walker, Comparative moisture and heat sorption properties of fibre and shiv derived from hemp and flax, *Cellulose.* 26 (2019) 823–843. doi:10.1007/s10570-018-2145-0.
- [243] M. Pazera, M. Salonvaara, Examination of Stability of Boundary Conditions in Water Vapor Transmission Tests, *J. Build. Phys.* 33 (2009) 45–64. doi:10.1177/1744259109103228.
- [244] P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, J. Lackey, D. van Reenen, Water Vapor Transmission Measurement and Significance of Corrections, *Heat-Air-Moisture Transp. Meas. Build. Mater.* (2007). doi:10.1520/STP45402S.
- [245] O. Vololonirina, B. Perrin, Inquiries into the measurement of vapour permeability of permeable materials, *Constr. Build. Mater.* 102 (2016) 338–348. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.126.
- [246] R.E. Clarke, B. Shabani, G. Rosengarten, Interface resistance in thermal insulation materials with rough surfaces, *Energy Build.* 144 (2017) 346–357. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.012.
- [247] S. Yoon, D.E. Macphee, M.S. Imbabi, Estimation of the thermal properties of hardened cement paste on the basis of guarded heat flow meter measurements, *Thermochim. Acta.* 588 (2014) 1–10. doi:10.1016/j.tca.2014.04.015.
- [248] D.A. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media*, n.d.
- [249] M.N. Ozisik, *Thermal Radiation Transfer and Interactions with Conduction and Convection*, (1973).
- [250] T. Colinart, T. Pierre, P. Glouannec, Prise en compte des transferts de masse dans la détermination de la conductivité thermique de matériaux bio-sourcés, in: *Congrès Société Fr. Therm.*, Gérardmer, France, 2013: p. 1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01019264> (accessed September 25, 2019).
- [251] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, G. Promis, B. Laidoudi, A. Crigny, B. Dupre, T. Langlet, Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity, *Energy Build.* 88 (2015) 91–99. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.043.
- [252] M. Rahim, O. Douzane, A.D. Tran Le, T. Langlet, Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials, *Constr. Build. Mater.* 111 (2016) 119–127. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061.
- [253] DTU 23.1 - Murs en béton banché DTU 23 - Ouvrages en béton Liste, (n.d.). <https://www.batirama.com/article/12054-dtu-23.1-murs-en-beton-banche.html> (accessed September 26, 2019).
- [254] DTU 21 - Exécution des ouvrages en béton DTU 21 - Béton armé, (n.d.). <https://www.batirama.com/article/12088-dtu-21-execution-des-ouvrages-en-beton.html> (accessed September 26, 2019).
- [255] F. Centre technique du bois et de l'ameublement (Paris, Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois (DTU), Centre technique du bois et de l'ameublement, Paris, 1989.

- [256] TRONET-CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MATERIAUX CHAUX-CHANVRE INFLUENCE DU COMPACTAGE SUR LES PROPRIETES.pdf, (n.d.).
- [257] J. Chamoin, Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, INSA de Rennes, 2013. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00934732/> (accessed October 20, 2016).
- [258] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 50–56. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
- [259] T.T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, (2014) 169.
- [260] V. Nozahic, Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce / chaux, n.d.
- [261] J.-M. Torrenti, G. Pijaudier-Cabot, J.-M. Reynouard, Mechanical Behavior of Concrete, John Wiley & Sons, 2013.
- [262] P. Tronet, V. Picandet, T. Lecompte, C. Baley, Beton de chanvre : Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique., (2011).
- [263] S. Amziane, L. Arnaud, Bio-aggregate-based Building Materials, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Great Britain and the United States, 2013.
- [264] A.H.K. Long, Analyse du comportement dynamique d'un élastomère : modélisation et identification, (2005). <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001265> (accessed August 23, 2019).
- [265] W.-Y. Jang, S. Kyriakides, On the crushing of aluminum open-cell foams: Part I. Experiments, *Int. J. Solids Struct.* 46 (2009) 617–634. doi:10.1016/j.ijsolstr.2008.09.008.
- [266] C. Baux, M. Laurans, A. Pierre, M. Guillaume, J. Guilbert, C. Lanos, M. A. Phelipot, Performances des Ciments Sur-Sulfatés, (2011). <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/557> (accessed August 22, 2019).
- [267] H. Danso, MICRO-ANALYSIS ON THE INTERNAL STRUCTURE OF FIBRE-SOIL COMPOSITE, (n.d.) 7.
- [268] G. Dreux, J. Festa, NOUVEAU GUIDE DU BETON ET DE SES CONSTITUANTS., 1998. <https://www.decitre.fr/livres/nouveau-guide-du-beton-et-de-ses-constituants-9782212102314.html> (accessed September 16, 2019).
- [269] N. Meimaroglou, C. Mouzakis, Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars, *Constr. Build. Mater.* 221 (2019) 27–39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.036.
- [270] D. Ciancio, P. Jaquin, P. Walker, Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 40–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049.
- [271] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 211–222. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026.
- [272] M. Sinka, G. Sahmenko, A. Korjamins, Mechanical Properties of Pre-Compressed Hemp-Lime Concrete, *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.* 8 (2014) 92–99. doi:10.5755/j01.sace.8.3.7451.
- [273] Z. Christoph, T. Frank, Physique du Bâtiment. Construction et énergie, VDF, 2014. <https://www.decitre.fr/livres/physique-du-batiment-9783728134455.html> (accessed September 24, 2019).

