

Formulation d'un liant pouzzolanique pour la confection d'un béton végétal hygroscopique

par

Philippe FORTIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 8 SEPTEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Philippe FORTIN, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

*Je dédie ce mémoire en l'hommage à ma grand-mère maternelle
Murielle Tremblay Sénécal
pour son amour immense qu'elle nous a donné et son éternel soutien.*

*« La vie, c'est un combat continu. »
- Murielle Tremblay Sénécal
(1939-2019)*

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Vaillancourt, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 10 AOÛT 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon complice, Maxime, qui m'a introduit au monde des bâtiments écologiques et qui a été la souche même de toute l'inspiration derrière cette recherche. L'ambition et la vision qu'il a pu m'amener dans l'approfondissement de mes connaissances lui reviennent. Grâce à lui, j'ai découvert une vraie passion concernant les bâtiments durables et les matériaux à faible impact environnemental. J'aimerais remercier mon partenaire, Pierre, d'avoir cru en moi et d'avoir aussi bien collaboré du début jusqu'à la fin.

J'aimerais remercier ensuite la contribution incroyable de l'étudiant doctorant, Victor, qui a su me diriger dans mes réflexions et m'avoir enseigné les méthodes les plus adaptées pour ma recherche. Ces connaissances transmises m'ont permis de développer le profil de chercheur que je suis devenu aujourd'hui. J'aimerais remercier mon collègue à la maîtrise, Thomas, pour son soutien et ses conseils dans mon projet tout au long de cette recherche. J'aimerais remercier les techniciens de laboratoire notamment Mauricio, Sylvain et Michael pour leur patience et pour m'avoir épaulé tout au long de ce projet de recherche malgré les difficultés de mon sujet hors de l'ordinaire. J'aimerais remercier également Jean-Claude de m'avoir permis d'utiliser son montage et son logiciel pour la bonne réalisation de mes essais de laboratoire. J'aimerais remercier aussi l'étudiant au postdoctorat, Mathieu, pour son aide dans la bonne réalisation de mes derniers essais de laboratoire.

J'aimerais remercier enfin ma codirectrice, Claudiane, qui a su continuellement m'aider à développer mon approche de chercheur tout en respectant un échéancier rigoureux. Également, un remerciement tout singulier à mon directeur de maîtrise, Daniel, pour son impressionnante aptitude d'enseignement et de toute la rigueur qu'il a su m'amener dans ce travail. La confiance qu'il a su me donner dès le premier jour jusqu'au dernier est tout à fait incroyable et digne d'un grand chercheur. J'en serai éternellement reconnaissant.

Finalement, j'aimerais remercier mes parents, ma sœur, ma copine et mes amis de m'avoir soutenu de près ou de loin tout au long de cette maîtrise. Je les remercie d'avoir cru en moi et en mes aptitudes, le tout porté par mon ambition de faire un changement dans mon domaine, soit la construction des bâtiments pour un avenir plus sain et écoresponsable.

Formulation d'un liant pouzzolanique pour la confection d'un béton végétal hygroscopique

Philippe FORTIN

RÉSUMÉ

Les changements climatiques poussent à revoir la façon de construire les bâtiments afin de limiter les gaz à effet de serre (GES). Un bâtiment émet des GES depuis l'extraction des matériaux, au cours de son opération et jusqu'à sa disposition en fin de vie. L'utilisation des isolants d'origine pétrochimique et minérale va à l'encontre des devoirs sociétaux de réduction des GES. Un matériau au grand potentiel est le béton de chanvre composé d'un liant à base de chaux, de chanvre et d'eau. Le chanvre est une plante qui se récolte lors de chaque saison de culture. Celle-ci permet de séquestrer rapidement le dioxyde de carbone (CO_2), un GES, jusqu'à quatre fois plus qu'un arbre selon certaines études. Par ailleurs, le béton de chanvre a la capacité de réguler l'humidité et la température de façon naturelle dans un bâtiment par la capacité d'absorption du béton de chanvre amenant ainsi un confort pour les résidents. Le béton de chanvre est un bon isolant thermique, recyclable, ininflammable, répulsif naturel contre les nuisibles et protège contre les moisissures du bois. Il existe actuellement deux entreprises québécoises qui se spécialisent dans la construction de maisons clé en main en béton de chanvre. Les méthodes de constructions restent toutefois artisanales et nécessitent beaucoup de main-d'œuvre. L'importation de liant formulé ou de chaux hydraulique naturelle commercialisée en Europe rend le matériau de béton végétal de chanvre inaccessible et non viable pour le marché nord-américain. L'objectif visé dans la recherche proposée est d'étudier la possibilité de formuler un liant adapté au béton végétal de chanvre à l'aide des matériaux disponibles en Amérique du Nord limitant toutefois l'ajout de liant hydraulique fort émetteur de GES. Le travail porte sur l'optimisation de la cure par des approches théoriques provenant de la littérature en étudiant les phases hydratées produites dans le liant pouzzolanique formulé ainsi que l'optimisation des proportions des constituants pour répondre aux diverses hypothèses de recherche. Un regard critique sur l'optimisation du liant formulé sera porté sur l'impact du liant sur le caractère hygroscopique de régulation d'humidité du matériau composite final. Les résultats obtenus de l'optimisation du liant renvoient à promouvoir l'utilisation d'un liant pouzzolanique à base de chaux et de métakaolin en formule binaire. Malgré les résultats obtenus supportant l'idée d'un plus grand volume capillaire des pores connectés pour un liant pur pouzzolanique ternaire formulé avec un ratio massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Si/Al) plus élevé, les propriétés hygroscopiques des bétons végétaux de régulation d'humidité ne semblent pas être dépendantes de ce paramètre de conception du liant. Malgré la variabilité dans les proportions de la formulation du liant, la chènevotte de chanvre semble être l'élément prépondérant du caractère hygroscopique du matériau selon l'approche proposée. Dès lors, la retombée de cette recherche permet donc de mieux accepter l'utilisation d'une formulation binaire chaux-métakaolin pour l'élaboration de bétons végétaux de chanvre. La formulation binaire proposée bénéficiera la mise en place par une plus grande cohésion initiale du matériau.

Mots-clés : Béton végétal, chanvre, matériaux biosourcés, liant pouzzolanique, comportement hygroscopique, écologique

Study of the formulation of an optimized pozzolanic binder for the preparation of a hygroscopic plant-based concrete for building insulation

Philippe FORTIN

ABSTRACT

Climate change is driving the need to rethink the way buildings are constructed to limit greenhouse gas (GHG) emissions. A building emits GHGs from the extraction of materials, during its operation and until its disposal at the end of its life. The use of petrochemicals and mineral-based insulation materials goes against the societal duty to reduce GHGs. A material with great potential is the hemp concrete composed of a lime-based binder, hemp hurd and water. Hemp is a plant that can be harvested during each growing season. It can quickly sequester carbon dioxide (CO₂), a GHG, up to four times more than a tree according to studies. In addition, hemp concrete can regulate humidity and temperature in a natural way in a building through the absorption capacity of hemp concrete, thus bringing comfort to the residents. Hemp concrete is a good thermal insulator, recyclable, non-flammable, natural pest repellent and protects against wood mould. There are currently two Quebec companies that specialize in the construction of turnkey hemp concrete homes. However, the construction methods remain artisanal and require a lot of labor. The importation of formulated binders or natural hydraulic lime marketed in Europe makes hemp plant-based concrete material inaccessible and unviable for the North American market. The objective of the proposed research is to study the possibility of formulating a binder adapted to vegetal hemp concrete using materials available in North America, while limiting the addition of hydraulic binder, which is a major GHG emitter. The work focuses on optimizing the curing process using theoretical approaches from the literature by studying the hydrated phases produced in the pozzolanic binder formulated as well as optimizing the proportions of the constituents to meet the various research hypotheses. A critical look at the optimization of the formulated binder will be taken on the impact of the binder on the hygroscopic character of moisture regulation of the final composite material. The results obtained from the optimization of the binder will promote the use of a pozzolanic binder based on lime and metakaolin in binary formula. Despite the results obtained supporting the idea of a larger capillary volume of connected pores for a pure ternary pozzolanic binder formulated with a higher SiO₂/Al₂O₃ (Si/Al) mass ratio, the hygroscopic properties of moisture regulating plant-based concretes do not appear to be dependent on this binder design parameter. Despite the variability in the proportions of the binder formulation, the hemp hurd seems to be the dominant element of the hygroscopic characteristics of the material according to the proposed approach. Therefore, the outcome of this research allows a better acceptance of the use of a binary lime-metakaolin formulation for the elaboration of hemp plant-based concretes. The proposed binary formulation will benefit placement through greater initial cohesion of the material.

Keywords: Vegetal concrete, hemp, biosourced materials, pozzolanic binder, hygroscopic behavior, ecological.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	29
CHAPITRE 1 Revue de la littérature.....	34
1.0 Les matériaux biosourcés.....	34
1.0.1 Avantages.....	35
1.0.2 La structure des végétaux.....	35
1.0.2.1 Le bois.....	35
1.0.2.2 Le chanvre.....	36
1.0.3 Sources des végétaux	39
1.0.3.1 Les graminées	40
1.0.3.2 Les oléagineux	40
1.1 Le béton végétal de chanvre	41
1.1.1 Le ciment Portland.....	42
1.1.1.1 La chimie du ciment.....	42
1.1.1.2 L'hydratation.....	43
1.1.2 La réaction pouzzolanique	44
1.1.2.1 Chaux libre hydratée	44
1.1.2.2 Les hydrates	45
1.1.2.3 Les carbonates.....	47
1.1.3 La pâte de chaux	48
1.1.3.1 L'approvisionnement en chaux.....	49
1.1.4 Matériau de construction.....	50
1.1.4.1 Granulat de chanvre	51
1.1.4.2 Les liants	53
1.1.5 Les interactions des composantes chanvre-liant-eau	54
1.1.5.1 Mécanisme de réactivité de la chaux aérienne.....	54
1.1.5.2 Mécanisme de réactivité de la chaux hydraulique/ciment naturel à prise rapide	56
1.1.5.3 Comportement de la chènevotte en présence d'eau	56
1.1.5.4 Comportement de la chènevotte en présence des particules du liant	57
1.1.5.5 Interaction entre la chènevotte et le liant saturé d'eau.....	58
1.1.6 La macrostructure	59
1.1.7 Propriétés hydriques.....	61
1.1.7.1 En cours de séchage	62
1.1.7.2 Après séchage	62
1.2 Pouzzolanes disponibles en Amérique du Nord	64
1.2.1 Poudre de verre	64
1.2.2 Perlite expansée	65
1.2.3 Zéolithe	66
1.2.4 Terres diatomées	66

1.2.5	Métakaolin	67
1.2.6	Laitier de haut fourneau	71
1.2.7	Boue de désencrage.....	72
1.3	Chaux aérienne calcique	72
1.4	Chaux hydraulique naturelle	75
1.5	Bilan du chapitre	77
CHAPITRE 2 Objectifs et méthodologie de recherche		79
2.0	Objectifs	79
2.1	Élaboration d'une formulation du liant optimisé d'après la littérature	80
2.1.1	Le métakaolin comme pouzzolane.....	81
2.1.2	Formulation théorique optimisée d'un liant pour le béton végétal de chanvre	87
2.2	Vers une approche basée sur une formulation d'un mélange ternaire pouzzolanique	90
2.3	Synthèse du plan expérimental et des types de caractérisation.....	92
CHAPITRE 3 Matériaux et méthodes d'essai		96
3.0	Matériaux	96
3.0.1	Composition chimique	96
3.0.2	Nomenclature des matières premières disponibles	98
3.1	Méthode de caractérisation des matières premières minérales	98
3.1.1	Masse volumique apparente tassée et absolue	98
3.1.2	Granulométrie laser.....	99
3.1.3	Prise de pH.....	100
3.2	Méthodes de caractérisation des pâtes de chaux à l'état frais et l'état durci	101
3.2.1	Pâte de chaux fraîche	101
3.2.1.1	Méthode de mélange et de mise en moule	102
3.2.1.2	Essai d'étalement	104
3.2.1.3	Essai de teneur en air et masse volumique apparente	105
3.2.1.4	Essai de rétention d'eau	106
3.2.1.5	Mesure de la réactivité pouzzolanique par calorimétrie isotherme.....	107
3.2.2	Pâte de chaux durcie	109
3.2.2.1	Conservation des éprouvettes après démoulage	109
3.2.2.2	Compression mécanique à la presse hydraulique	110
3.2.2.3	Porosité ouverte à l'eau par immersion	111
3.2.2.4	Analyse thermogravimétrique (TGA/DTG)	113
3.3	Caractérisation de la réactivité des pouzzolanes.....	115
3.3.1	Réactivité à 40°C	116
3.3.2	Calcination de la boue de désencrage reçue	117
3.3.3	Réactivité à 23°C	117
3.4	Méthodes de caractérisation des bétons végétaux de chanvre	119
3.4.1	Méthode pour évaluer la Valeur de la Capacité de Tampon Hydrique (VCTH ou MBV).....	119

3.4.2	Autres méthodes de caractérisation physique, hydrique, thermique et acoustique	122
CHAPITRE 4 Résultats de caractérisation des formulations optimisées		124
4.1	SÉRIE 1	125
4.1.1	Résultats de calorimétrie isotherme à 40°C	125
4.1.2	Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport Ca/(Si+Al) égale à 1	126
4.1.3	Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport Ca/(Si+Al) supérieur à 1	127
4.1.4	Résistance à la compression.....	128
4.1.5	Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport Ca/(Si+Al) égale à 1	129
4.1.6	Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport Ca/(Si+Al) supérieur à 1	130
4.1.7	Porosité ouverte à l'eau par immersion	131
4.1.8	Choix de la pouzzolane secondaire.....	133
4.2	SÉRIE 2	134
4.2.1	Résultats de calorimétrie isotherme à 23°C	134
4.2.2	Résistance à la compression à 28 jours sur pâtes durcies	136
4.2.3	Porosité ouverte des pâtes pouzzolaniques de chaux.....	139
4.2.4	Impact de l'eau biologique sur la réactivité en calorimétrie isotherme à 23°C.....	140
4.2.4.1	Le potentiel Hydrogène (pH) de la solution de l'eau de chaux avec les fibres végétales	141
4.2.4.2	Calorimétrie sur pâtes pouzzolaniques de chaux confectionnées avec de l'eau de trempage avec particules de chanvre	143
4.2.4.3	Discussion de l'impact de l'eau biologique sur la réactivité pouzzolanique d'une pâte de chaux-métakaolin	147
4.2.5	Bilan suivant la SÉRIE 1 et la SÉRIE 2	148
4.3	SÉRIE 3	151
4.3.1	Caractérisation physique des poudres minérales de la série 3	151
4.3.2	Caractérisation des formulations ternaires optimisées.....	154
4.3.2.1	Propriétés à l'état frais	158
4.3.2.2	Caractérisation à l'état durci des pâtes de chaux à deux pouzzolanes.....	159
4.3.2.3	Influence de l'eau de trempage sur la résistance mécanique	163
4.3.2.4	Analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) des mélanges avec l'eau de trempage (MW et MG)	166
4.3.2.5	Analyse de la consommation de la chaux libre pour les mélanges MW	169
4.3.2.6	Analyse du taux de carbonates présents pour les mélanges MW	176
4.3.3	Bilan suivant la SÉRIE 3	178

CHAPITRE 5 Caractérisation des bétons végétaux de chanvre	181
5.0 Caractérisation de la matière première végétale	181
5.1 Module d'élasticité dynamique et résistance mécanique à la compression des prismes rectangulaires.....	184
5.2 Caractérisation hydrique des bétons végétaux.....	193
5.3 Caractérisations des blocs rectangulaires.....	196
5.4 Caractérisation thermique et acoustique	198
5.5 Bilan du chapitre	203
CONCLUSION.....	206
RECOMMANDATIONS	211
ANNEXE I Exemples de calculs des formulations optimisées	214
ANNEXE II Méthode et résultats de la calcination de la boue de désencrage reçue	221
ANNEXE III Méthodes de caractérisation des bétons végétaux de chanvre.....	226
ANNEXE IV Fiche technique Chaux calcique éteinte Graymont.....	258
ANNEXE V Protocole d'essais pour la mesure des performances seuils des bétons de chanvre.....	260
BIBLIOGRAPHIE.....	265

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Listes des principaux produits chimiques et composés dans la chimie du ciment	42
Tableau 1.2 Liste des produits d'hydratation (hydrates) formés dans la pâte de ciment.....	43
Tableau 1.3 Liste des produits d'hydratation (hydrates) formés dans une pâte pouzzolanique d'après notamment Siddique & Klaus (2009).....	45
Tableau 1.4 Liste des produits de carbonatation possible formés dans une pâte pouzzolanique de chaux ou de ciment d'après notamment Gameiro & Silva (2012)	48
Tableau 1.5 Composition chimique massique synthèse de la chènevotte de Hustache (2008).....	52
Tableau 1.6 Compositions de certains liants formulés commerciaux disponibles en Europe pour la confection de béton de chanvre tirées de Hirst (2013), Cérézo (2005) et des fabricants	53
Tableau 1.7 Échelle dans la structure porale généralement retrouvée dans les argiles et les matériaux argileux de Wakou (2014).....	67
Tableau 1.8 Comparatif de la composition chimique de la chaux hydratée après analyse (m%)	74
Tableau 2.1 Description des paramètres fixes et variables de la formulation du liant optimisé	91
Tableau 2.2 Synthèse des essais effectués dans ce mémoire de recherche.....	93
Tableau 3.1 Compositions chimiques des pouzzolanes étudiées (% de masse)	97
Tableau 3.2 Composition chimique des types de chaux étudiées (% de masse)	97
Tableau 3.3 Étiquette des matières premières disponibles	98
Tableau 3.4 Méthode de mélange des pâtes de chaux	102
Tableau 3.5 Méthode de mise en moule des pâtes liantes	103
Tableau 4.1 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en calorimétrie à 40°C (E/L=1,0) pour évaluer la réactivité pouzzolanique selon un rapport massique variable $[X = \text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al}) = \{1,0; 1,5 \text{ et } 2,0\}]$	125