ANNEXES

1.1 MÉTHODE DE CARACTÉRISATION DES TERRES

1.1.1 GRANULOMÉTRIE LASER VS PIPETTE

La Figure 0-1 présente les comparaisons, à 3 diamètres différents de particules (2µm, 20µm et 50µm), de résultats entre sédimentométrie à la pipette et de granulométrie laser.

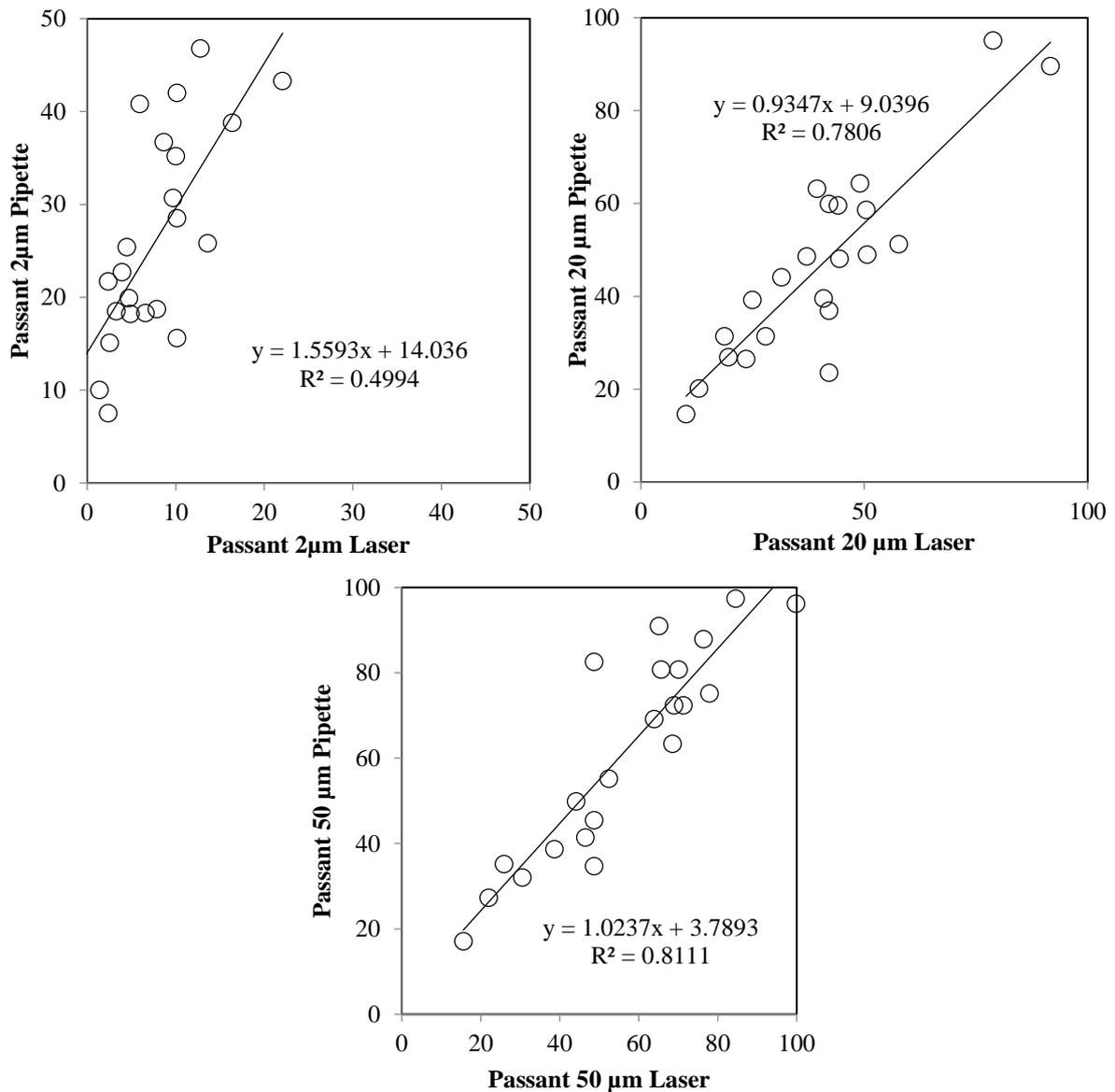


Figure 0-1: Comparaison des passants à 2µm, 20µm et 50µm de l'analyse granulométrique par méthode pipette et Laser

1.1.2 COMPARAISON CEC – VBS

La Figure 0-2 présente les comparaisons de résultats de caractérisation des argiles selon les méthodes de bleu de méthylène (MBV) et de capacité d'échange cationique (CEC), sur l'ensemble des 28 terres.