Tableau 4.2 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en compression (E/L : variable) pour évaluer la réactivité pouzzolanique	128
Tableau 4.3 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en calorimétrie à 23°C (E/L=1,0) pour évaluer la réactivité pouzzolanique	134
Tableau 4.4 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en compression à 23°C (E/L = variable) pour évaluer la réactivité pouzzolanique	137
Tableau 4.5 pH des solutions aqueuses après 60 min de trempage des fibres végétales (10,0g) en présence de chaux hydratée saturée en solution (concentration de 1,0 g de chaux/100ml)	142
Tableau 4.6 Caractéristiques de la taille des particules des poudres par granulométrie laser.....	153
Tableau 4.7 Caractéristiques intrinsèques des poudres mesurées en laboratoire.....	153
Tableau 4.8 Étiquettes principales des composants des pâtes de chaux ternaires	156
Tableau 4.9 Nomenclature et composition des mélanges ternaires MG réalisés de chaux hydratée calcique (CHX)-métakaolin (MK)-laitier de haut fourneau (GB).....	156
Tableau 4.10 Nomenclature et composition des mélanges ternaires MW réalisés de chaux hydratée calcique (CHX)-métakaolin (MK)-terre diatomée (WL)	157
Tableau 4.11 Résultats de caractérisation des pâtes fraîches de mélanges ternaires sélectionnés.....	158
Tableau 4.12 Validation de la consommation de la chaux libre dans les mélanges pouzzolaniques ternaires MW à 28 jours de cure à 21°C - 95%HR.....	175
Tableau 4.13 Calcul de la masse de carbonates formée dans les mélanges pouzzolaniques ternaires MW à 28 jours de cure à 21°C - 95%HR.....	177
Tableau 5.1 Caractéristiques intrinsèques de la chènevotte reçue mesurées au laboratoire	181
Tableau 5.2 Porosité ouverte à l'eau de la formulation du bloc MW 0-2 après 60 jours de cure.....	198
Tableau 5.3 Évaluation de la conductivité thermique (k) du bloc de formule MW 0-2 après 60 jours de cure	199

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Composantes de la structure du bois a) macroscopique de Ashby & Jones (2014), et b) microscopique de Passas (2008)	36
Figure 1.2 Photos au microscope optique et électronique à balayage (MEB) d'une coupe transversale de la tige de chanvre : a) Vue macroscopique (grossissement x23) de Sauvageau (1995); b) Vue colorée au carmino-vert (grossissement x60) de Sedan (2007); c) Vue microscopique (grossissement x300) de Cérézo (2005)	38
Figure 1.3 Schéma de l'hydratation des grains de ciment dans une pâte de ciment Portland de Pigeon (1981)	44
Figure 1.4 Photo de la chènevotte de Hustache (2008)	51
Figure 1.5 Courbes de sorption-désorption du granulats de chanvre à 20°C de Cérézo (2005)	57
Figure 1.6 Chélation des ions calcium Ca^{2+} dans la structure moléculaire de type «egg box» des substances de pectines en solutions de Sedan et al. (2007)	59
Figure 1.7 Macrostructure des bétons végétaux secs selon le dosage en liant de Nozahic (2012).....	60
Figure 1.8 Distribution porale incrémentale par porosité au mercure et la méthode BJH sur un matériau de béton de chanvre de Collet et al. (2008)	61
Figure 1.9 Schéma de la structure poral des trois niveaux de porosité, soit micropores, mésopores et macropores composant les bétons de chanvre de Nozahic (2012)	61
Figure 1.10 Photos des fractions granulaires issues du verre concassé de <i>Tricentris</i>	65
Figure 1.11 Représentation des coquilles de diatomées au microscope à balayage électronique (MEB) de Miller (2009).....	67
Figure 1.12 Représentation schématisée de l'assemblage poral d'une argile (a) à plusieurs granulats, (b) chevauchement désordonné des particules, (c) une particule composée de couches de feuillets et (d) plusieurs feuillets sur une couche de Wakou (2014)	68

Figure 1.13 Représentation des octaèdres d'oxyde d'aluminium (a), d'un tétraèdre d'oxyde de silicium (b), d'un octaèdre d'oxyde de magnésium, d'une combinaison d'un feuillet tétraédrique avec un feuillet dioctaédrique (d) et un feuillet trioctaédrique (e). de Wakou, (2014).....	69
Figure 1.14 Analyse thermogravimétrique de la chaux hydratée calcique (<i>Graymont High Calcium</i>) reçue : la perte de masse et sa dérivée en fonction de la température (TGA/DTG).....	74
Figure 1.15 Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de la chaux hydraulique naturelle <i>Secil</i> (C : Calcite; P : Portlandite; 2 : dicalcium silicate (C ₂ S); 3 : tricalcium aluminate (C ₃ S ou C ₃ A)) de Silva et al. (2014).....	76
Figure 1.16 Analyse thermogravimétrique de la chaux hydraulique naturelle <i>Secil NHL 3,5</i> reçue : la perte de masse et sa dérivée de la masse en fonction de la température (TGA/DTG).....	76
Figure 2.1 Diagramme ternaire massique CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ de la projection des phases hydratées possible de précipiter dans un mélange chaux-métakaolin à 55°C de DeSilva, (1992).....	83
Figure 2.2 Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20°C des liants TEM, ADJ et NHL de Magniont (2010)	86
Figure 2.3 Diagramme de la méthodologie décisionnelle du projet selon l'approche d'une formulation ternaire optimisée	91
Figure 2.4 Schéma de la vue d'ensemble du plan expérimental linéaire.....	92
Figure 3.1 Mastersizer Hydro EV de Malvern Instruments.....	100
Figure 3.2 Station de prise de pH.....	101
Figure 3.3 Robot à mortier de type Hobart.....	103
Figure 3.4 Mise en moule des cubes de pâte liante.....	104
Figure 3.5 Essai d'étalement pour différent dosage en eau d'une pâte fraîche chaux-laitier de haut fourneau	105
Figure 3.6 Essai de rétention d'eau d'une pâte à l'état frais; photo A : mise en place du papier filtre humide; photo B : dépôt de la pâte fraîche sur le papier filtre; photo C : pâte fraîche mise sous vide; photo D : retrait du papier filtre en vue de faire l'étalement final	107
Figure 3.7 Enceinte de mesures du calorimètre isotherme	108

Figure 3.8 Représentation des mélanges dans les ampoules de verre pour l'essai de calorimétrie	109
Figure 3.9 Presse hydraulique pour l'essai de compression mécanique	110
Figure 3.10 Pied à coulisse fixe	111
Figure 3.11 Essai de la porosité ouverte à l'eau par immersion; photo A : mise des échantillons submergés sous vide; photo B : disposition des échantillons pour la mise à l'étuve; photo C : conservation des échantillons submergés 24 heures; photo D : microbulles sortantes des échantillons durant l'essai; photo E : pompe à l'air utilisée pour l'essai	112
Figure 3.12 Arrêt d'hydratation et essai thermogravimétrique; photo A : appareil TG <i>Pyris Diamond</i> ; photo B : arrêt d'hydratation des pâtes durcies dans l'isopropanol; photo C : conservation des échantillons dans un dessiccateur en vue de l'essai thermogravimétrique; photo D : mise en place des échantillons dans les creusets d'analyse dans l'appareil TG; Photo E : récupération de l'échantillon en poudre sur papier filtre après l'arrêt d'hydratation.....	115
Figure 3.13 Schéma sommaire différenciatif des réactions de type pouzzolanique et hydraulique	118
Figure 3.14 Essai de la Valeur de la Capacité de Tampon Hydrique ou «Moisture Buffering Value»	122
Figure 4.1 Chaleur massique totale dégagée (J/g de liant) sur 7 jours à 40°C des pouzzolanes pour un rapport massique Ca/(Si+Al) fixe.....	126
Figure 4.2 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 40°C des pouzzolanes pour un rapport massique Ca/(Si+Al) variable	127
Figure 4.3 Résistances en compression des cubes de pâtes durcies des pouzzolanes à 28 jours de cure (21°C – 95%HR) pour les pouzzolanes étudiées	129
Figure 4.4 Résistances en compression des cubes de pâtes durcies des pouzzolanes à 28 jours de cure (21°C – 95%HR) pour un rapport massique Ca/(Si+Al) variable	130
Figure 4.5 Relation entre la porosité ouverte à l'eau et la résistance à la compression des pouzzolanes selon un rapport massique Ca/(Si+Al) variable pour les mélanges de terre diatomée (MN), terre diatomée (WL) et poudre de verre (PV)	132

Figure 4.6 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 23°C des mélanges pouzzolaniques selon un pourcentage de remplacement de la chaux hydratée dans le mélange fixe	136
Figure 4.7 Résistance à la compression à 28 jours des mélanges pouzzolaniques binaires selon un pourcentage variable de remplacement de la chaux hydratée dans le mélange.....	138
Figure 4.8 Relation entre la porosité ouverte à l'eau et la résistance à la compression des mélanges pouzzolaniques binaires selon un pourcentage de remplacement de la chaux hydratée variable.....	140
Figure 4.9 Observations des mélanges de la chènevotte avec l'eau de chaux à gauche et la chènevotte avec l'eau distillée à droite	141
Figure 4.10 Impact des fibres végétales sur le pH de la solution saturée en chaux hydratée	142
Figure 4.11 Effet de l'eau de chanvre (HW) en solution de pâte sur la réactivité calorifique des mélanges pouzzolaniques binaires retenus	145
Figure 4.12 Effet de l'eau de chanvre (HW) en solution de pâte sur la chaleur dégagée totale des mélanges pouzzolaniques binaires retenus.....	146
Figure 4.13 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 23°C des mélanges pouzzolaniques en présence d'eau de chanvre (HW).....	146
Figure 4.14 Schéma décisionnel des pouzzolanes de la formulation ternaire optimisée.....	150
Figure 4.15 Répartition de la densité de volume des particules par matériau retenu	152
Figure 4.16 Courbe granulométrique des particules en pourcentage de volume cumulé par matériau retenu	152
Figure 4.17 Résistance à la compression à 28 jours des formulations chaux-métakaolin-terre diatomée (MW) optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau	160
Figure 4.18 Résistance à la compression à 28 jours des formulations MW-0 optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau	161
Figure 4.19 Résistance à la compression à 28 jours des formulations chaux-métakaolin-laitier de haut fourneau (MG) optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau	163

Figure 4.20 Récolte de l'eau de chanvre saturée de chaux hydratée calcique pendant 24h de trempage comme eau de gâchage pour la confection des pâtes pouzzolaniques MW-HW et MG-HW	164
Figure 4.21 Résistance à la compression à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR des deux formulations optimisés MW/MW-HW et MG/MG-HW incluant les formulations optimisées avec le remplacement de l'eau de gâchage par l'eau de chanvre saturée de chaux (Hemp Water ou HW) pendant 24h.....	165
Figure 4.22 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	167
Figure 4.23 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 HW à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	167
Figure 4.24 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MG 0-2,3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	168
Figure 4.25 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MG 0-2,3 HW à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	168
Figure 4.26 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-2,0 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	170
Figure 4.27 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-2,5 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	170
Figure 4.28 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	171
Figure 4.29 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3,5 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	171
Figure 4.30 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-4 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	172

Figure 4.31 Positionnement des mélanges MW 0 – {2,0; 2,5; 3,0; 3,5 et 4,0} dans le diagramme ternaire massique CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ de la projection des phases hydratées solides possible dans un mélange chaux-métakaolin à 55°C d'après DeSilva (1992).....	172
Figure 4.32 Validation graphique de la prédiction de la consommation de la chaux libre par la métakaolinite (AS ₂) entre le calcul théorique (colonnes oranges) et les résultats expérimentaux (colonnes bleues) pour les mélanges MW 0 - b en comparaison aux mélanges MW T - b et MW 2 - b conservant une proportion résiduelle de chaux libre après 28 jours de cure à 21°C – 95%HR	174
Figure 5.1 Courbe granulométrique par tamisage mécanique de la chènevotte (distribution massique selon la largeur des particules).....	182
Figure 5.2 Taux d'absorption d'eau (masse %) sur une période submergée de 48h de la chènevotte reçue (50g).....	184
Figure 5.3 Courbe de du changement de la masse volumique durant le séchage après démoulage à 7 jours de cure jusqu'au 42 ^e jour par formulation.....	186
Figure 5.4 Pourcentage relatif de perte en eau massique suivant le démoulage entre le 7 ^e et le 14 ^e jour de cure par formulation à 20°C – 60%HR ± 10%.....	186
Figure 5.5 Montée du module dynamique élastique E (MPa) par rapport à l'initial au 10 ^e jour jusqu'au 42 ^e jour de cure par formulation.....	187
Figure 5.6 Montée du module dynamique élastique E (MPa) par rapport à l'initial au 10 ^e jour et le 14 ^e jour de cure par formulation.....	188
Figure 5.7 Module dynamique élastique E (MPa) initial et finale au 10 ^e et au 42 ^e jour de cure par formulation.....	189
Figure 5.8 Résistances à la compression après 60 jours de cure perpendiculaire (⊥) au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%.....	191
Figure 5.9 Résistances à la compression après 60 jours de cure parallèle (//) au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%.....	191
Figure 5.10 Coefficient de détermination (R ²) entre la résistance à la compression parallèle au sens de la compaction après 60 jours et le module dynamique élastique (E) à 42 jours	192

Figure 5.11 Coefficient de détermination (R^2) entre la résistance à la compression perpendiculaire au sens de la compaction après 60 jours et le module dynamique élastique (E) à 42 jours	192
Figure 5.12 Gain d'eau par capillarité sur la racine du temps pour des échantillons partiellement immergés dans 5 mm d'eau pour différentes formulations	194
Figure 5.13 Coefficient d'absorption capillaire (Ca) d'après la racine du temps pour des échantillons partiellement immergés dans 5 mm d'eau pour différentes formulations.....	194
Figure 5.14 Valeur de la capacité de tampon hydrique (VCTH) ou « Moisture Buffering Value (MBV) » par formulation équivalant à la moyenne des 3 derniers cycles d'humidité mesurés; la ligne rouge représente la valeur MBV évaluée comme « Excellente »	196
Figure 5.15 Résistance à la compression des blocs après 60 jours de cure perpendiculaire au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%.....	197
Figure 5.16 Conductivité thermique expérimentale et théorique des formulations des bétons végétaux de chanvre à température ambiante pour des humidités relatives de 50% et moins de Cérézo (2005)	199
Figure 5.17 Perte sonore par transmission (dB) en fonction de la fréquence (Hz) pour différentes épaisseurs (38 mm, 25 mm et 16 mm) de la formulation du bloc MW 0-2.....	202
Figure 5.18 Coefficient d'absorption sonore (α) en fonction de la fréquence (Hz) pour différentes épaisseurs (38 mm, 25 mm et 16 mm) de la formulation du bloc MW 0-2.....	202

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de cycle de vie
ASTM	American Society for Testing and Material
BIM	Building information modeling
CCQ	Code de Construction du Québec
CenC	Construire en Chanvre
CNBC	Code National du Bâtiment du Canada
CNRC	Conseil National de Recherche du Canada
CO _{2eq}	Quantité équivalente de dioxyde de carbone
COV	Composé organique volatile
DRX	Diffraction des rayons X
EIHA	European Industrial Hemp Association
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IEA	International Energy Agency
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
MBV	Valeur Tampon d'Humidité
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
MP	Matière Première
ONF	Office National des Forêts (France)
PCI	Projet par conception intégré
SCHL	Société Canadienne d'Hypothèque et Logement

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Unité de l'aire (m^2)
a, D	Diffusivité thermique (m^2/s)
C, C_p	Chaleur massique ($J/[kg. K]$)
d	Distance (m)
d_p	Diamètre des pores (m)
D_ϕ	Coefficient de conduction ($g/[m.h.mmHg]$)
D_w	Gradient de la teneur en eau (m^2/s)
D_v	Coefficient de conduction liquide ($kg/m s$)
D_T	Gradient de température (K/W)
D_o	Coefficient de diffusion de vapeur de l'air libre (m^2/s)
E	Effusivité thermique ($J/m^2 Ks^{1/2}$)
e	Épaisseur (m)
g	Champ de pesanteur (N/kg)
g_v	Densité de flux de diffusion de vapeur (kg/m^2s)
H	Enthalpie Totale (J/m^3)
HR	Humidité Relative (%)
U	Transmission thermique (W/m^2K)
K	Conductivité hydraulique ($kg/Pa.m.s$)
K_l	Perméabilité liquide (s)
K_n	Nombre de Knudsen (-)
L_v	Chaleur latente de vaporisation (J/kg)
L_{pm}	Libre parcours moyen (m)
M_v	Masse molaire de la vapeur d'eau (g/mol)
m	Masse (kg)
m_s	Masse de la partie solide (kg)
m_{sec}	Masse du matériau à l'état sec (kg)
m_e	Masse d'eau dans le matériau (kg)
m_h	Masse du matériau humide (kg)
n_t	Porosité totale (m^3/m^3)
n_f	Porosité fermée (m^3/m^3)
n_{ouv}	Porosité ouverte (m^3/m^3)
$n_{o,i}$	Porosité ouverte interconnectée (m^3/m^3)
$n_{o,ni}$	Porosité ouverte non interconnectée (m^3/m^3)
P	Pression (Pa)
P_a, P_o	Pression atmosphérique (Pa)
P_c	Pression capillaire (Pa)
P_l	Pression liquide (Pa)
P_{sat}	Pression de vapeur saturante (Pa)
P_v	Pression de vapeur d'eau (Pa)
Q	Quantité de chaleur (J)
qv	Flux de la vapeur d'eau (kg/s)
r	Rayon (m)

R	Constante des gaz parfait (J/ [mol.K])
R	Résistance thermique (h pi² °F/Btu)
RSI	Résistance thermique (m²K/W)
Sd	Épaisseur équivalente de diffusion (m)
S	Taux de saturation (-)
t	Temps (s ou en h)
T	Température (°C)
V	Volume (m³)
V_{ap}	Volume apparent (m³)
V_f	Volume fermé (m³)
V_o	Volume ouvert (m³)
$V_{o,i}$	Volume ouvert interconnecté (m³)
$V_{o,ni}$	Volume ouvert non interconnecté (m³)
V_{sec}	Volume du matériau à l'état sec (m³)
W	Teneur en eau (kg/m³)
Wa	Teneur en eau de l'air (kg/m³)
Wp	Perméance à la vapeur d'eau (g/ [m² h mmHg])
Wv	Teneur en eau de la vapeur (kg/m³)
z	Hauteur (m)
ΔT	Variation de la température (°C)

Unité de masse

M_{teqCO_2}	Millions de tonnes équivalentes dioxyde de carbone
Ha	Hectare
k_{geqCO_2}	Kilogramme équivalent dioxyde de carbone
Teq	Tonne équivalente

Lettres grecques

λ ou k	Conductivité thermique (W/m K)
δp	Perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (g/m h mmHg)
δair	Perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (g/m h mmHg)
ρ_{ap}	Masse volumique apparente (kg/m³)
ρ_s	Masse volumique du matériau solide (kg/m³)
ρ_{sec}	Masse volumique du matériau à l'état sec (kg/m³)
ρ_l	Masse volumique de l'eau liquide (kg/m³)
ρ_v	Masse volumique de la vapeur d'eau (kg/m³)
σ	Tension superficielle (m²kg/ (K.s².mol)
∇	Gradient (-)
θ	Angle de mouillage (-)
φ	Humidité relative (-)
μ	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (-)
N	Nombre de Reynold (-)
α	Coefficient d'absorption acoustique (-)

INTRODUCTION

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sorti en 2021 (GIEC, 2021) fait état de la situation mondiale en lien avec les changements climatiques et la montée en concentration de CO_{2eq} atmosphérique due principalement aux activités anthropologiques. Le GIEC souligne dans ce rapport des faits observés depuis leur dernière publication de 2013, notamment les vagues de chaleur extrême, les sécheresses, les fortes précipitations et les cyclones tropicaux. Les quatre dernières décennies ont toutes été plus chaudes que celles qui les ont précédés depuis 1850. Une augmentation notable de la température moyenne à la surface du globe supérieur à 1,1°C comparativement à celle de 1850 à 1900 a été notée également par le groupe d'experts. Cette dernière est évaluée à augmenter au cours du 21^e siècle si l'humain ne change pas ses activités émettrices de CO_{2eq} dans les prochaines décennies.

Selon l'*International Energy Agency IEA* (2020), la construction et l'opération des bâtiments sont responsables ensemble d'environ 40 % des émissions de CO_{2eq} pendant toute leur durée de vie qui sont souvent estimés à environ 60-75 ans dans la plupart des analyses de cycles de vie. L'analyse de cycle de vie (ACV) des bâtiments caractérise l'impact environnemental de l'ensemble des paramètres liés à la construction, l'opération et la démolition du bâtiment. Cette évaluation approfondit notamment l'impact environnemental des différents matériaux de construction utilisés. Le bilan en carbone total du bâtiment construit comprend notamment le bilan en carbone émis lors de la fabrication et l'installation des matériaux qui le compose. Les matériaux ont donc un impact direct et mesurable sur le « rendement » environnemental d'un bâtiment. Leurs propriétés multiples et leurs performances, notamment thermiques, vont être des vecteurs marquants de l'efficacité énergétique opérationnelle d'un bâtiment, et ce, tout au long de sa vie utile. D'autre part, la durabilité de ces matériaux est primordiale afin de prolonger la pérennité de l'ouvrage et différer sa réhabilitation ou sa rénovation post-déficienne.

Actuellement, dans le domaine de la construction, les matériaux conventionnels issus de la pétrochimie (polystyrène, vinyle, polyuréthane, polyéthylène, etc.) et ceux issus de sources minérales (laine de verre, laine de roche, gypse, béton de ciment, etc.) sont fortement

privilegiés dans les enveloppes du bâtiment. Or, la recherche visant l'intégration de matériaux issus du monde végétal (laine de chanvre, fibre de bois, cellulose, paille, béton végétal, etc.) dit « biosourcés » est croissante depuis les dernières décennies. L'intérêt des matériaux dits biosourcés dans la construction des bâtiments est en plein essor présentement au niveau mondial. Ces matériaux alternatifs renforcent la réduction des émissions de carbone émis lors de la construction des bâtiments. En effet, le remplacement d'un matériau à forte émission de carbone par un second matériau qui séquestre plutôt du carbone améliore de façon directe l'impact positif d'une telle décision : en plus de séquestrer du CO₂ par photosynthèse en cours de croissance, ces matériaux biosourcés permettent d'éviter l'émission de carbone qui aurait été émis initialement par le matériau conventionnel fort émetteur de GES qu'il remplace. Le caractère naturel des matériaux biosourcés, souvent sans ajout de produit chimique, assure également une qualité d'air significativement meilleure pour les occupants comparativement aux matériaux pétrochimiques reconnus aujourd'hui comme émetteur de composés organiques volatils (COV) et autres produits chimiques volatils toxiques pour la santé humaine (formaldéhyde, isocyanate et autres). Par ailleurs, les matériaux biosourcés utilisés comme isolation possèdent des propriétés thermiques et hydriques performantes leur permettant ainsi de se présenter de manière concurrentielle face aux matériaux conventionnels. En effet, les matériaux d'isolation biosourcés permettent une régulation naturelle du taux d'humidité et de la température de l'espace de vie, limitant ainsi les fluctuations saisonnières, voire journalières, ressenties par l'occupant. Ce faisant, le confort de l'espace de vie est nettement amélioré tout en permettant une réduction significative de l'énergie consommée pour pallier ces fluctuations.

En cette nouvelle ère industrielle de transformation numérique, soit la nouvelle industrie «4.0» qui émerge progressivement, le virage est en cours dans l'industrie de la construction. En effet, de nouvelles façons optimisées de construire les bâtiments émergent de l'industrie de la construction. Tout d'abord, l'arrivée du modèle numérique complet « Building Information Modeling (BIM) » permet la conception d'ouvrage suivant des simulations numériques optimisées, prenant en compte un grand nombre de paramètres concomitants en lien avec la constructibilité et la gestion de projet d'un bâtiment. Ensuite, une nouvelle approche collaborative de gestion de projet par conception intégrée (PCI) s'éloignant du

modèle de conception traditionnelle en mode « silo » limite enfin toute complication future dans le projet en incluant toutes les parties prenantes de celui-ci dès le début en phase préliminaire de conception. Ces nouveaux modes de conception et de gestion de projets émergent dans l'optique de répondre plus efficacement au concept du développement durable se définissant sous trois piliers selon le diagramme de *Venn*, soit sur un contexte économique, social et écologique. Ainsi, il est donc pertinent d'accentuer la recherche dans les matériaux alternatifs biosourcés afin de compléter à tous ces efforts déployés en matière de gestion de projets plus consciencieux et responsables en ce qui concerne les ressources matérielles et humaines. La recherche portant sur ces matériaux biosourcés, dont les bétons végétaux, s'arrime parfaitement avec les objectifs sociétaux de réduction des GES dans la construction des bâtiments. Enfin, Ces nouveaux matériaux biosourcés s'assurent d'un bel avenir dans cette transition énergétique durable répondant davantage aux besoins des générations futures.

Le **chapitre 1** de ce travail de recherche présente une revue de la littérature effectuée par plusieurs chercheurs dans le domaine des bétons végétaux de chanvre. La revue de la littérature porte également sur la compréhension de la réaction pouzzolanique avec la chaux libre ainsi que le phénomène de carbonatation de la chaux aérienne hydratée. Enfin, celle-ci couvre plusieurs connaissances acquises jusqu'à présent sur le béton végétal de chanvre à l'étude.

Le **chapitre 2** sert à définir les objectifs de ce travail de recherche avant de poursuivre avec l'approche hypothétique proposée. Les quatre objectifs spécifiques sont 1) Analyse de la réaction pouzzolanique des matériaux sélectionnés; 2) Améliorer la compréhension de la prise pouzzolanique en optimisant les dosages du liant minéral; 3) Évaluer la montée en cohésion au fil du temps du biomatériau; et 4) Déterminer l'impact d'un liant pouzzolanique optimisé sur le comportement face à l'eau liquide et à l'eau en phase vapeur du biomatériau formulé. Ce chapitre présente également la méthodologie expérimentale du mémoire ainsi qu'une synthèse des essais qui seront effectués en laboratoire.

Le **chapitre 3** couvre les matériaux et toutes les méthodes expérimentales du mémoire afin de mener à bien les travaux de laboratoire. De plus, ce chapitre fait référence à l'Annexe 1 qui présente quelques exemples de calcul théorique de la formulation optimisée pour répondre aux diverses questions de recherche.

Le **chapitre 4** présente les résultats obtenus de la réactivité et des essais de caractérisation mécanique, porosité ainsi que l'eau liée chimiquement réalisée sur les différentes pâtes (liant + eau) de matériaux pertinents afin de faire une première sélection des futurs constituants du liant pouzzolanique optimisé.

Enfin, le **chapitre 5** présente diverses formulations optimisées de bétons végétaux de chanvre en vue d'en évaluer l'efficacité de la cure des matrices liantes et de la cohésion des bétons végétaux confectionnés. Ce chapitre présente également les essais hygroscopiques et de capillarité effectués sur les formulations optimisées afin de déterminer l'impact d'une variation des composantes de la formulation du liant sur leurs propriétés physiques à l'état durci. Ensuite, ce dernier chapitre présente les résultats des essais thermiques et acoustiques de la formulation qui a montré les meilleurs résultats à notre avis selon les données recueillies.

Finalement, une **conclusion** fait le résumé complet du mémoire et répond aux divers questionnements de recherche. La conclusion est suivie d'un chapitre de recommandations qui offre une **perspective** afin d'orienter les futures recherches dans le domaine des bétons végétaux de chanvre à base de chaux hydratée.

La contribution de la recherche proposée porte essentiellement sur une meilleure compréhension d'une formulation d'un liant pour la confection d'un béton végétal de chanvre avec les ressources disponibles en Amérique du Nord. L'étude de la formulation permettra ainsi de trouver une composition optimale et locale du liant minéral pour la confection d'un béton végétal de chanvre pouvant permettre une utilisation dans la construction de bâtiment durable de façon efficace et économique.

Les retombées de la recherche proposée permettront de promouvoir l'emploi et la demande de ce matériau écoresponsable dans l'enveloppe du bâtiment. Une fois la formulation du liant de ce biomatériau établie, le béton végétal de chanvre permettra une alternative efficace d'isolation à faible impact sur l'environnement pour les propriétaires et les entrepreneurs en bâtiment durable au Canada.

CHAPITRE 1

Revue de la littérature

La présente revue de la littérature survole les éléments primordiaux à prendre en considération en vue de concevoir un liant nord-américain pour la confection d'un béton végétal de chanvre. En premier lieu, nous situons la plante de chanvre parmi les ressources végétales disponibles en ce qui concerne son utilisation comme matériau de construction (sous-section 1.0). En second lieu, nous présentons un coup d'œil des interactions possibles entre chacune des composantes d'un béton végétal de chanvre à l'état frais pour enfin présenter les particularités de ce béton une fois sec (sous-section 1.1). Finalement, nous mettons en lumière les multiples pouzzolanes disponibles en Amérique du Nord qui méritent d'être étudiées en combinaison avec la chaux hydratée pour ainsi formuler un liant local à base de chaux pour la confection d'un tel matériau de construction (sous-section 1.2 à 1.4).

1.0 Les matériaux biosourcés

Historiquement, l'utilisation des matériaux issue des végétaux comme matériaux de construction prend origine dans les premières constructions par l'homme. Sans équivoque, le bois a été le matériau le plus employé au début du moyen âge pour la construction des bâtiments jusqu'à être remplacé par la pierre connaissant une popularité fulgurante lors de cette ère. Lors du XXe siècle, les avancées technologiques et la flamboyante montée des produits du pétrole ont permis l'innovation de matériaux pétrochimiques et minéraux permettant d'améliorer globalement l'efficacité thermique des bâtiments. Cependant, l'essor fulgurant des produits de pétrole et l'exploitation des énergies fossiles du dernier siècle représentent la raison première de l'accroissement de la température globale terrestre à l'origine des dérèglements climatiques. En effet, la construction des bâtiments utilise une grande quantité de matériaux issus de l'industrie pétrolière ou d'autres industries très énergivores. Dès lors, la grande énergie intrinsèque de ces matériaux est à l'origine de la facture globale en carbone des nouveaux ou anciens bâtiments rénovés. Cette énergie intrinsèque, surnommée ''énergie grise'', est définie comme étant l'énergie consommée depuis l'extraction des matières premières, lors de leur

production ainsi que lors de leur transport jusqu'à leur installation sur site et enfin leur disposition en fin de vie.

1.0.1 Avantages

Ces dernières décennies, un regain d'intérêt a été porté sur les matériaux de construction biosourcés pour pallier en partie aux problèmes environnementaux. Outre le potentiel de captation du CO₂ par photosynthèse en cours de croissance, les matériaux biosourcés offrent de nombreux bénéfices aux milieux bâtis, notamment :

- ❖ Production annuelle de ressource de façon durable : ressource renouvelable;
- ❖ Biodégradable en fin de vie (utilisation comme fertilisant ou production de biogaz par biométhanisation);
- ❖ Régule la fluctuation de l'humidité et de la température dans les espaces fermés;
- ❖ Matériau léger avec de bonnes performances mécaniques.

1.0.2 La structure des végétaux

La structure des végétaux qui nous intéresse dans un contexte de matériau de construction repose essentiellement sur le xylème (bois) des végétaux. Le bois est un bon exemple, mais le chanvre est également en mesure de produire cette partie similaire dans sa structure.

1.0.2.1 Le bois

Le bois est l'un des matériaux les plus utilisés pour la construction depuis des siècles. Ses propriétés mécaniques, de maniabilité, de polyvalence et de légèreté lui confère une multitude d'usages, dont structurel et de finition. La structure du bois se caractérise sous trois niveaux (macroscopique, microscopique et moléculaire). L'aspect macroscopique et microscopique du bois s'échelonne à partir de l'écorce, le cambium jusqu'au bois constitué de fibres ou trachéides (Figure 1.1). Les cernes dans le bois marquent les différentes vitesses de croissance selon les saisons et les années. Le cambium est l'élément principal de l'arbre qui vit et qui soutient la croissance constante des fibres en produisant le xylème primaire ou le bois jeune. C'est notamment le xylème qui permet le transport de la sève depuis les racines jusqu'aux

branches. Le reste du xylème secondaire ou bois vieux au centre de l'arbre est en d'autres mots du bois « mort » et n'a d'autre rôle que structurel pour rigidifier l'arbre (Ashby & Jones, 2014).

Au niveau moléculaire, les fibres de bois ou xylème sont constituées essentiellement de cellulose (45% de la masse approximative des parois cellulaires du bois). Ces fibres de bois ou trachéides sont collées ensemble à l'aide d'une matrice liante composée majoritairement de lignine, d'hémicellulose, d'eau et d'autres constituants (55% environ de la masse restante).