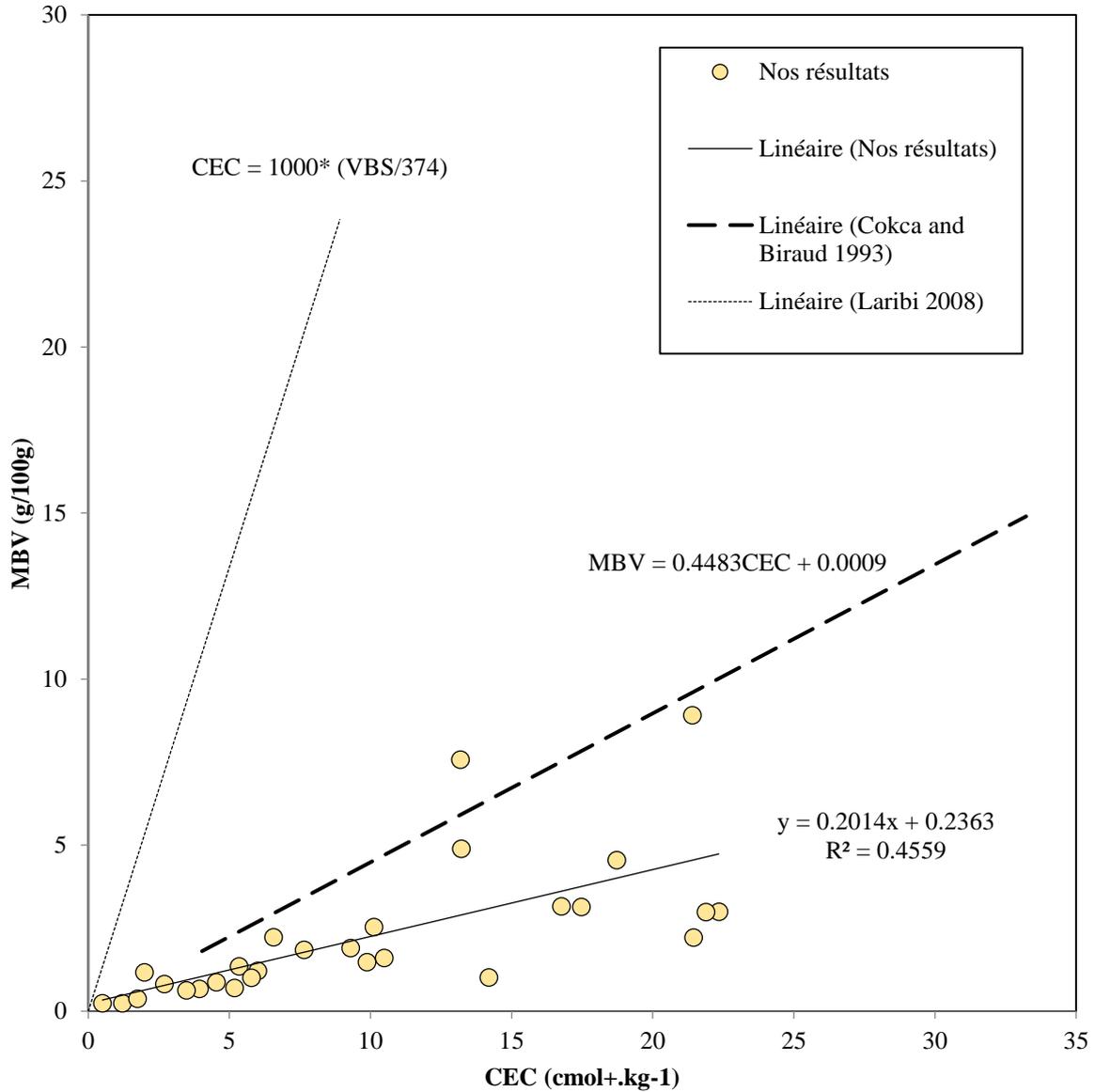


Figure 0-2: Comparaison des résultats de valeur au bleu (MBV) et de Capacité d'échange cationique (CEC)

1.1.3 PROTOCOLE DE QUANTIFICATION DRX

La Figure 0-3 présente, sous forme d'enchaînement de diagrammes, le principe de croisement de données pour établir une quantification des espèces minéralogiques argileuses. Ici, le croisement est réalisé entre les résultats de DRX et d'analyse chimique par ICP.