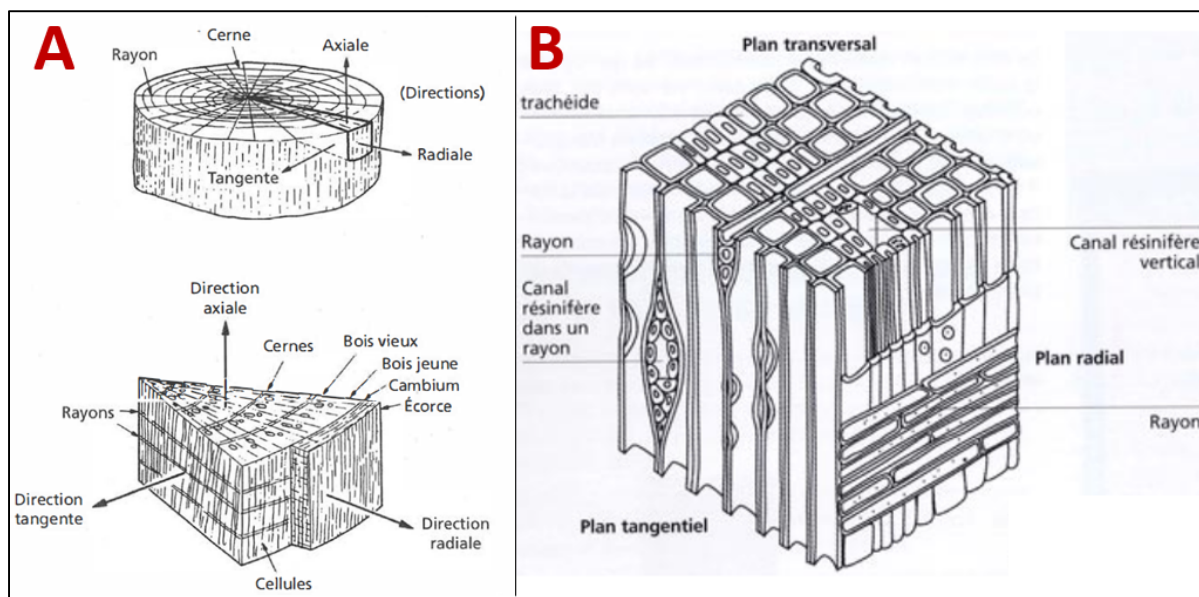


Figure 1.1 Composantes de la structure du bois a) macroscopique de Ashby & Jones (2014), et b) microscopique de Passas (2008)

1.0.2.2 Le chanvre

Le chanvre est une plante annuelle qui se cultive aussi facilement que le blé là où il est possible sur Terre de cultiver ce dernier (Piotrowski & Carus, 2011). Le chanvre se récolte lors de chaque saison de culture et celui-ci permet de séquestrer plus rapidement le dioxyde de carbone, un GES, que l'arboriculture (Piotrowski & Carus, 2011; Bedlivá & Isaacs, 2014). Selon l'*European Industrial Hemp Association* (EIHA), 1 ha de chanvre récolté en champs absorbe entre 9 et 15 tonnes de CO₂ annuellement. En contrepartie, selon l'*Office National des Forêts*, 1 ha de forêt absorbe entre 6 et 16 tonnes de CO₂ annuellement. La plante de chanvre possède donc une propriété de captation de CO₂ équivalente à l'arboriculture avec des rendements de récolte possibles annuellement comparativement à plusieurs décennies d'attente

avant de récolter les arbres semés. La transformation du chanvre récolté se fait à l'aide d'une défibreuse et d'une déchiqueteuse.

La morphologie de la partie interne de la tige de chanvre, soit la chènevotte, se caractérise sous deux niveaux de mesures distinctes, soit macroscopiques et microscopiques.

Aspects macroscopiques - La morphologie macroscopique de la tige de chanvre, présentée à la Figure 1.2, est de forme alvéolaire avec une partie bois (chènevotte) et une partie épiderme (filasse). La morphologie macroscopique de la chènevotte s'apparente à des particules de forme parallélépipède rectangle. Il existe actuellement deux façons de caractériser les dimensions de la chènevotte utilisée, soit par tamisage mécanique ou par analyse d'image. Cérézo (2005) mentionne que la caractérisation par tamisage mécanique nous informe seulement d'une dimension uniquement, soit la largeur des particules due à une réorganisation des particules de chènevotte lors de leur passage dans les tamis. Cérézo (2005) mentionne que les particules possèdent une largeur s'étalant de 0,1 mm à 12,0 mm approximativement. L'analyse d'image permet d'avoir une meilleure idée des caractéristiques physiques de la chènevotte. Une seconde propriété macroscopique importante quant à la classification de la chènevotte est la masse volumique en vrac tassée. Elle se situe entre 62,2 et 110,0 kg/m³, variable suivant l'origine du chanvre (Hustache, 2008).

Notons que la porosité totale de la chènevotte est de l'ordre de 78% (Cérézo, 2005). Également, des études sur la chènevotte rapportent une variabilité de sa surface spécifique ainsi que de son volume poreux, soit entre 13,8 m²/g à 29,0 m²/g et entre 2,2 cm³/g et 3,4 cm³/g respectivement (Hustache, 2008).

Aspects microscopiques - La morphologie microscopique de la chènevotte est constituée essentiellement de cellules de parenchymes et des pores longitudinales de diamètre noté visuellement variant entre 10 et 40 µm (Sauvageon, 1995). La Figure 1.2 présente une vue au microscope optique et à balayage électronique (MEB) de la structure cellulaire et porale d'une coupe transversale de la tige de chanvre (Sauvageon, 1995; Cérézo, 2005; Sedan, 2007). On remarque une gradation décroissante notoire des alvéoles de plus grand diamètre au centre de la tige allant jusqu'à des alvéoles de plus petit diamètre à l'extérieur. La tige de chanvre

comporte donc une grande variabilité dans la grosseur des pores qui la compose. Cette distribution porale variée de la chènevotte est en grande partie à l'origine des propriétés hydriques du béton de chanvre (Hustache, 2008).

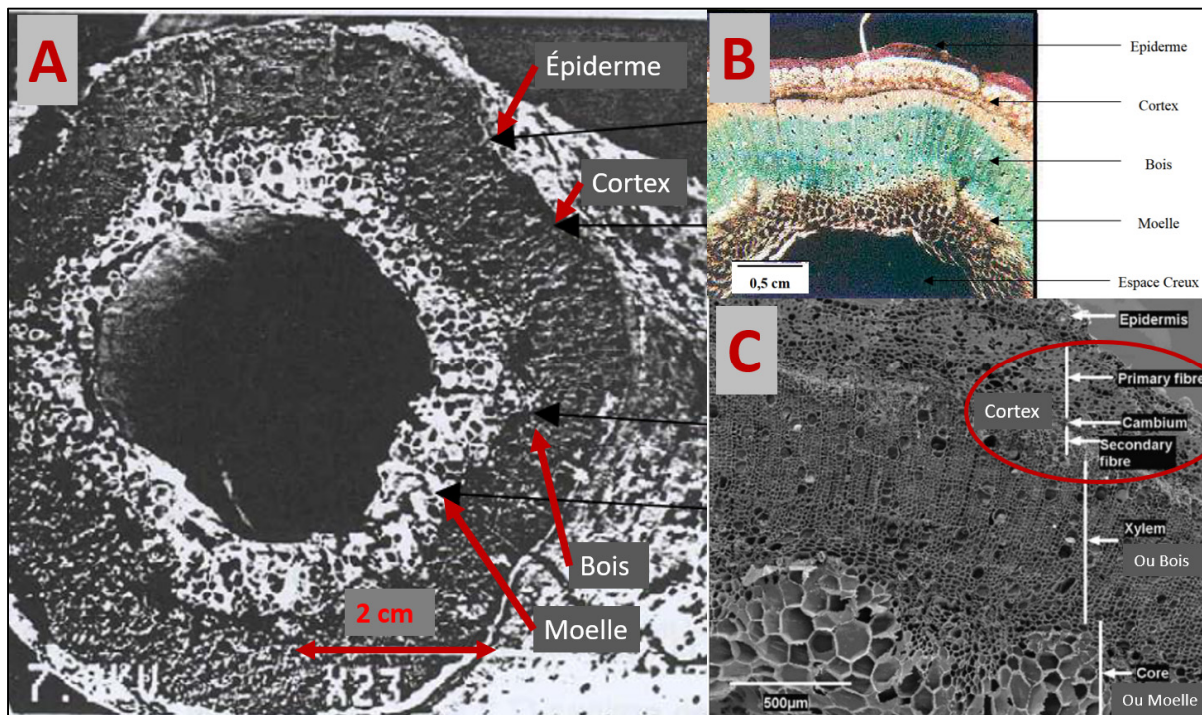


Figure 1.2 Photos au microscope optique et électronique à balayage (MEB) d'une coupe transversale de la tige de chanvre : a) Vue macroscopique (grossissement x23) de Sauvageau (1995); b) Vue colorée au carmino-vert (grossissement x60) de Sedan (2007); c) Vue microscopique (grossissement x300) de Cérézo (2005)

D'après Sauvageau (1995), la tige de chanvre se décompose en quatre zones :

- ❖ Épiderme : couche de cellules à paroi cellulosique ;
- ❖ Cortex : zone contenant les fibres corticales regroupées en faisceaux servant à la fabrication des fibres de chanvre ;
- ❖ Bois ou xylème : cellules du parenchyme, fibres et vaisseaux conducteurs assurant la conduction de la sève montante servant à la fabrication des granulats végétaux : la chènevotte est ainsi le bois déchiqueté en copeaux constituant un « granulat végétal » ;
- ❖ Moelle : parenchyme médullaire.

En plus de ces 4 zones, pour le chanvre comme pour le lin par exemple, un espace creux au centre de la tige peut occuper plus de la moitié du diamètre de la tige lorsque la plante est âgée

(fin de saison de culture). La proportion massique du bois composant la tige représente généralement approximativement 60% de la masse totale et donc, le cortex et l'épiderme représentent environ le 40% restant de la masse totale. Enfin, on remarque que la composition structurelle des tiges de ces plantes s'apparente grossièrement à la structure du bois des arbres.

Sous une autre perspective, des analyses par tomographie réalisées par l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ÉNTPE) précisent une plus grande variabilité du réseau poral de la chènevotte partant à 70 μm jusqu'à 400 μm (Hustache, 2008). L'auteur souligne que la variabilité morphologique peut dépendre, notamment des conditions de culture, de la localisation et de l'emplacement de la chènevotte sélectionnée sur la tige de chanvre. Par l'entremise de cette méthode d'analyse par tomographie, il a été conclu que les pores étaient interconnectés et traverseraient l'entièreté de la chènevotte sur son sens longitudinal.

1.0.3 Sources des végétaux

L'enjeu mondial de l'approvisionnement en bois concernant la surexploitation des forêts par l'homme nous mène à reconsidérer cette ressource comme seul précurseur biosourcé pour la transition écologique durable. Dans cette perspective, le renouvellement de certaines matières végétales pouvant être utilisées comme matériaux de construction se réalise très souvent plus rapidement que les matières issues du bois. Une grande proportion de plantes pousse en l'instant d'une année de récolte et parfois même une demi-année dans les pays chauds où le temps d'ensoleillement augmente. Les fibres végétales ont donc l'opportunité de permettre un meilleur rendement en biomasse annuel à court terme directement exploitable comparativement à l'arboriculture qui prend plusieurs décennies, voire plusieurs générations pour être rentabilisé. Cet aspect est d'autant plus pertinent lorsque l'économie mondiale doit suivre un virage plus respectueux de l'environnement d'ici les prochaines décennies afin de limiter l'accroissement de la température planétaire sous les +1,5°C avant l'an 2050.

Actuellement, l'accessibilité à des ressources végétales renouvelables est soutenue par l'agriculture pour d'autres fins que la construction telle que l'alimentation animale ou humaine. En raison d'une grande proportion de culture de céréales à paille et d'herbe pour l'élevage de bétail, une quantité importante de déchets en lien avec la production de ces ressources est

accessible mondialement pour en faire notamment des matériaux d'isolation pour les bâtiments.

1.0.3.1 Les graminées

Dans la même famille des graminées, l'herbe, vivace qui constitue les herbages, les prairies et les pelouses, peut être utilisée comme matière de nappage¹ pour en faire des matelas isolants ou de la laine isolante. Également, la paille, partie de la tige de certaines graminées (blé, orge, maïs, avoine et autres), est un coproduit de la production des céréales. Elle peut être employée en ballot individuel pour l'isolation des murs. Ces ressources de paille ou d'herbe peuvent également être cultivées localement limitant de ce fait les émissions de CO₂ reliés au transport.

1.0.3.2 Les oléagineux

La paille étant la partie de la tige de certaines graminées (blé, orge, maïs, avoine et autres) est généralement un coproduit de la production de grains. Dans la même famille des graminées, l'herbe est une plante annuelle ou vivace qui constitue les herbages, les prairies et les pelouses. L'herbe peut être utilisée comme matière de nappage pour en faire des matelas isolants. La paille quant à elle peut être employée en ballot individuel pour l'isolation des murs. Ces ressources de paille ou d'herbe peuvent également être cultivées localement limitant de ce fait les émissions de CO₂ reliées au transport.

Certains végétaux possèdent plusieurs parties distinctes dans leur structure organique. Quelques plantes de la famille des oléagineuses ont la particularité de former une moelle² végétale qui ressemble étroitement à de la matière issue du bois. Leur structure interne rigide souvent alvéolaire permet leur utilisation réciproque à des copeaux de bois. Les plantes de cette famille (tournesol, lin, chanvre) sont reconnues pour leurs diverses utilisations, notamment alimentaires, textiles et maintenant dans la construction. La tige du lin et celle du chanvre possèdent une partie externe, l'écorce, qui se présente sous forme de filasse utilisée dans les procédés de nappage de matelas isolants et dans l'industrie du textile. Suivant le procédé de

¹ Méthode de confection des nattes isolantes en matelas composées essentiellement de fibres.

² Substance molle contenue au centre de la tige et de la racine d'une plante.

défilage de la tige, il en résulte un sous-produit qui s'apparente souvent à des copeaux de différentes dimensions entre 1 à 25 mm de longueur et 0 et 10 mm de largeur qui ont les caractéristiques de l'intérieur solide de la tige maintenant déchiquetée. La tige de tournesol entière séchée et déchiquetée s'apparente à des copeaux de bois. Sedan (2007) a mis en évidence que la tige de plante est composée de 60% de sa masse par le bois et la moelle ainsi que de 40% par le cortex et l'épiderme. Ces résidus de bois de ces plantes renferment donc le plus grand indice de séquestration de masse de carbone que leur écorce respective une fois cette partie déchiquetée introduite dans un matériau de construction tel un béton végétal de chanvre à base de chaux. Le carbone de l'atmosphère synthétisé en matière organique est ainsi séquestré sur toute la vie du matériau, incluant sa récupération jusqu'à sa disposition finale. Cette durée de séquestration peut durer des dizaines d'années voire des siècles si les matériaux sont récupérés plusieurs fois dans un système circulaire de production.

1.1 Le béton végétal de chanvre

Une des applications intéressantes des matériaux biosourcés, c'est la confection de bétons. Évidemment, plusieurs types de matériau biosourcé peuvent être utilisés pour la confection de bétons, or on s'intéresse ici essentiellement au chanvre.

La conception des bétons végétaux de chanvre a été initiée en Europe principalement il y a de cela une trentaine d'années. Le béton de chanvre est constitué essentiellement d'un granulats de chanvre combiné à une pâte (liant + eau) à base de chaux. Le granulats de chanvre est avant tout constitué de copeaux déchiquetés de différentes tailles de la tige du chanvre: la chènevotte, soit le bois déchiqueté de la plante. La chaux est soit aérienne (CaO) ou hydraulique dépendamment de sa composition. La chaux aérienne réagit par carbonatation³ alors que la chaux hydraulique a aussi le potentiel de réagir avec l'eau pour former majoritairement un gel⁴ de silicate de calcium hydraté. Notons que la chaux est un matériau réactant issu de la décarbonatation de la pierre de calcaire.

³ Combiner avec le gaz carbonique ou un carbonate; transformer en carbonate : réaction de la chaux (CaO) avec le CO₂ pour former de la calcite (CaCO₃)

⁴ Amoncellement de particules colloïdales liées par des liaisons fortes et dont les cavités contiennent de l'eau adsorbée

1.1.1 Le ciment Portland

1.1.1.1 La chimie du ciment

L'industrie du ciment a simplifié la stœchiométrie chimique des produits et des composés couramment utilisés dans le domaine du béton de ciment en des formes abrégées. Pour les fins de cette recherche, le lecteur peut se référer au Tableau 1.1 afin de mieux comprendre les abréviations parfois employées ainsi que le nom des produits relatifs aux formules chimiques et des abréviations cimentaires (Pigeon, 1981).

Tableau 1.1 Listes des principaux produits chimiques et composés dans la chimie du ciment

Nom du Produit	Formule chimique	Abréviation utilisée
Chaux (vive)	CaO	C
Silice	SiO ₂	S
Alumine	Al ₂ O ₃	A
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	F
Eau	H ₂ O	H
Gaz Carbonique	CO ₂	$\bar{C}$
Sulfate	SO ₃	$\bar{S}$
Chaux hydratée	Ca(OH) ₂	CH
Anhydrite	CaSO ₄	$C\bar{S}$
Gypse	CaSO ₄ .2H ₂ O	$C\bar{S}H_2$
Calcite	CaCO ₃	$C\bar{C}$
Nom des quatre principaux composés du ciment Portland	Formule chimique	Abréviation utilisée
Silicate tricalcique	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicate bicalcique	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminate tétracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

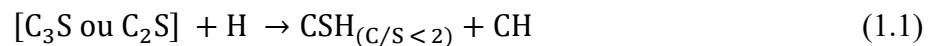
1.1.1.2 L'hydratation

Le ciment Portland est un mélange de clinker et d'une faible quantité de gypse. Le clinker est le produit obtenu à la sortie d'un four rotatif provenant de la cuisson d'un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile à très haute température (1400 à 1600°C). Les réactions chimiques survenant dans le four rotatif à cette température sont très complexes. La grande majeure partie massique de la composition du ciment Portland repose sur des silicates (C_3S ou C_2S) qui représentent à eux seuls environ 75% du ciment. Les composés du ciment Portland (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) sont tous très hydrophiles et réagissent en présence d'eau (H) pour créer majoritairement du Silicate de calcium hydraté (CSH) et d'autres hydrates tous sous forme de cristaux imparfaits (Tableau 1.2) (Pigeon, 1981).