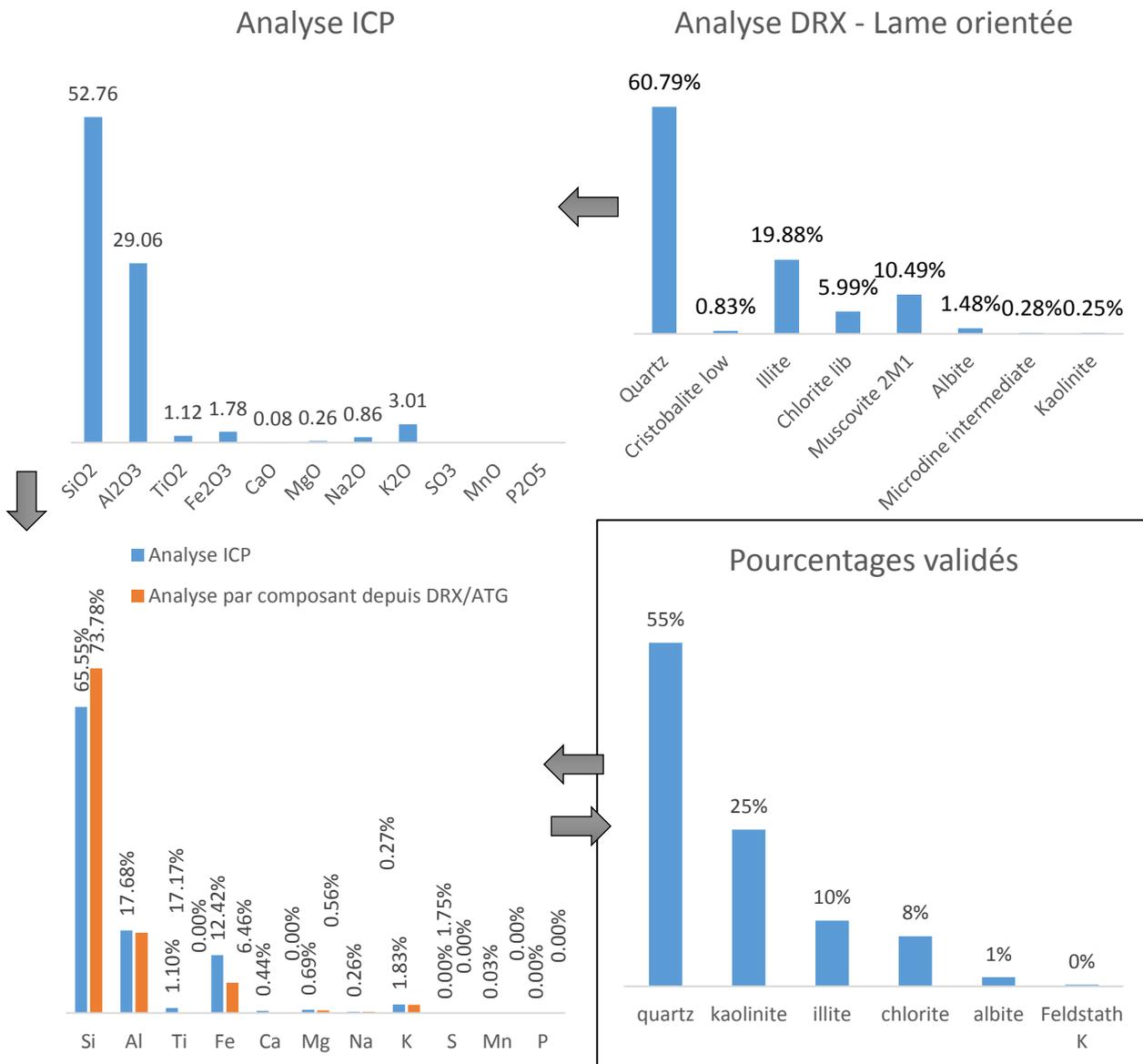


Figure 0-3: Principe de recherche de la quantification des minéraux argileux par croisement d'analyse ICP et DRX. Exemple de la terre de référence T1

1.1.4 COURBES TYPES DRX, ATG ET ANALYSES ICP

La Figure 0-4 présente premièrement un exemple de courbe DRX obtenu sur la terre de référence T1, depuis l'échantillon en lame orientée, puis un exemple depuis un échantillon en poudre dispersé.

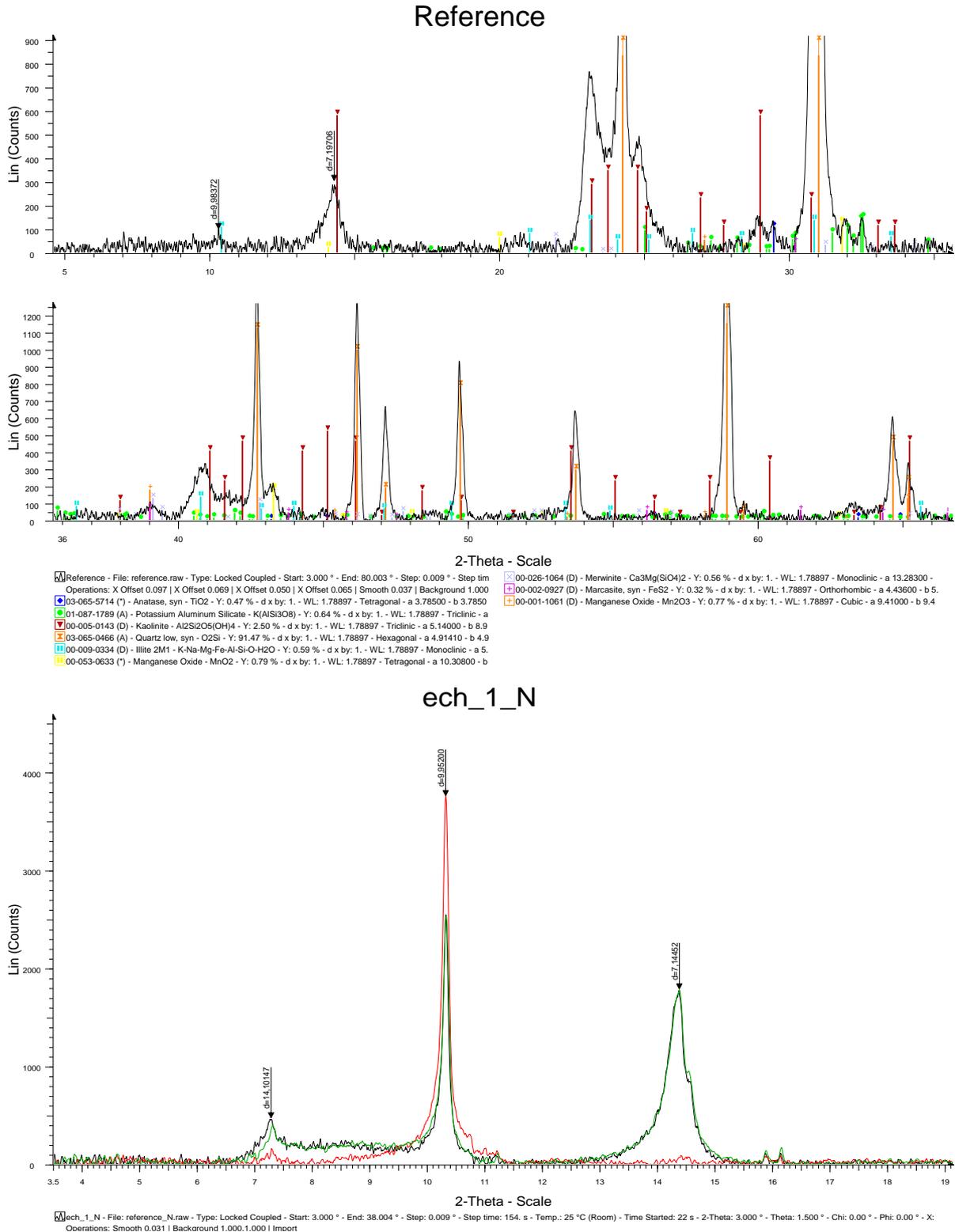
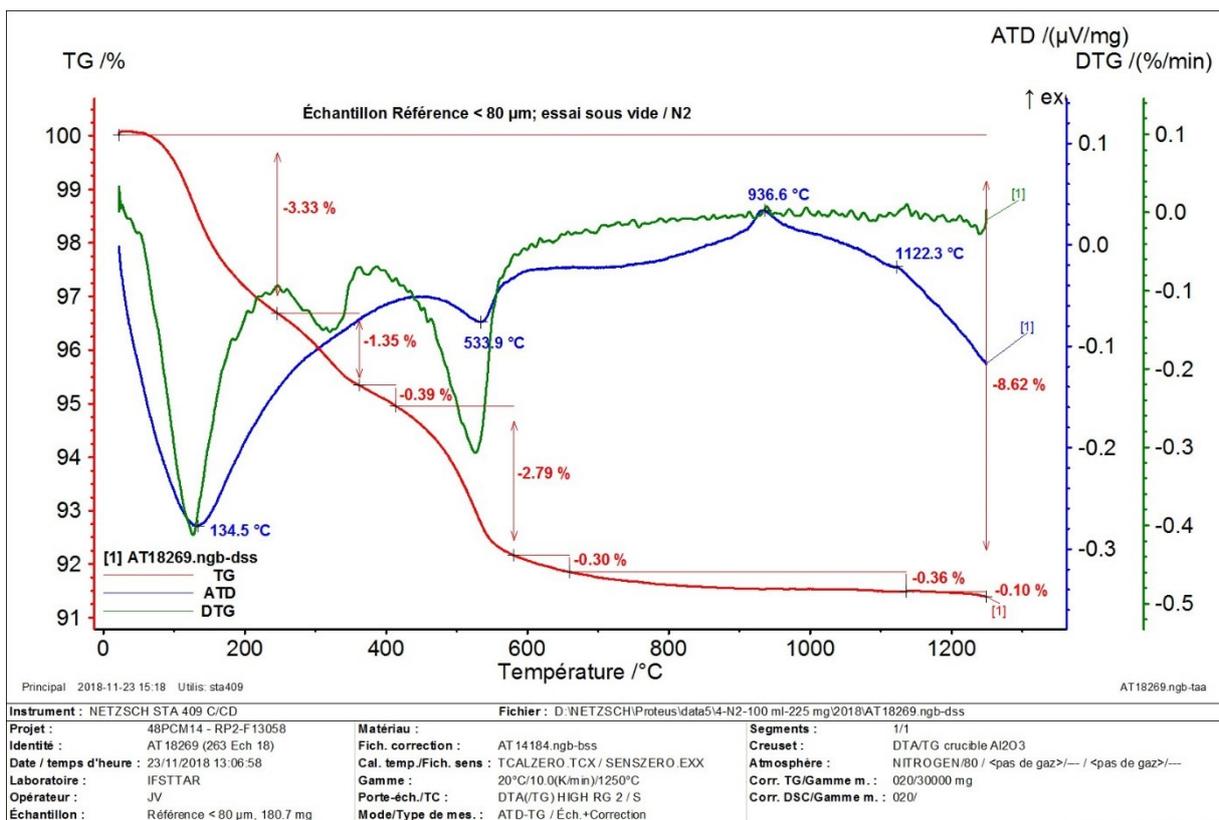
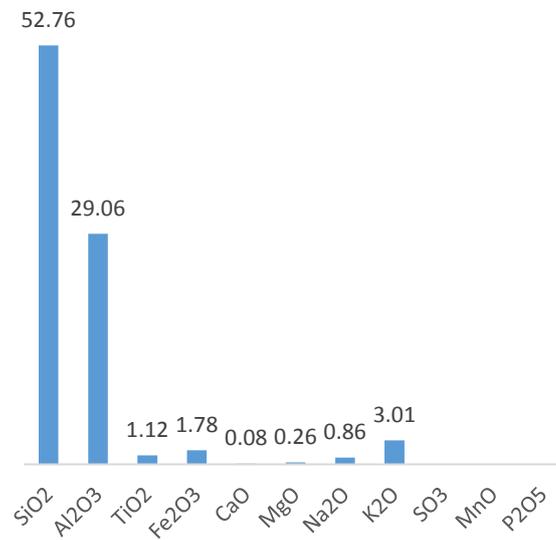


Figure 0-4: Exemple de courbes DRX. De haut en bas : première partie de courbe sur lame orientée ; seconde partie de la courbe de lame orientée : courbe de poudre dispersé.

Les figures ci-dessous représentent les résultats d'analyse ICP obtenu sur la terre de référence T1, ainsi que ses résultats d'ATG.



1.2 PARAMÈTRES DE MODÉLISATION DU COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE

Le Tableau 0-1 présente, pour les 6 terres, l'ensemble des paramètres du modèle, ainsi que les fractions volumiques de chaque élément considéré, et les résultats expérimentaux et du modèle.

Tableau 0-1 : Paramètre de calcul du modèle Yodel sur le comportement rhéologique des 6 terres.