Tableau 1.2 Liste des produits d'hydratation (hydrates) formés dans la pâte de ciment

Nom de l'hydrate	Abréviation utilisée
Silicate de calcium hydraté	CSH
Silicate de calcium et d'aluminium hydraté	CASH
Chaux hydratée ou Portlandite	CH

L'équation suivante la formule générale de cette réaction d'hydratation :



De façon générale, l'hydratation des grains de ciment dans une pâte de ciment Portland se réalise progressivement et lentement. Tout d'abord, il y a la dissolution partielle des grains (10 à 20 μm initialement). Ensuite, une première couche d'hydrates (CSH) se forme autour des grains et la chaux hydratée (CH) y est déposée subséquemment (Figure 1.3). Les espaces vides entre les grains dans une pâte de ciment hydraté, les capillaires, vont dès lors réduire en dimension à force que l'hydratation progresse : il y a densification de la pâte. Le volume de capillaires résiduels est fortement dépendant du dosage en eau qu'on incorpore à la pâte de ciment à l'état frais. Les propriétés mécaniques et de durabilités de la pâte en seront impactées également. Enfin, le matériau final se comporte tel un gel solide et poreux.

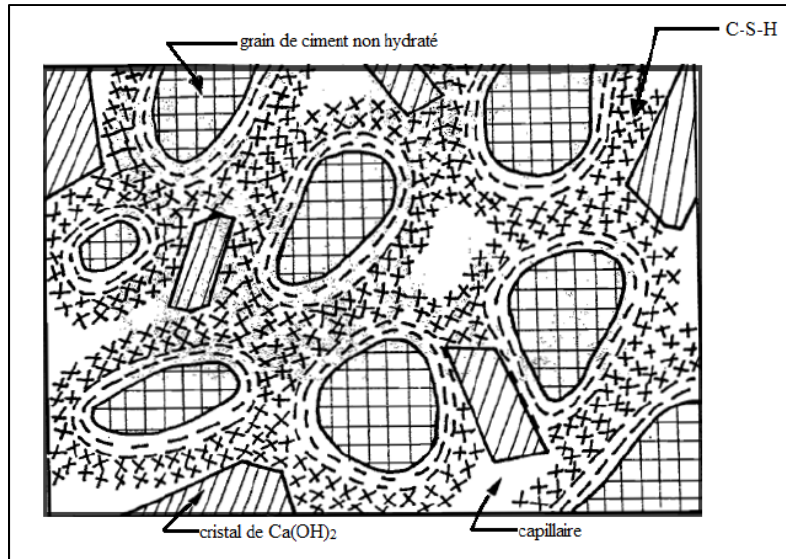


Figure 1.3 Schéma de l'hydratation des grains de ciment dans une pâte de ciment Portland de Pigeon (1981)

1.1.2 La réaction pouzzolanique

1.1.2.1 Chaux libre hydratée

La chaux libre hydratée (CH) est présente dans les pâtes cimentaires sous le nom distinct de Portlandite qui est un sous-produit de la réaction chimique de l'hydratation du ciment. Cette chaux libre hydratée demeure présente dans la pâte sous forme de cristaux granulaires blancs solubilisés ou précipités. À elle seule, la chaux libre hydratée n'améliore pas les liaisons chimiques de la pâte. La portlandite (CH) apparaît lors de la réaction cimentaire avec l'eau plus particulièrement par exemple lors de l'hydratation des phases cimentaires notamment celle de l'alite ou C_3S qui compose la majeure partie du ciment Portland selon l'équation suivante :



On remarque clairement la formation de la chaux libre hydratée (CH) lors de cette réaction d'hydratation. La chaux libre hydratée procure un milieu alcalin à la pâte cimentaire grâce aux ions OH^- en solution, ce qui protège notamment les barres d'armature de la corrosion à l'intérieur du béton armé.

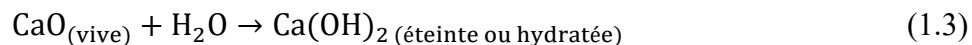
1.1.2.2 Les hydrates

Lorsque des pouzzolanes sont mélangées à une pâte de ciment ou de chaux, Siddique & Klaus (2009) mentionnent un mécanisme de dissolution de la silice et de l'aluminium amorphe présents au sein du matériau pouzzolanique qui permettra à ce mélange ionique de produire davantage d'hydrates de type CSHCSH, CASH ou parfois CAH tous très proche de la forme cristallisée qu'il est possible de retrouver lors de l'hydratation d'un ciment Portland (Tableau 1.3), toutefois sans la création supplémentaire de chaux libre hydratée. De ce fait, la proportion massique de la portlandite réagissant avec la pouzzolane dissoute va diminuer au fil de la formation des hydrates secondaires pouzzolaniques se produisant dans la matrice de la pâte liante. Ces hydrates secondaires pouzzolaniques renforcent généralement la structure et la résistance mécanique de la matrice liante. Ce phénomène conduit à ce qu'on nomme communément la « consommation de la chaux libre hydratée ou portlandite ». Donc, d'après la stœchiométrie des phases cimentaires et des composantes en minéraux amorphes, il est possible d'optimiser les proportions des constituants afin de maximiser les réactions chimiques formants des hydrates de nature liante consommant la chaux libre hydratée présente et améliorant la performance globale des pâtes cimentaires.

Tableau 1.3 Liste des produits d'hydratation (hydrates) formés dans une pâte pouzzolanique d'après notamment Siddique & Klaus (2009)

Nom de l'hydrate	Abréviation utilisée
Silicates de calcium hydratés	CSH (générale)
Tobermorite	CSH ($C/S = 0,83$ ou $5/6$)
Jennite	CSH ($C/S = 1,5$)
Silico-aluminates de calcium hydratés	CASH (générale)
Gehlénite hydraté ou Stratlingite	C_2ASH_8
Aluminates hydratés	CAH (générale)
Tétracalcique Aluminate hydraté	C_4AH_{13}
Hydrogarnet	C_3AH_6
Chaux hydratée	CH

La pierre calcaire décarbonatée dans un four à environ 900°C produit également de la chaux vive en poudre granulaire blanche appelée chaux aérienne vive (CaO). Une fois hydratée à hauteur d'approximation 25% en teneur en eau massique selon l'équation (1.3), cette chaux maintenant éteinte (CH) possède la même stœchiométrie que la portlandite retrouvée comme sous-produit de la réaction cimentaire hydraulique.

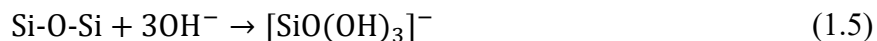


Dans le cas d'un mélange purement pouzzolanique composé de chaux hydratée et de pouzzolanes, l'étape d'hydratation du ciment s'y trouve absente. La réaction qui aura lieu dans ce cas suivra donc les mêmes réactions secondaires pouzzolaniques retrouvées dans les pâtes cimentaires lors de l'introduction d'une pouzzolane. La réaction se fera toutefois plus lentement que la généralité des réactions cimentaires de nature hydraulique. Par contre, la chaux libre hydratée est toutefois accessible dès le début de la réaction contrairement à la réaction cimentaire classique.

La première étape qui survient dans un mélange chaux-pouzzolane est en premier lieu l'hydrolyse de la chaux libre qui se sépare sous forme ionique selon l'équation suivante :

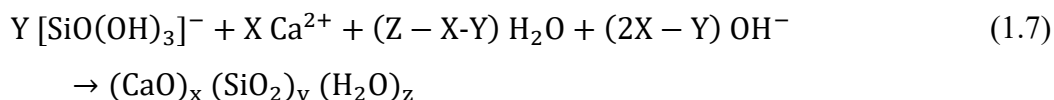


Les ions OH^- en solution provoquent une augmentation rapide du pH pour atteindre une valeur entre 12,0 et 13,0 à température ambiante. L'attaque alcaline de la solution entraîne une dissolution lente des minéraux amorphes présents dans la pouzzolane introduite dans le mélange. Les ions OH^- alcalins vont donc interférer avec les minéraux de silice et d'aluminium pour former des hydroxydes solubles tels que :

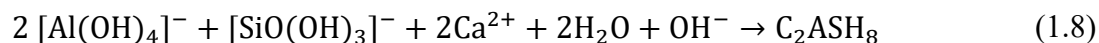


Ces composés solubles vont par la suite interagir avec les ions Ca^{2+} en solution pour former les différents hydrates semi-cristallisés ou cristallisés sous forme de gel solide, soit par les trois équations stœchiométriques générales tirées de la thèse de Nozahic (2012) :

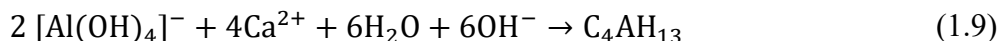
1) Calcium de silicate hydraté (CSH) :



2) Gehlénite hydratée ou Stratlingite (C_2ASH_8) :



3) Tétracalcique Aluminate hydraté (C_4AH_{13}) :



Dans le cas d'un excès de pouzzolanes dans le mélange, les hydrates formés vont donc consommer la totalité de la chaux libre hydratée jusqu'à épuisement des ions calcium Ca^{2+} ou OH^- disponibles laissant une part de minéraux réactifs non liés chimiquement. Dans le cas contraire lors d'un faible taux de pouzzolanes introduit dans le mélange, la totalité des minéraux réactifs solubilisés par les ions alcalins va réagir avec une partie de la chaux libre hydratée dissoute jusqu'à épuisement des minéraux réactifs solubilisés disponibles.

1.1.2.3 Les carbonates

La chaux hydratée (CH), est soluble dans l'eau et réagit chimiquement, en présence de dioxyde de carbone (CO_2) solubilisé pour précipiter sous forme des carbonates de calcium (insoluble) : la chaux fait prise par carbonatation. Le Tableau 1.4 présente quelques carbonates les plus courants possibles de retrouver dans une pâte pouzzolanique. Les carbonates de calcium (CaCO_3) se produisant peuvent prendre plusieurs formes cristallines, dont celui de calcite, de vaterite ou d'aragonite selon leur niveau de stabilité thermodynamique. La calcite étant la forme la plus stable parmi les trois, les deux autres sont de forme métastable à condition ambiante et atmosphérique. De plus, certaines des phases hydratées peuvent également réagir

en présence de CO_2 pour former des carbonates de structure plus résistante que les hydrates de type hemicarboaluminate (Hc) ou monocarboaluminate (Mc ou $\text{C}_4\text{ACcH}_{11}$), tous deux sous forme cristallisée (Magniont, 2010; Gameiro & Silva, 2012).

Tableau 1.4 Liste des produits de carbonatation possible formés dans une pâte pouzzolanique de chaux ou de ciment d'après notamment Gameiro & Silva (2012)

Nom du carbonate	Abréviation utilisée
Aragonite (métastable)	$\text{C}\bar{\text{C}}$
Vatérite (métastable)	$\text{C}\bar{\text{C}}$
Calcite (stable)	$\text{C}\bar{\text{C}}$
Monocarboaluminate	Mc ou $\text{C}_4\text{ACcH}_{11}$
Hemicarboaluminate	Hc ou cHc

1.1.3 La pâte de chaux

La cohésion du béton de chanvre est issue du potentiel de réactivité de la pâte de chaux qui enrobe le granulat de chanvre : la chènevotte. La pâte de chaux est constituée essentiellement de chaux et des autres liants d'ajout au besoin et d'eau. Dans certains cas, des adjuvants sont ajoutés à la pâte pour l'entraînement d'air ou modifier les tensions de surface. Il convient d'apporter quelques précisions quant aux différentes réactions qui permettront la montée en cohésion du béton de chanvre suivant sa mise en place. La chaux hydratée de la pâte de chaux va capter progressivement le CO_2 de l'air et par carbonatation être transformée en pierre calcaire : le CO_2 est ainsi capturé de l'atmosphère. La carbonatation de la chaux hydratée est en sorte le principal liant du béton de chanvre.

La pâte de chaux doit être relativement fluide pour permettre un bon enrobage du granulat de chanvre et la mise en place du béton. Une partie importante de l'eau requise pour la mise en œuvre du béton de chanvre sert à compenser la très grande absorption d'eau par la chènevotte (Dinh et al., 2015; Walker & Pavia, 2012). Or, la montée en cohésion du béton va se faire progressivement et lentement avec le départ de l'eau, lequel permettra ultimement la migration du CO_2 dans la masse pour la carbonatation par l'entremise du réseau poreux partiellement asséché (Arrigoni et al., 2017). Plus il y a d'eau, plus la montée en cohésion est lente nuisant

ainsi aux opérations de finition du bâtiment. Les problèmes soulevés freinent les entrepreneurs en bâtiment durable à utiliser ainsi, le béton de chanvre.

1.1.3.1 L'approvisionnement en chaux

La chaux est généralement obtenue de la décarbonatation du calcaire. L'Europe possède une géologie distincte de l'Amérique du Nord en ce qui concerne le calcaire naturellement accessible sur leur territoire. Le calcaire est une matière en abondance dans la croûte terrestre. Le Québec possède quelques gisements purs de calcaire sur son territoire pouvant ainsi supporter un approvisionnement stable à coût raisonnable de chaux calcique aérienne.

Par ailleurs, certaines sources de calcaire sont contaminées en argile. Cette contamination en permet la production d'une chaux dite « naturellement hydraulique » disponible uniquement en Europe. Le recours à une chaux hydraulique est avantageux puisque la montée en cohésion de la pâte de chaux va se faire aussi bien des suites de la formation de CSH que par la carbonatation de la chaux. Dans le cas où l'on utilise de la chaux aérienne, on pourra aussi ajouter à la pâte de chaux des ajouts à base de silice de type pouzzolane⁵ pour favoriser la formation de CSH. Les pouzzolanes avec la chaux permettent d'optimiser la qualité de la cure et la tenue des bétons végétaux en jeune âge. Une matière minérale pouzzolanique doit posséder des minéraux tels que du dioxyde de silicium (SiO_2) et/ou de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) afin de pouvoir réagir en solution avec les ions calcium (Ca^{2+}) pour former majoritairement des CSH, des silico-aluminates de calcium hydratés (CASH) ou possiblement des aluminates de calcium hydratés (CAH) similaires aux hydrates retrouvés dans les réactions cimentaires et hydrauliques. Notons que la proportion relative de ces types d'hydrate dans la pâte durcie dépend essentiellement du ratio massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou de celui du Si/Al qui se retrouve dans les matières premières utilisées. La matière minérale choisie doit avoir un caractère amorphe et non cristallisé. La matière cristallisée à base de silice par exemple le quartz (SiO_2) ne permet pas les réactions possibles avec les ions calcium en solution. En revanche la fumée de silice, amorphe est une pouzzolane. Un matériau peut donc posséder une

⁵ Matière silico-alumineuse, naturelle ou artificielle, susceptible, à la température ordinaire et en présence d'eau, de se combiner à la chaux

grande quantité de silice dans sa composition chimique sans nécessairement être une pouzzolane, tout dépend de la structure (amorphe ou cristallisée).

L'Europe possède une grande réserve accessible de chaux hydraulique naturelle et de ciment naturel à prise rapide. La formulation des liants européens pour la confection des bétons de chanvre porte majoritairement sur le mélange de ces matières à prise hydraulique en les combinant avec de la chaux aérienne. Or, ces derniers sont difficilement accessibles à un coût raisonnable en Amérique de Nord dû principalement à l'exportation transatlantique onéreuse. Afin de pallier ce problème d'accessibilité, il convient de chercher des substituts qui puissent permettre une montée en cohésion acceptable pour le béton de chanvre confectionné au Canada.

1.1.4 Matériau de construction

Cette section présente de façon générale le béton végétal de chanvre ainsi que ces deux composantes principales, soit le granulat de chanvre et les liants formulés actuellement disponibles en Europe.

Le béton végétal de chanvre aussi désigné « chanvre aggloméré » présente un potentiel incontestable pour réduire les gaz à effet de serre (GES) grâce au CO₂ séquestré par la biomasse de la plante lors de sa croissance et par consommation lors du processus de carbonatation. Le béton végétal de chanvre sert d'enveloppe pour un bâtiment. De par son pouvoir d'absorption (Nguyen, 2012) et sa masse thermique, le béton de chanvre a la capacité de réguler l'humidité et la température dans le bâtiment de façon naturelle, améliorant ainsi le confort des résidents (Dhakal et al., 2017). D'autre part, le béton de chanvre est un bon isolant thermique, recyclable, insonorisant, ininflammable, en plus d'offrir une protection contre la moisissure du bois. Il est aussi un bon répulsif naturel contre les insectes et les rongeurs (Piotrowski & Carus, 2011; Bedlivá & Isaacs, 2014). Il a cependant peu de capacité portante et il doit être employé au sein d'une structure, généralement de bois. Comme nous l'avons évoqué, la montée en cohésion du béton de chanvre a pour effet de capter et fixer le CO₂ dans sa matrice. Le béton de chanvre a donc une énergie intrinsèque négative (Arrigoni et al., 2017) en raison de la séquestration du CO₂ lors de la photosynthèse du chanvre en culture et par suite de la carbonatation de la chaux

durant la vie utile du bâtiment, laquelle est estimée à plus de 100 ans (Piotrowski & Carus, 2011; Arrigoni et al., 2017). La séquestration du carbone demeure tant que le chanvre ne se décompose pas. Suivant la durée de vie utile du béton de chanvre et sa possible réutilisation en fin de vie, ce matériau a la capacité de séquestrer d'importante quantité de CO₂ sur une période prolongée avec une énergie intrinsèque négative jusqu'à devenir neutre en carbone suivant sa décomposition après potentiellement plusieurs siècles d'utilisation.

Aujourd'hui, le béton de chanvre demeure méconnu du grand public et des entrepreneurs au Canada. Les murs en béton de chanvre sont des murs monolithiques, massifs et de grandes épaisseurs (20 à 40 cm) limitant ainsi le degré de carbonatation au cœur des éléments (Arrigoni et al., 2017). Par conséquent, la chaux non carbonatée au cœur du béton demeure très souvent en poudre après séchage, limitant ainsi le degré de cohésion du béton de chanvre (Nguyen, 2012). Pour contrer cet aspect, un liant secondaire de ciment hydraulique est souvent ajouté dans le béton de chanvre. Ce faisant, « l'énergie grise » du béton de chanvre augmente.