Earth	Model parameters		Solid volume fraction			Tau (0) (Pa)	
			Total	Sand	Silt+Clay	Experimental	Model
T6			0.37	0.01	0.36		18151.00
			0.35	0.01	0.34		2761.10
	m1	704	0.30	0.01	0.29	505.19	505.53
	phim sand	0.56	0.23	0.01	0.22	120.79	112.12
	phiMax silt+	0.36828749	0.20	0.01	0.19	49.23	58.34
	phi0	0.026	0.16	0.00	0.16	22.86	26.94
	A (%)	46.8	0.15	0.00	0.15	14.98	18.88
	L (%)	50.6	0.13	0.00	0.13	4.60	10.55
	S (%)	2.6	0.05	0.00	0.05		0.15
T5			0.52	0.16	0.43	1851.85	19111.49
			0.46	0.14	0.37	1310.97	3167.87
	m1	2299.075	0.34	0.11	0.27	463.98	464.36
	phim sand	0.55786227	0.28	0.09	0.21	172.10	171.09
	phiMax silt+	0.4495498	0.24	0.07	0.18	87.02	81.91
	phi0	0.026	0.20	0.06	0.15	36.77	42.60
	A (%)	38.8	0.18	0.05	0.13	17.13	22.96
	L (%)	30.4	0.15	0.05	0.11	7.98	11.66
	S (%)	30.8	0.11	0.04	0.08	2.35	3.68
T2			0.62	0.51	0.22		1367.04
			0.59	0.49	0.20	948.25	579.50
			0.55	0.46	0.17		232.98
	m1	970.802918	0.53	0.44	0.16	156.99	155.97
	phim sand	0.55490224	0.46	0.38	0.13	28.19	43.29
	phiMax silt+	0.3	0.32	0.26	0.07	5.45	3.27
	phi0	0.026	0.33	0.27	0.08	2.51	4.11
	A (%)	10	0.29	0.24	0.06	5.37	1.71
	L (%)	7.1	0.20	0.17	0.04		0.13
S (%)	82.9	0.10	0.08	0.02		0.01	
T4			0.35	0.07	0.30		-165.61
	m1	86.3061959	0.32	0.06	0.28	827.14	-235.86
	phim sand	0.56	0.26	0.05	0.22	110.60	110.66
	phiMax silt+	0.25237407	0.22	0.04	0.18	23.59	23.38
	phi0	0.026	0.19	0.04	0.15	8.30	9.31
	A (%)	18.2	0.16	0.03	0.14	1.68	4.80
	L (%)	62.6	0.10	0.02	0.08		0.53
	S (%)	19.2	0.05	0.01	0.04		0.01
							0.00
T3			0.52	0.23	0.37		-401.24
			0.50	0.22	0.36		-484.73
	m1	116.8895	0.47	0.21	0.33	1251.39	-1314.61
	phim sand	0.557843	0.44	0.20	0.30	592.33	592.37
	phiMax silt+	0.318829	0.30	0.13	0.19	18.38	16.32
	phi0	0.026	0.23	0.10	0.14	4.75	4.42
	A (%)	22.7	0.18	0.08	0.11	2.31	1.52
	L (%)	32.5	0.16	0.07	0.10	1.13	0.79
	S (%)	44.8	0.16	0.07	0.09	0.17	0.75
		0.05	0.02	0.03		0.00	
T1			0.43	0.07	0.38	1103.85	1759.92
			0.39	0.07	0.35	546.39	547.45
	m1	380.572453	0.34	0.06	0.30	197.37	207.52
	phim sand	0.56	0.34	0.06	0.30	222.44	204.69
	phiMax silt+	0.41034572	0.27	0.04	0.23	43.25	52.33
	phi0	0.026	0.24	0.04	0.20	23.32	30.21
	A (%)	22.7	0.22	0.04	0.19	13.51	20.88
	L (%)	32.5	0.18	0.03	0.16	4.64	10.00
	S (%)	44.8	0.17	0.03	0.15	4.08	7.96
		0.16	0.03	0.14	2.61	5.69	
		0.13	0.02	0.11	0.71	2.17	

1.3 COURBES DE SORPTION DES MATÉRIAUX

1.3.1 VARIABILITÉ DES TERRES ET DES CHANVRES

La Figure 0-5 présente la variabilité de comportement hygrique en sorption des terres (à gauche) et des chanvres (à droite). Les valeurs présentées ici correspondent à un essai de sorption gravimétrique après séchage à 40°C et 20% HR.

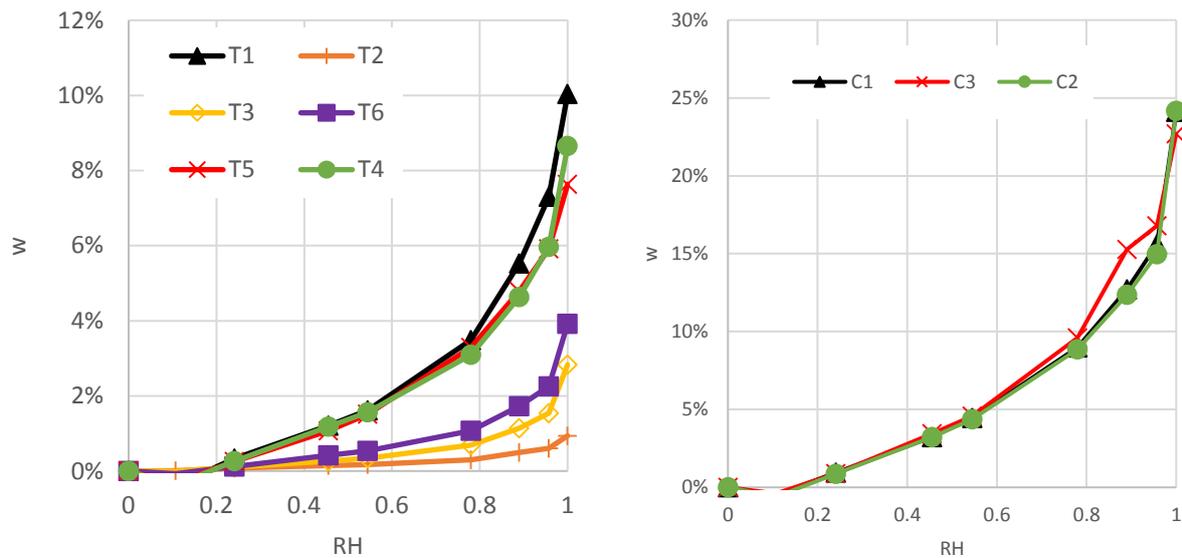


Figure 0-5: Courbes de sorption des matériaux constitutifs: à gauche, les 6 terres, à droite les 3 chanvres

1.3.2 INFLUENCE DU CONDITIONNEMENT

La Figure 0-6 présente les isothermes de sorption de la terre de référence (T1) et d'une chènevotte (C1) pour différents protocoles de séchage. La Figure 0-7 présente les isothermes de sorption de ces mêmes matériaux, selon différentes techniques de mesure. Y sont inclus des résultats obtenus avec la DVS (1) présentée en chapitre 5, et avec la DVS (2) présentée en chapitre 1.

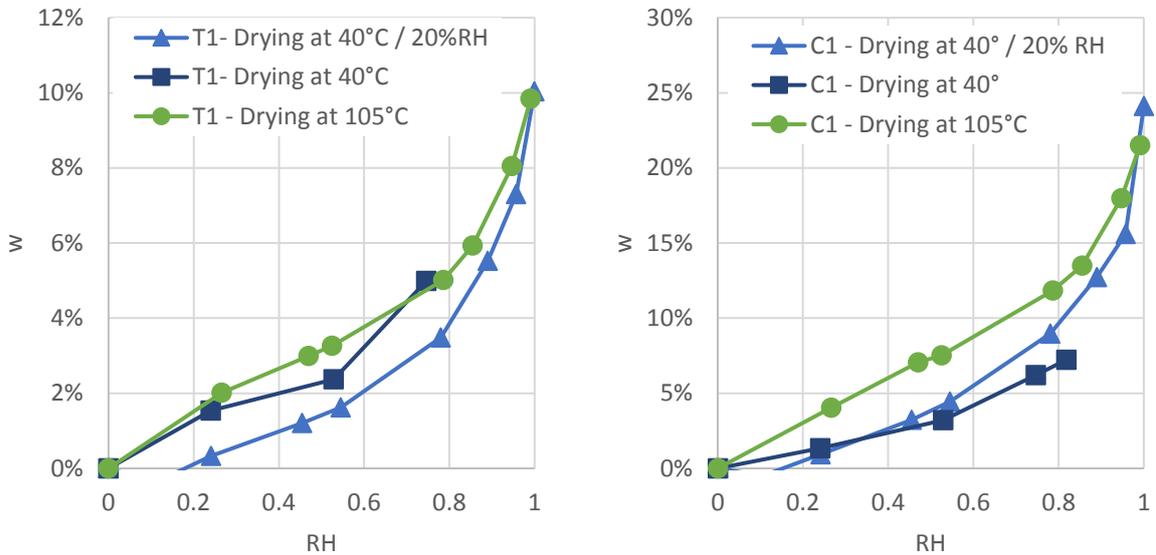


Figure 0-6: Isothermes de sorption de la terre de référence (T1) à gauche, et de chènevotte (c1) à droite, pour différents protocoles.

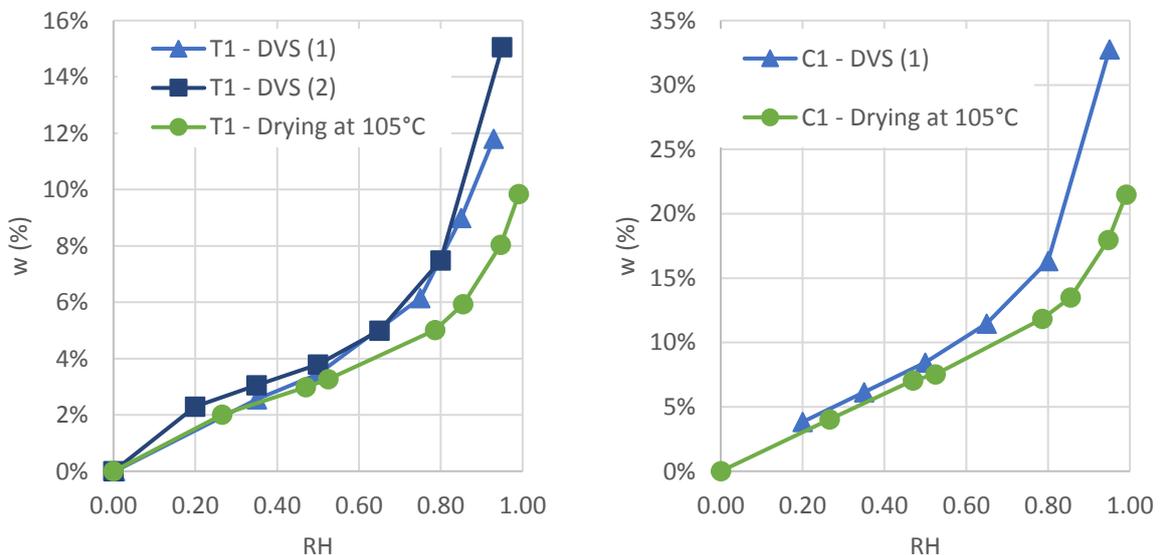


Figure 0-7: Isothermes de sorption de la terre de référence (T1) et de chènevotte (C1) selon les techniques de mesure.