1.1.4.1 Granulat de chanvre

La tige de chanvre se compose approximativement de 40-60% de chènevotte, 20-35% de fibres et des fines (Hustache, 2008). La partie interne de la tige de chanvre, la chènevotte, constitue le principal granulat du béton végétal de chanvre (Figure 1.4). Ce granulat léger de chanvre provenant du monde végétal possède des caractéristiques variables qui vont inévitablement entraîner une répercussion sur la qualité du produit fini. Le processus de défibrage et la provenance de la culture sont des paramètres qui influenceront la qualité globale du granulat de chanvre, soit la chènevotte.



Figure 1.4 Photo de la chènevotte de
Hustache (2008)

D'après Niyigena (2017), la variabilité des paramètres des granulats de chanvre sur les performances des bétons végétaux doit être considérée. L'auteur s'est intéressé à distinguer 3 groupes de granulats de chanvre suivant leurs caractéristiques physiques : 1) la masse volumique en vrac, 2) la capacité d'absorption d'eau initiale et, 3) la taille des particules. L'auteur mentionne qu'à eux seuls, ces paramètres ne justifient pas les performances finales du béton et que le type de liant utilisé joue également un grand rôle. Néanmoins, l'auteur souligne qu'une taille plus grande de particules (environ 5,5 mm de longueur et 1,3 mm de largeur) peut conduire à une meilleure résistance à la compression. Évidemment, des particules de grande taille réduisent à la fois la surface spécifique du granulat, et la superficie de l'interface liant-granulat. Par ailleurs, Nozahic (2012) a montré que l'interface liant-granulat végétal est plus critique en raison notamment de l'effet de paroi qui donne lieu à une zone de transition interfaciale plus critique. Somme toute, les caractéristiques technico-économiques des granulats à considérer pour l'optimisation des bétons végétaux sont (Hustache, 2008) :

- ❖ Caractéristiques chimiques : présence d'une grande proportion de composés hydrosolubles des végétaux pouvant affecter la prise du liant;
- ❖ Caractéristiques géométriques : présence de particules de grande dimension pour améliorer la résistance mécanique;
- ❖ Porosité : amélioration des propriétés thermique et acoustique;
- ❖ Rendements (taux de fibre récolté par hectares de culture);
- ❖ Coûts (viabilité de la ressource).

La composition chimique de la chènevotte varie d'après le cultivar utilisé. Néanmoins, une composition chimique massique synthèse de la chènevotte est proposée représentant les résultats des analyses réalisées par le Centre de Recherche sur les MACromolécules Végétales, Grenoble – CERMAV (Hustache, 2008) :

Tableau 1.5 Composition chimique massique synthèse de la chènevotte de Hustache (2008)

Résidus cellulosiques	Hémicellulose	Pectines	Lignines	Cendres	Cires	Protéines
48%	12%	6%	28%	2%	1%	3%

1.1.4.2 Les liants

Les liants qui sont actuellement utilisés pour la confection des bétons végétaux de chanvre sont d'origine minérale. Trois types sont couramment utilisés : 1) la chaux aérienne, 2) la chaux hydraulique naturelle et, 3) le ciment naturel à prise rapide. Ces trois types de liants peuvent être employés individuellement ou combinés selon diverses proportions afin de concilier différentes propriétés de cure et de tenu du matériau en jeune âge (Hustache, 2008). Il est courant de recourir à certains ajouts afin d'optimiser la montée en cohésion et les propriétés du béton par la cure. Ces ajouts sont des pouzzolanes, d'autres liants hydrauliques et éventuellement des adjuvants (entraîneur d'air, rétenteur d'eau et autres).

Dans l'industrie européenne, on retrouve des liants dédiés à la formulation des bétons végétaux de chanvre. L'essence même des formulations de ces liants commerciaux, brevetés, a fait l'objet de recherches approfondies et demeure des liants formulés d'après les ressources géologiques disponibles localement. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment le liant « Tradical PF70 » et le « Bâtichanvre de St-Astier ». Ils sont constitués en grande partie de la chaux aérienne et hydraulique. D'autres liants commerciaux moins connus sont également accessibles sur le marché européen. Leur formulation et leur composition respective font habituellement l'objet de brevet ou de secrets industriels non disponible entièrement publiquement, mais certaines de ces formulations commerciales sont inscrites au Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Compositions de certains liants formulés commerciaux disponibles en Europe pour la confection de béton de chanvre tirées de Hirst (2013), Cérézo (2005) et des fabricants

Liant formulé	Fabricant	Chaux aérienne (%massique)	Liant hydraulique (%massique)	Ajout ou (PZ) pouzzolane (%massique)	Adjuvants (%masse)
Tradical PF 70	<i>Tradical</i>	63%	37%	Inclus à liant hydraulique	0,5%
Tradichanvre	<i>Tradical</i>	58%	22%	20% (sable)	0,8%

(suite) Bâtichanvre	<i>St-Astier</i>	70%	30%	Inclus à liant hydraulique	Inclus
Alpha 63	<i>Jemelle</i>	100%	-	-	-
Ciment naturel prompt	<i>Vicat</i>	-	100%	-	80g acide citrique/30kg

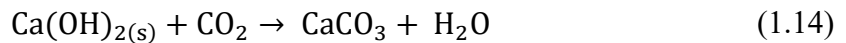
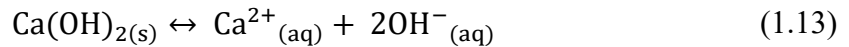
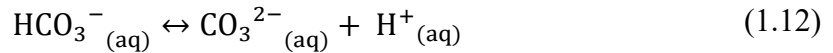
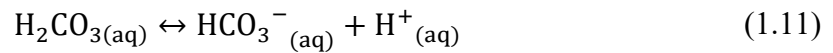
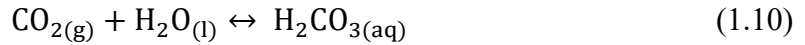
La montée en cohésion du béton de chanvre passe par son assèchement graduel et une série de réactions chimiques du liant utilisé : c'est la prise. Notons que le granulats chanvre, la chènevotte, très hydrophile, interfèrera nécessairement sur la prise. La prochaine section présentera les quelques interactions entre les composantes qui forment les bétons végétaux de chanvre.

1.1.5 Les interactions des composantes chanvre-liant-eau

1.1.5.1 Mécanisme de réactivité de la chaux aérienne

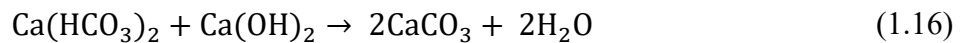
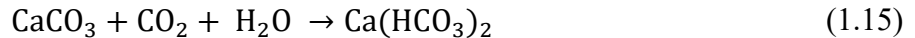
La chaux aérienne (CaO), tout comme la chaux hydratée (CH), est soluble dans l'eau et réagit chimiquement, en présence de dioxyde de carbone (CO₂) solubilisé pour précipiter sous forme des carbonates de calcium (insoluble) : la chaux fait prise par carbonatation. La présence d'eau est particulièrement nécessaire à cette prise. L'eau agit comme milieu d'échange ionique pour que la prise par carbonatation se réalise efficacement. Une quantité d'eau minimale est requise et un excès d'eau empêchera l'échange efficace des molécules de gaz carbonique avec la chaux. La prise de la chaux aérienne ou hydratée est étroitement dépendante de son environnement immédiat. Un bon équilibre entre la température et l'humidité ambiante normales est requis. Lors d'une récente étude sur le phénomène de carbonatation de la chaux, il a été montré qu'une carbonatation significative est obtenue à partir de 40% d'humidité relative d'une part, et, d'autre part, que le processus de carbonatation s'effectue selon plusieurs étapes de réaction chimique subséquente dans un milieu aqueux fortement basique grâce à l'hydrolyse de la chaux (pH=12,5) (Samari et al., 2020).

Samari et al. (2020) présentent le processus de carbonatation de la chaux hydratée en présence de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique suivant les réactions suivantes :



Samari et al. (2020) soulignent que la formation de carbonate de calcium (CaCO₃) au niveau des surfaces exposées des particules de chaux empêche la diffusion du CO₂ vers l'intérieur de la masse alors que d'autres études évoquent néanmoins la progression de la carbonatation vers le centre de masse. Samari et al. (2020) apportent certains éléments de réflexions afin d'expliquer la progression de la carbonatation en dépit du fait que la diffusion du CO₂ soit freinée par la couche superficielle de carbonate en surface des particules de chaux. Ils proposent la possibilité qu'un autre type de carbonate, seulement présenté sous forme solubilisée, surgisse afin de permettre le transfert des ions carbonates au travers de la masse non exposée à l'air. En référence aux travaux de Pontiga et al. (2013), Samari et al. (2020) proposent une autre série de réactions pouvant expliquer le phénomène de carbonatation par l'entremise du bicarbonate de calcium (Ca(HCO₃)₂).

Le processus de diffusion de la carbonatation peut se résumer suivant la séquence de réactions suivantes :



La formation d'une couche solide de carbonate de calcium à la surface exposée des particules de chaux empêche donc la diffusion du CO₂ atmosphérique vers la masse, mais reste perméable à la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau chargée en acide carbonique va progressivement diffuser, voire condenser à l'intérieur des capillaires connectés de la masse. Cette eau légèrement acide

solubilisera très lentement la couche de carbonate de calcium présente au cours de sa migration au travers de la masse. Cette solubilisation partielle de la couche de carbonate de calcium par l'acide carbonique aqueuse transformera les molécules de carbonates de calcium en bicarbonate de calcium. Cette transformation entrainera donc finalement la migration possible des ions carbonates essentiels à la carbonatation de la chaux hydratée dans la masse sous forme de bicarbonate de calcium pour former davantage de carbonates de calcium (Pontiga et al., 2013; Samari et al., 2020). Ce phénomène est toutefois à cinétique très lente et se réalise sur de nombreuses années, des décennies, voire des siècles dans certains cas. Enfin, il est connu que la solubilité des dioxydes de carbone (CO_2) est plus grande à faible température (Dheilily et al., 2002). Une température de cure optimale selon Dheilily et al. (2002) serait à approximativement 10°C afin de favoriser la carbonatation, et ce, même dans un environnement où la concentration en CO_2 est réduite.

1.1.5.2 Mécanisme de réactivité de la chaux hydraulique/ciment naturel à prise rapide

La chaux hydraulique aura une prise partiellement hydraulique et par carbonatation soit, une prise dite « hybride ». Le système de prise hybride permet d'être moins fortement dépendant de son environnement dû principalement à la prise hydraulique rapide. La chaux hydraulique composée notamment de silicates bicalciques (C_2S) et tricalciques (C_3S) va se dissoudre et mener à la formation de silicates de calcium hydratés (CSH). Une part de sa prise se fera également par carbonatation comme dans le cas de la chaux aérienne.

Le ciment naturel à prise rapide fera sa prise de façon essentiellement hydraulique avec la formation d'hydrates de type aluminat de calcium hydraté (CAH) ainsi que des CSH. Finalement, lors d'ajout de pouzzolanes dans la pâte de chaux hydraulique, d'autres CAH et/ou davantage de CSH pourront être formés lors de la prise des liants.

1.1.5.3 Comportement de la chènevotte en présence d'eau

L'interaction du granulat de chanvre avec l'eau se caractérise sous deux formes possibles, soit la sensibilité d'absorption du granulat à l'eau liquide ou à l'eau en phase vapeur. Dans le premier cas, d'après les recherches de Cérézo (2005) et Hustache (2008), le granulat de chanvre

atteint un taux de saturation à plus de 95% en 5 minutes après submersion dans l'eau et peut atteindre une teneur en eau de plus de 400% après 48 heures (Nguyen, 2010). En second lieu, la sensibilité du granulat à l'eau en phase vapeur se caractérise plutôt par la courbe de sorption-désorption à température constante lors de changement de taux d'humidité. Cérézo (2005) note une importante sensibilité d'absorption à la vapeur d'eau du granulat de chanvre (Figure 1.5), laquelle est caractérisée par un ensemble de paramètres, dont notamment la taille et la forme des pores ainsi que la microstructure du granulat. Dans la Figure 1.5, on remarque une courbe ascendante de sorption représentant la teneur en eau du granulat une fois sa masse stabilisée à plusieurs hygrométries isothermes extérieures différentes partant de 0 jusqu'à 99%HR. Inversement et en continuité avec la courbe de sorption, la seconde courbe descendante de désorption représente la teneur en eau du granulat une fois sa masse stabilisée à plusieurs hygrométries isothermes extérieures différentes partant de 99 jusqu'à 0%HR. On remarque un différentiel notable entre les masses du granulat stabilisé en phase de sorption et en phase de désorption. On appelle cela l'hystérésis de sorption-désorption. Ces deux courbes hydriques et ce phénomène d'hystérésis entre elles sont indispensables pour connaître et bien modéliser le comportement hygrothermique du béton végétal composé du granulat de chanvre.

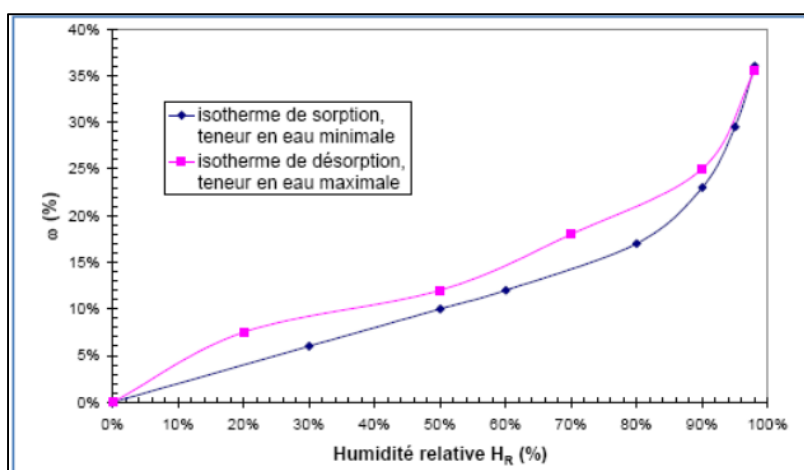


Figure 1.5 Courbes de sorption-désorption du granulat de chanvre à 20°C de Cérézo (2005)

1.1.5.4 Comportement de la chènevotte en présence des particules du liant

D'après Nozahic (2012), l'interaction physique entre le liant et le granulat de chanvre dépend de la taille des particules du liant à savoir si ces dernières sont suffisamment fines pour pénétrer

les pores de la chènevotte. Cela résulte à plusieurs phénomènes selon cet auteur, la migration des particules du liant dans la porosité du granulat réduirait ainsi la réaction de prise chimique pouzzolanique à l'interface de la matrice avec le granulat où il est noté une baisse en ions calcium s'y retrouvant. Également, la migration des particules de liant dans les pores de la chènevotte réduirait en partie le pouvoir d'isolation thermique des particules de chanvre en réduisant le vide d'air interstitiel des particules. L'auteur conclut que la migration des particules du liant dans la chènevotte par absorption doit être limitée le plus possible. Il mentionne qu'il faudrait plutôt favoriser l'adsorption des particules en améliorant l'adhérence de l'interface entre le granulat et la matrice liante pour corriger le phénomène de zone de transition interfaciale entre ces deux derniers qui réduirait la résistance d'adhérence.

1.1.5.5 Interaction entre la chènevotte et le liant saturé d'eau

D'après Hustache (2008), peu d'études ont été portées sur l'impact des molécules hydrosolubles des matières végétales quant à la prise des liants. L'auteur mentionne cependant la forte tendance aux tissus biologiques à être attaqué par une solution fortement alcaline pouvant aller jusqu'à la dégradation de leurs tissus végétaux. Quoiqu'il en soit, une quantité non négligeable de matières biologiques dont les hémicelluloses, les pectines et d'autres substances se dissolvent en présence d'ions alcalins. Les sucres dissous viendront nécessairement interférer avec les réactions pouzzolaniques et hydrauliques en lien avec la prise. En effet, les pectines solubles présentes dans l'eau de gâchage ont des propriétés de chélation⁶ des ions calcium Ca^{2+} en solution dans leur structure moléculaire. Cette chélation des ions calcium Ca^{2+} forme une structure moléculaire communément appelée de type « egg box » (Figure 1.6) rendant temporairement inaccessible une partie des ions calcium Ca^{2+} en solution aqueuse, limitant ainsi le processus d'hydratation de la phase cimentaire (Sedan et al., 2007). Il est ainsi courant d'observer un retard de prise dans tous les types de mélange cimentaire et pouzzolanique avec de l'eau végétale en solution en raison de ce phénomène chimique de chélation des ions calcium Ca^{2+} .

⁶ Réaction chimique au cours de laquelle des ions positifs souvent métalliques se lient à des molécules spécifiques (chélateur) pour former des complexes solubles.