1.3.3 LOI DE MÉLANGE

La Figure 0-8 présente les isothermes de sorption des formulation T1C1 et T4C1a. Les valeurs expérimentales et les valeurs obtenus par loi de mélange y sont comparées, en fonction du la méthode de préparation des échantillons.

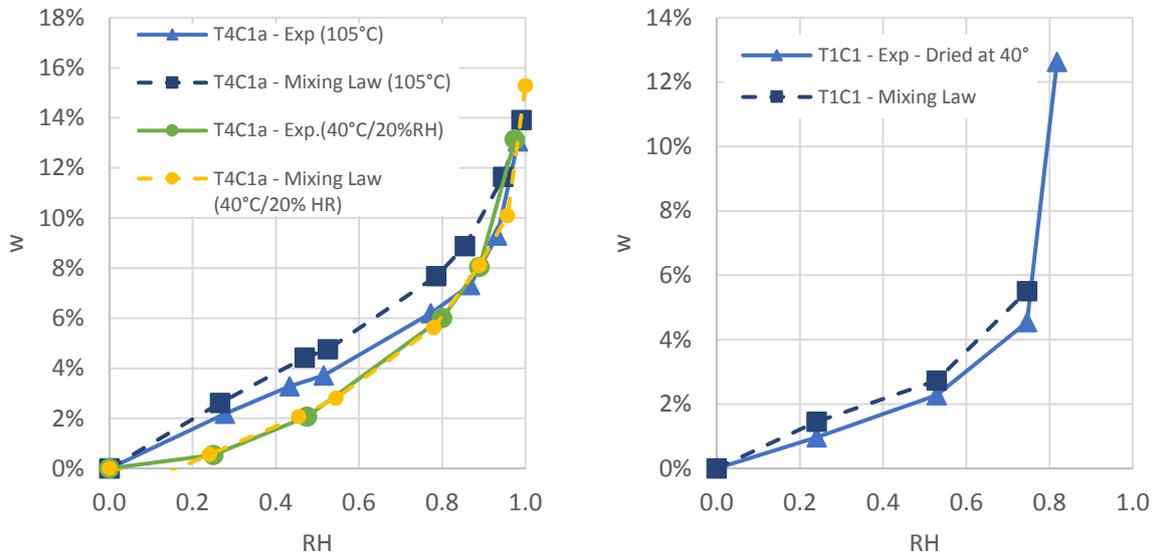


Figure 0-8: Comparaison des courbes de sorption isotherme de formulation, T4C1a à gauche et T1C1 à droite, en fonction des valeurs expérimentales ou obtenues avec une loi de mélange.

1.4 ENSEMBLE DE RÉSULTATS DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE

Le Tableau 0-2 présente les résultats de comportement mécanique de l'ensemble des formulations. Ces valeurs correspondent à des essais sur cylindre. Les limites d'élasticité sont calculées avec les déformations de l'ensemble du cylindre. Les modules d'élasticité sécants sont calculés avec les déformations mesurées à l'extensomètre.

Tableau 0-2: résultats expérimentaux du comportement mécanique de l'ensemble des formulations testées

Formulation	Limite d'élasticité		Module d'élasticité sécant		Coeff de Poisson		Masse volumique		Compacité moyenne		C/T
	Moy (Mpa)	Ecart type (Mpa)	Moy (Mpa)	Ecart type (Mpa)	Moy (-)	Ecart type (-)	Moy (kg.m-3)	Ecart type (Mpa)	Moy (-)	Ecart type (-)	
T1C1	0.19	0.03	33	9.10	0.006	0.002	342	3.8	0.18	0.002	0.80
T1C2	0.18	0.01	15	4.49	0.009	0.003	333	2.9	0.17	0.001	0.86
T1C3	0.16	0.00	31	12.09	0.007	0.003	344	1.5	0.18	0.001	0.80
T1C1(S2)	0.17	0.01	18	1.45	0.020	0.013	402	2.9	0.19	0.001	0.48
T1C1(S1)	0.23	0.01	24	2.79	0.007	0.005	352	6.4	0.18	0.003	0.70
T1C1(F)	0.16	0.00	8	0.32	0.008	0.001	256	2.2	0.14	0.001	1.23
T1C1(F+S1)	0.17	0.01	10	1.34	0.013	0.001	266	4.1	0.14	0.002	1.07
T6C1-Y	0.15	0.00	26	1.55	0.013	0.002	295	4.7	0.15	0.002	0.83
T5C1-Y	0.20	0.00	18	1.08	0.006	0.002	304	1.4	0.16	0.001	0.76
T4C1-Y	0.17	0.00	29	2.90	0.034	0.006	342	1.4	0.17	0.001	0.66
T3C1-Y	0.16	0.01	22	4.37	0.034	0.032	315	9.7	0.16	0.005	0.80
T2C1-Y	0.15	0.00	6	0.15	0.013	0.002	302	2.5	0.16	0.001	0.77
T6C1-W	0.16	0.00	20	1.01	0.018	0.002	306	2.0	0.16	0.001	0.84
T5C1-W	0.16	0.00	15	0.95	0.009	0.006	291	2.4	0.15	0.001	0.84
T4C1-W	0.18	0.01	10	0.56	0.010	0.003	295	1.2	0.15	0.001	0.81
T3C1-W	0.15	0.01	10	0.16	0.041	0.029	286	7.8	0.15	0.004	0.80
T2C1-W	0.16	0.00	6	0.00	0.012	0.002	232	23.1	0.14	0.014	2.22