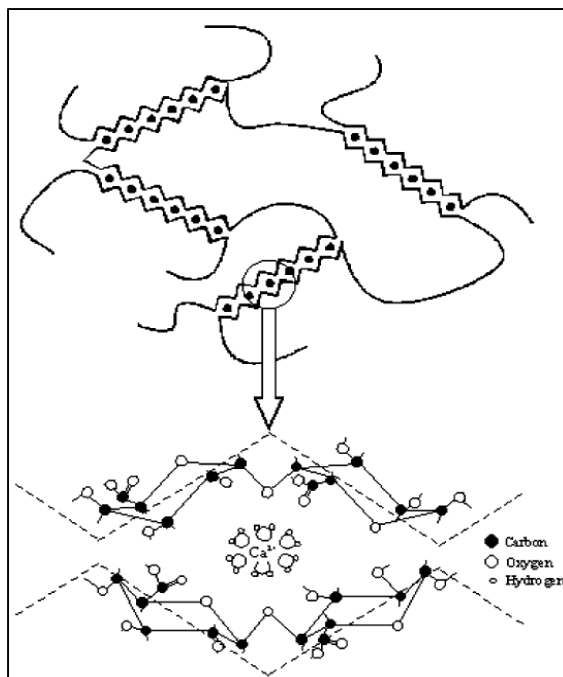


Figure 1.6 Chélation des ions calcium Ca^{2+} dans la structure moléculaire de type «egg box» des substances de pectines en solutions de Sedan et al. (2007)

1.1.6 La macrostructure

Les propriétés intrinsèques des bétons végétaux de chanvre sont étroitement liées au rapport massique de liant et de particules végétales. En effet, d'après l'utilisation qu'il est possible d'en faire, les bétons végétaux de chanvre peuvent être employés pour l'isolation des combles, des murs et des dalles sur sol ou enduit muraux isolants. Dans ce sens, l'élément différenciatif repose dans la proportion d'air interparticulaire du béton fini, passant d'un béton léger peu dense à faible capacité mécanique et très isolante à celui plus dense d'un enduit fortement résistant mécaniquement et à forte conductivité thermique (Figure 1.7).

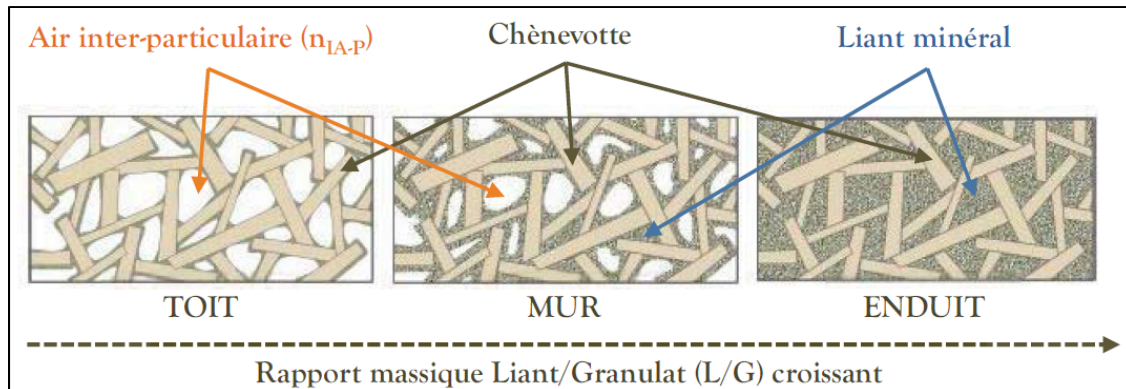


Figure 1.7 Macrostructure des bétons végétaux secs selon le dosage en liant de Nozahic (2012)

Le béton végétal de chanvre comporte essentiellement trois types de porosité notée depuis la littérature. Parmi les travaux sur la caractérisation porale des bétons végétaux de chanvre, les travaux de Collet et al. (2008) ont permis d'approfondir ces connaissances par l'entremise d'essais à la porosimétrie au mercure comparé à la méthode d'estimation BJH (Barrett, Joyner and Halenda) basée sur les courbes d'absorption/désorption du béton. Selon les auteurs, la différence des mesures obtenues par rapport à la méthode d'estimation peut être attribuable à l'effet « bouteille d'encre » reporté souvent dans les essais de la porosimétrie au mercure comme biais dans les résultats. Collet et al. (2008) ont ainsi noté trois grandes familles de micropores et deux familles de pores mésoscopique dans le matériau de béton végétal de chanvre composé d'un liant minéral commercial de type *Tradical PF70* (Figure 1.8) :

Micropores : 1) entre 450 et 720 nm, 2) entre 60 et 90 nm et 3) entre 10 et 40 nm;

Mésopores : 1) entre 10 et 40 μm et 2) entre 100 et 300 μm .

Ces pores d'ordre microscopique et mésoscopique correspondent au réseau poral formé par la matrice liante ainsi que le réseau capillaire de la chènevotte. Une troisième famille de pores, plus grossière, les macropores, représente le vide interparticulaire pouvant mesurer jusqu'à plusieurs millimètres qui sont les espaces entre les particules granulaires enduites de la pâte de chaux. Les macropores se présentent de manière désordonnée désordonnée (Nozahic, 2012) (Figure 1.9). Majoritairement, ces pores multiéchelles interconnectés sont à l'origine des propriétés thermiques, hygrothermiques et acoustiques des bétons végétaux de chanvre (Hustache, 2008).

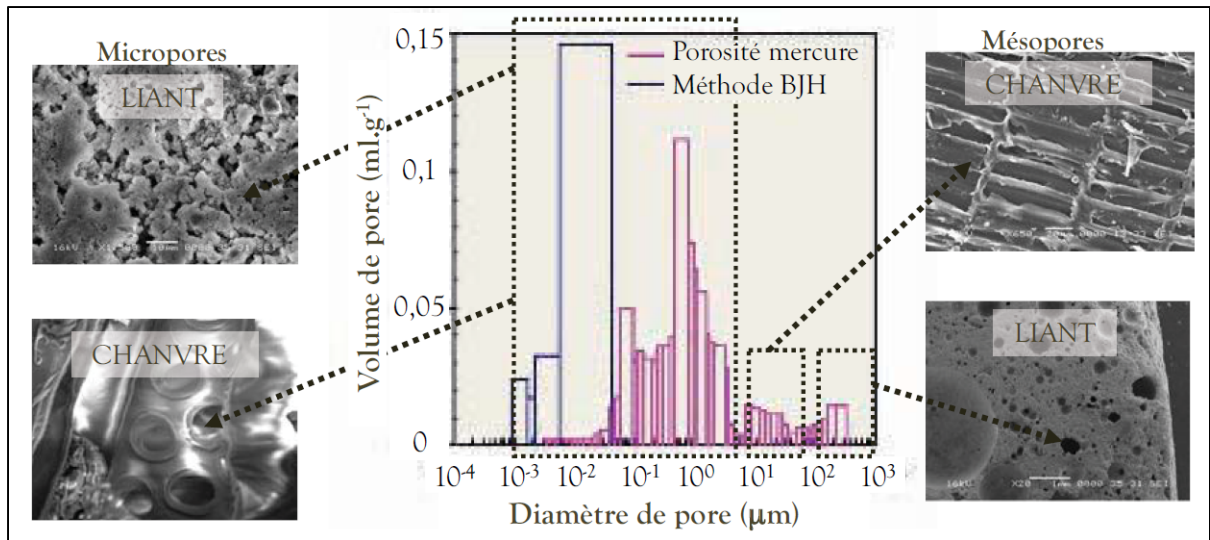


Figure 1.8 Distribution porale incrémentale par porosité au mercure et la méthode BJH sur un matériau de béton de chanvre de Collet et al. (2008)

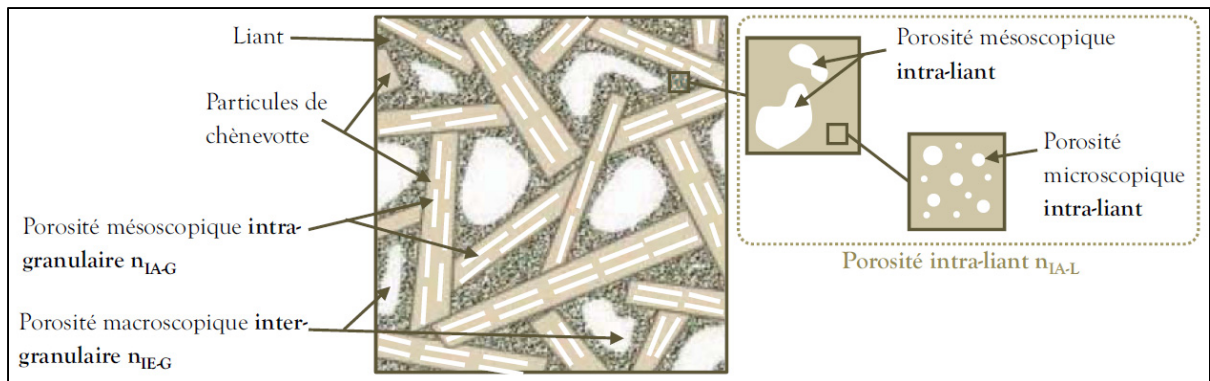


Figure 1.9 Schéma de la structure poral des trois niveaux de porosité, soit micropores, mésopores et macropores composant les bétons de chanvre de Nozahic (2012)

1.1.7 Propriétés hydriques

Les bétons de chanvre nécessitent une grande quantité d'eau initialement pour compenser la grande absorption d'eau par les particules du granulat de chanvre, très hydrophiles. Le matériau se comportera donc différemment lors du séchage et n'atteindra pas son plein potentiel de propriétés thermiques, acoustiques et structurelles avant que la phase de séchage soit terminée. Ses propriétés hydriques vont donc être différentes en cours de séchage de celles qui prévalent après séchage.

1.1.7.1 En cours de séchage

Le temps relatif au séchage du matériau peut s'étirer sur une longue période. Lors de ses travaux de thèse, Evrard (2008) a étudié les courbes de séchage du béton végétal de chanvre. Il a établi le profil de séchage d'un élément de béton végétal de chanvre d'une épaisseur de 25 cm exposé à l'air sur deux de ses faces et il en a conclu que le matériau peut prendre jusqu'à 2 ans pour atteindre le séchage complet. La cinétique de séchage décroissante se présente en deux phases, soit jusqu'à 60 jours, où la perte de masse est importante, et après les 60 premiers jours. Lors de la seconde phase, la perte de masse n'est pas significative malgré une présence d'eau résiduelle effective.

D'après Cérézo (2005), le mécanisme du séchage d'un matériau contenant une quantité d'eau homogène dans toute la géométrie de l'éprouvette est défini comme ayant deux zones distinctes, soit une première zone diffusionnelle et une seconde zone à teneur en eau initiale. La zone diffusionnelle est située à la surface exposée à l'air où l'eau se vaporise et s'évacue du matériau vers le milieu extérieur. Cette zone permet la remontée d'eau liquide par capillarité jusqu'à la surface extérieure. La seconde zone à teneur en eau initiale est définie comme étant la partie la plus éloignée de la surface exposée. Cette seconde zone agit tel un réservoir à la zone diffusionnelle en l'alimentant en eau par effet de capillarité. Cette alimentation en eau à la surface permet d'atteindre l'équilibre hydrique lors de l'évaporation de l'eau. À l'obtention d'une valeur de teneur en eau critique dans la zone à teneur en eau initiale, l'eau liquide ne peut plus rejoindre la surface. Un gradient de teneur en eau se développe donc au travers du matériau maintenant gouverné par la diffusion de vapeur. Enfin, la cinétique de séchage diminue. Dès lors, une zone d'apparence sèche apparaît à la surface du matériau et la zone diffusionnelle s'éloigne donc progressivement de la surface pour se rapprocher de la zone à teneur en eau initiale qui disparaîtra graduellement jusqu'à la fin du séchage.

1.1.7.2 Après séchage

Suivant l'étape de séchage complété, lorsque le béton végétal de chanvre atteint une masse volumique constante, le matériau présente des propriétés thermiques et hydriques spécifiques. Dès lors, le comportement hygroscopique des bétons végétaux de chanvre est caractérisé notamment par sa perméabilité à la vapeur, ses isothermes de sorption-désorptions et son

coefficient de diffusion hydrique (Hustache, 2008). Evrard (2008) qualifie le matériau de béton végétal de chanvre comme étant très perméable à la vapeur avec un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur, μ (sans unité), comprises entre 3,6 et 7,7 où la résistance à la vapeur croît avec la teneur en liant et la force de compactage. D'après Cérézo (2005), les courbes d'isothermes de sorption-désorptions du béton végétal de chanvre présentent une hystérésis importante conduisant à des écarts de teneur en eau au sein du matériau lorsque le taux d'humidité croît ou décroît (voir Figure 1.5). Enfin, le coefficient de diffusion hydrique (D) correspond à la vitesse de déplacement de l'eau liquide au sein du matériau à des gradients d'humidité relative. Ce coefficient est compris entre 10^{-10} m²/s et 10^{-5} m²/s (Hustache, 2008). Ces trois paramètres du comportement hydrique après séchage, soit la perméabilité à la vapeur, les isothermes de sorption-désorptions et le coefficient de diffusion hydrique, importent lors de la caractérisation des phénomènes de sorption physique puis de condensation capillaire qui auront lieu dans les pores des bétons végétaux de chanvre à une teneur en humidité donnée. D'après la synthèse des connaissances sur les bétons végétaux de chanvre réalisé par Hustache (2008), pour une humidité relative de 50% la condensation capillaire apparaît pour des pores de rayon inférieur à 0,1 μ m. L'auteur conclut que le réseau poral fortement développé des bétons végétaux de chanvre permet notamment un échange important de volumes d'eau.

Les travaux de Cérézo (2005) ont également permis de montrer une faible dépendance du matériau de béton végétal de chanvre quant à la conductivité thermique en présence d'humidité. Le béton végétal de chanvre conserve ses propriétés de résistance thermique suffisante malgré une hausse de sa teneur en eau pour des humidités relatives allant jusqu'à 75% (Cérézo, 2005) et jusqu'à 93% (Evrard & Herde, 2005). Dans la même étude réalisée par Evrard & Herde (2005), ceux-ci mentionnent une augmentation de la chaleur spécifique allant de 1550 J/kg[°]K à 0%HR jusqu'à 1777 J/kg[°]K à 93%HR, soit une augmentation significative de l'énergie thermique pouvant être absorbée par le matériau grâce à sa capacité à stocker une grande quantité d'eau.

1.2 Pouzzolanes disponibles en Amérique du Nord

Les critères de sélection d'une pouzzolane pour la confection de bétons de chanvre au Canada reposent sur leur disponibilité en Amérique du Nord, l'abondance de la ressource, le prix détail de la ressource, l'impact du transport appréciable de la ressource, le caractère naturel ou recyclé avec le moins de transformation de la ressource possible ainsi que le potentiel de réactivité en solution alcaline.

La présente section a pour but de présenter l'éventail de pouzzolanes disponible au Canada. Dans cette perspective, deux ajouts cimentaires couramment utilisés dans l'industrie des bétons hydrauliques sont à considérer, soit : la fumée de silice et la cendre volante. La fumée de silice possède un grand nombre de particules nanométriques entre 0,1 à 0,5 μm (Yajun & Cahyadi, 2003). La fumée de silice affine de façon importante les pores de la pâte de ciment hydraté par son effet de filler diminuant ainsi la taille des pores capillaires (espaces entre les grains de ciment non remplis d'hydrates) (Yajun & Cahyadi, 2003). Or, la réduction de la taille des pores dans le béton de chanvre n'est pas nécessairement souhaitable puisqu'elle peut entraîner une diminution des propriétés hydriques ou de perspiration du béton et réduire son potentiel hygroscopique. Pour cette raison, la fumée de silice n'a pas été considérée dans cette revue de la documentation. D'autre part, les cendres volantes proviennent de l'industrie du charbon qui est voué à disparaître dans les prochaines décennies. Pour des raisons environnementales, il a donc été choisi de ne pas les considérer.

En définitive, cette revue des sources potentielles de pouzzolanes se veut exploratoire et vise à cerner les matières premières disponibles pour la confection des bétons de chanvre canadien. Nous sommes conscients qu'il existe d'autres sources de pouzzolanes encore aujourd'hui inexplorées, autres que celles que nous traiterons à cette section et qui pourraient servir à la confection de bétons végétaux de chanvre.

1.2.1 Poudre de verre

Dans un mouvement grandissant d'une économie circulaire plus verte et durable, la réutilisation des déchets ainsi que leur valorisation en seconde vie fait l'objet d'une forte attention depuis les dernières décennies. Au Québec, la société des alcools du Québec (SAQ)

commercialise près de 13 300 produits provenant de 81 pays. La majorité des bouteilles en verre ne sont pas retournées ni consignées. Celles-ci finissent souvent au site d'enfouissement ou au recyclage. Le recyclage du verre est limité à son utilisation comme granulat ou abrasif notamment une fois concassé et tamisé (Figure 1.10). Aujourd'hui, une technologie de micronisation du verre disponible au Québec permet la valorisation du verre sous forme de poudre ultra fine ayant des propriétés pouzzolaniques grâce à sa haute teneur en bioxyde de silicium amorphe (SiO_2) (Mirzahosseini & Riding, 2015; Shayan & Xu, 2006). La poudre de verre est présentement acceptée comme ajout cimentaire dans l'industrie du béton de ciment par l'association canadienne de normalisation (CSA) dans la norme CSA-A3000-18. Le lecteur peut se référer à cette norme pour voir la liste des ajouts cimentaires acceptés ainsi que leur taux respectif en remplacement du ciment permis par celle-ci. D'après cette norme, il est possible d'utiliser jusqu'à 20% de poudre de verre en remplacement du ciment dans un mélange de béton classique améliorant ainsi ses propriétés intrinsèques finales. La société québécoise *Tricentris* située à Lachute (Québec) commercialise actuellement ce produit appelé *Verrox* comme ajout cimentaire pour les producteurs de béton de ciment.



Figure 1.10 Photos des fractions granulaires issues du verre concassé de *Tricentris*

1.2.2 Perlite expansée

La perlite est une roche volcanique naturellement accessible contenant notamment de la silice et de l'alumine à l'état potentiellement amorphe. Cette matière extraite facilement sans une grande quantité d'énergie dans les zones volcaniques à un impact moindre sur l'environnement

selon *Perlite Institute*. La perlite extraite est ensuite expansée à près de 15 fois son volume initial par cuisson (1000-1200°C). La perlite expansée est utilisée comme granulats légers isolant dans le béton de ciment et les mortiers et comme, granulats de filtration et l'agriculture pour aérer les sols. La perlite expansée et non expansée aurait potentiellement des propriétés liantes pouzzolanique en solution alcaline si celle-ci est finement broyée (Urhan, 1987; Sengul et al., 2011). L'entreprise montréalaise (QC), *Perlite Canada*, importe de Grèce de la perlite en poudre avant de l'expandre dans leur usine.

1.2.3 Zéolithe

La zéolithe est un minéral appartenant à la famille des aluminosilicates hydratés. La zéolithe est issue des cendres de volcan formées dans les eaux souterraines alcalines. La zéolithe est également issue des couches de dépôts organiques de bassins superficiels. La forme particulière de la microstructure en cage de la zéolithe lui confère des propriétés uniques de filtration moléculaire et d'autres propriétés absorbantes notamment. Le Canada possède des gisements de zéolithe naturelle d'origine volcanique en Colombie-Britannique. L'entreprise *Absorbent Products ltd.* est un distributeur exclusif de la *Z-Lite*. La zéolithe naturelle n'est pas transformée et la réserve de cette matière au Canada est estimée à environ 1 million de mètres cubes. Les minéraux qui composent la zéolithe naturelle sont essentiellement amorphes. La zéolithe naturelle aurait donc des propriétés potentiellement pouzzolanique en solution alcaline (Mertens et al., 2009). Selon le distributeur *Absorbent Products ltd.*, la zéolithe naturelle aurait déjà été employé et testé comme ajout pouzzolanique dans l'industrie du béton de ciment par certaines grandes cimenteries.

1.2.4 Terres diatomées

La terre diatomée est une roche siliceuse sédimentaire naturelle. Il est possible d'en retrouver sur plusieurs continents, dont l'Europe, l'Océanie et l'Amérique du Nord. Elle est formée essentiellement de fossiles de diatomées appartenant à la famille des microalgues unicellulaires. Les diatomées composent une grande partie des sols marins actuels et d'anciens cours d'eau. Les coquilles de diatomées demeurent sous forme de fossiles après leur décomposition. Ces coquilles sont très fines de dimensions allant de 2 à 200 µm chacune (Figure 1.11). La composition des coquilles de diatomée, la terre diatomée est constituée

principalement de silice amorphe (SiO_2). L'utilisation de la terre diatomée demeure présentement au niveau industriel et alimentaire pour l'élevage bovin majoritairement. La silice amorphe contenue dans la terre diatomée a le potentiel de réagir de façon pouzzolanique avec la chaux libre en solution (Miller, 2009; Ergün, 2011).

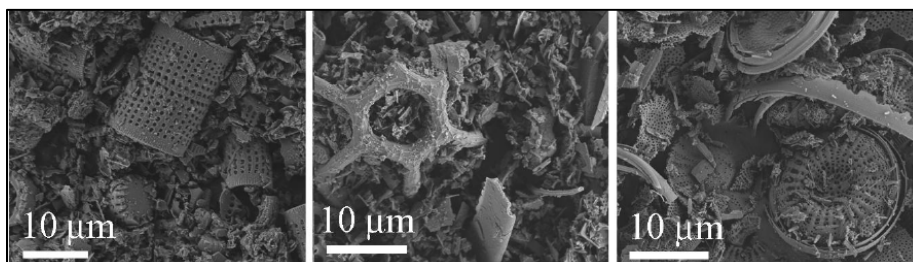


Figure 1.11 Représentation des coquilles de diatomées au microscope à balayage électronique (MEB) de Miller (2009)

L'approvisionnement en terre diatomée en Amérique du Nord provient essentiellement des États-Unis. Les gisements de terre diatomée exploités actuellement se retrouvent principalement près de la côte ouest des États-Unis.

1.2.5 Métakaolin

Les matériaux argileux et les argiles sont des matériaux très fins constitués de particules en forme de feuillets entassés les unes sur les autres. Leur structure particulaire peut être ordonnée ou désordonnée. Le réseau poreux des argiles se classifie sur plusieurs échelles. Le Tableau 1.7 et la Figure 1.12 représentent les différentes échelles de cette structure porale.

Tableau 1.7 Échelle dans la structure porale généralement retrouvée dans les argiles et les matériaux argileux de Wakou (2014)

Échelle dans la structure porale
Porosité interfoliaire (taille < 2 nm)
Porosité interparticulaire (taille < 50 nm)
Porosité intergranulaire (taille > 50 nm)

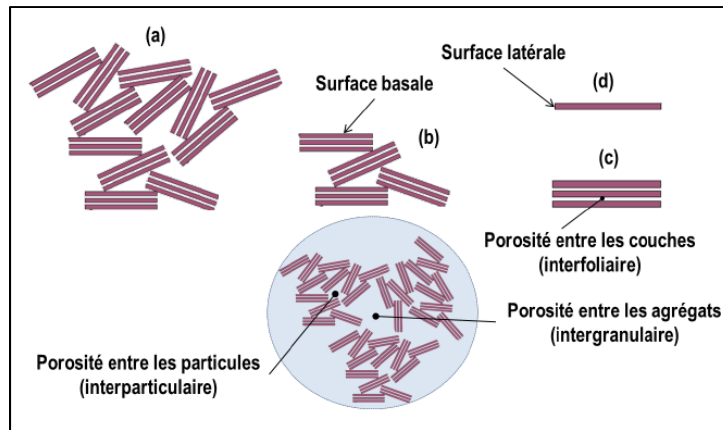


Figure 1.12 Représentation schématisée de l'assemblage poral d'une argile (a) à plusieurs granulats, (b) chevauchement désordonné des particules, (c) une particule composée de couches de feuillets et (d) plusieurs feuillets sur une couche de Wakou (2014)

Les types d'argile et matériaux argileux à grande valeur ajoutée et ceux qui présentent un grand potentiel de recherche sont les phyllosilicates. Ces argiles sont constituées essentiellement de plusieurs plans tels que présentés dans la Figure 1.12(c) de tétraèdres d'oxyde de silicium (SiO_4) et d'octaèdres d'oxyde d'aluminium (AlO_6). Cette combinaison de ces deux types de plans forme ensemble les feuillets des couches de particules. Le niveau structurel des feuillets est constitué successivement d'hexagone adjacent lié entre eux par des atomes d'oxygène tel que présenté dans la Figure 1.13.

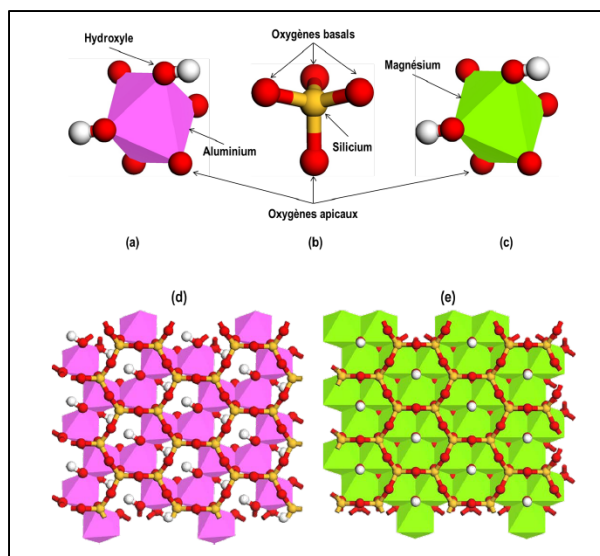


Figure 1.13 Représentation des octaèdres d'oxyde d'aluminium (a), d'un tétraèdre d'oxyde de silicium (b), d'un octaèdre d'oxyde de magnésium, d'une combinaison d'un feuillet tétraédrique avec un feuillet dioctaédrique (d) et un feuillet trioctaédrique (e). de Wakou, (2014)

La kaolinite est un minéral argileux composé essentiellement de silicate d'aluminium hydraté. L'eau interfeuillet compose la structure ordonnée du minéral. Lors de la cuisson du kaolin broyé, la structure devient désordonnée suivant l'évacuation de l'eau interfeuillet. En effet, ce procédé thermique par calcination permet d'extraire l'eau liée chimiquement dans les feuillets composés de tétraèdres de silice et d'octaèdres d'alumine. Ces molécules d'eau proviennent des groupements hydroxyles (OH) de la structure. Ce phénomène de déshydroxylation interfoliaire mène à une structure désordonnée du métakaolin le rendant ainsi amorphe pour réagir chimiquement à l'oxyde de calcium (CaO) en solution selon une réaction dite pouzzolanique. La fabrication de cette pouzzolane artificielle est réalisée par cuisson (650°C et 850°C) pour une période de 2 à 5h. Une température et un temps de calcination idéal sont des facteurs importants afin d'assurer le caractère réactif de l'argile calciné. Une température de calcination trop basse ou trop élevée mènera à une sous-amorphisation et une trop grande quantité de matière cristallisée non réactive (Mohammed, 2016).

Une récente amélioration dans ce matériau d'avenir comme ajout cimentaire a été entamée notamment dans son procédé de fabrication. La présente façon de produire du métakaolin est longue et demande une certaine quantité d'énergie par tonne de matériau à produire. Aujourd'hui, une nouvelle technique de déshydroxylation est proposée par une calcination « *flash* » dans un four statique (1000°C à 1200°C). Le kaolin est introduit de façon pneumatique et subit une déshydroxylation de la matière en un temps d'environ un dixième d'une seconde. Cette méthode permet d'éviter un broyage final du matériau contrairement au four rotatif, car aucune agglomération n'est possible lors de ce procédé. Cette nouvelle approche de fabrication permet d'être moins énergivore par tonnes de matériau que par le four rotatif. Il est estimé que la méthode de fabrication « *flash* » consomme en moyenne 2,2 MJ/tonne de métakaolin produit : ce qui équivaut à être 80% moins énergivore que lors de la production du ciment (San Nicolas et al., 2013).

Le procédé de fabrication, quel qu'il soit, suit alors une formation d'un métakaolin ou d'un kaolin calciné présentant une structure composée de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3) essentiellement amorphe. Le rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composant la structure du métakaolin varie de l'ordre 1,2 à environ 2,0 selon la pureté de la source du gisement. Une présence importante de quartz (SiO_2) dans le gisement expliquerait essentiellement cette variation.

L'utilisation du métakaolin comme matériau de construction repose principalement sur le caractère réactif comme ajout cimentaire pouzzolanique. Il peut prendre également d'intérêt notamment dans la formulation des mortiers, des céramiques et porcelaines, des enduits de chaux ou de stuc. Il présente également un intérêt grandissant pour l'élaboration de géopolymère à activation alcaline. Il est présentement utilisé majoritairement comme ajout cimentaire pour améliorer la résistance mécanique des bétons de ciment, réduire leur porosité et augmenter leur durabilité notamment face aux attaques chimiques et la réaction alcali-granulat (RAG) (Siddique, 2011).

La production de métakaolin au Canada est toutefois naissante et limitée à l'ouest du pays. Ce dernier est commercialisé sous le nom de *White Mud*. En Amérique du Nord, une production commerciale de métakaolin est effective en Géorgie (États-Unis) sous le nom commercial de *Metastar* par la compagnie *Imerys* et enfin, une autre source plus petite dans le sud-est des États-Unis (De Spot, 2003). La disponibilité du métakaolin dans l'est de l'Amérique du Nord est supportée par certains distributeurs, dont l'entreprise *Poraver* située en Ontario, Canada. Le métakaolin commercial de cette entreprise se nomme *Metapor*. Ce métakaolin est importé depuis l'Allemagne par cargo et manufacturé en Ontario. Selon le fournisseur, cet ajout cimentaire répond à la norme CSA A3001-03 et la norme ASTM C618 tel un ajout cimentaire de type N ou Naturel. Celui-ci est principalement utilisé actuellement comme ajout cimentaire dans la préfabrication d'éléments en béton de ciment armé et non armé. Selon le fournisseur, la matière qui compose le *Metapor* est essentiellement un métakaolin impur ainsi qu'un ajout de verre recyclé expansé. Les compositions chimiques du *Metapor* ont été tirées de la littérature récente (Brylewska et al., 2018) en raison d'un document du fournisseur datant de plus d'une dizaine d'années.

1.2.6 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de l'industrie de l'acier et de la métallurgie. Le laitier de haut fourneau est un déchet liquide du fer et de la scorie d'acier fondu à haute température à environ 1500°C. Le processus de fabrication de l'acier fait en sorte que la scorie fondue flotte sur la surface, car celle-ci est moins dense. La scorie fondue est ensuite rapidement refroidie à l'aide de jets d'eau à haute pression rendant la matière à l'état amorphe. La scorie d'acier refroidie est ensuite séchée et broyée en fine poudre : le laitier de haut fourneau. Ce dernier contient une bonne partie de silice, d'alumine et de calcium dans sa composition chimique. Le laitier de haut fourneau se comporte tel un matériau hydraulique latente ayant besoin d'un activateur alcalin pour débiter une réaction de prise et de durcissement. La réaction se qualifie entre une réaction pouzzolanique et hydraulique. Le laitier de haut fourneau fait partie des ajouts cimentaires les plus récurrents dans l'industrie du béton de ciment depuis plusieurs décennies. L'utilisation du laitier de haut fourneau en remplacement du ciment dans le béton conventionnel peut être de l'ordre de 30% jusqu'à 85%.

Le laitier de haut fourneau dans le béton de ciment permet notamment une meilleure ouvrabilité, réduit la perméabilité, augmente la résistance aux attaques chimiques et réduit grandement l'impact environnemental du béton (Siddique & Bennacer, 2012).

L'impact environnemental du laitier est virtuellement vu comme étant égal à zéro CO_{2eq} émis lors de la production et seulement l'émission en lien avec le transport est considérée (Siddique & Bennacer, 2012). La facture carbone est remise complètement à l'industrie de la production de l'acier, le laitier de haut fourneau étant vu comme un déchet à valoriser de cette industrie. Il faut noter qu'actuellement la demande pour cet ajout cimentaire artificiel est grandissante pour réduire l'impact environnemental du béton de ciment. Parallèlement, il y a actuellement une tendance dans les projets de limiter la quantité d'acier pour réduire l'empreinte carbone reliée à cette matière. Cette situation particulière d'offre et la demande va mener inévitablement à un déficit dans l'accès au laitier de haut fourneau dans les années à venir. L'approvisionnement au Québec est supporté principalement par les cimenteries et les usines à béton.

1.2.7 Boue de désencrage

Les boues de désencrage sont des résidus lors des processus de fabrication dans l'industrie papetière. Actuellement, l'industrie papetière valorise ces déchets sous forme de combustible ou majoritairement comme amendement de sol pour l'agriculture. Ces déchets sont composés essentiellement de matières organiques et de plusieurs minéraux dont du calcium, de la silice et de l'alumine pouvant une fois calcinés à haute température détenir des propriétés pouzzolaniques en solution alcaline (Peyronnard & Benzaazoua, 2011). La calcination à une température de 700°C à 800°C pendant 2 heures suivies d'un refroidissement brusque à l'air semble être la méthode stipulée idéale pour rendre la matière amorphe (Jang et al., 2018).

1.3 Chaux aérienne calcique

La chaux aérienne ou l'oxyde de calcium provient de la décarbonation du calcaire. Le gisement de calcaire peut être pur ou impur selon la présence d'un autre minéral tel que la dolomie ou le magnésium par exemple. Selon le degré de pureté du gisement de calcaire, il sera davantage question d'une chaux dite calcique, magnésienne ou dolomitique. La décarbonatation se fait à

température avoisinant 900°C dans un four vertical où une matière blanche en poudre y ressort. Ce produit appelé chaux vive est ensuite hydraté avec de l'eau à hauteur d'environ 25% en teneur en eau pour réduire son potentiel de réaction, parfois dangereux pour l'humain. La chaux hydratée devenue éteinte est ensuite utilisée dans plusieurs industries, notamment l'agriculture, l'assainissement des eaux, la construction, la cosmétique et les arts.

La disponibilité de la chaux aérienne vive ou éteinte est assurée en Amérique du Nord par quelques entreprises. Les gisements de calcaire pur ou impur naturellement accessible sur le territoire américain permettent un approvisionnement régulier à un coût raisonnable. La compagnie canadienne *Graymont* supporte l'approvisionnement de cette matière notamment en Amérique du Nord, en Asie et en Océanie. Au Québec, la chaux aérienne calcique commercialisée sous le nom *High Calcium Lime* de *Graymont* est disponible sur le territoire québécois limitant ainsi le transport et l'impact carbone associé de cette ressource nécessaire à la confection des bétons végétaux de chanvre. L'approvisionnement de la chaux aérienne éteinte *High Calcium Lime* de *Graymont* sous forme de poudre a donc été possible pour ce projet de recherche. La Figure 1.14 présente par analyse thermogravimétrique une présence initiale de carbonates (CaCO_3) dans le matériau se décomposant entre 550°C à 800°C dû à la carbonatation probablement lors du procédé d'hydratation de la chaux vive. Le Tableau 1.8 présente un comparatif avec l'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) réalisée au laboratoire s'approchant étroitement avec les valeurs du fournisseur en ce qui concerne la composition chimique en CaO dans le matériau. La différence résulte plutôt dans le taux d'hydroxyde disponible où une mince présence de carbonatation est notée lors de l'essai. Cela peut être dû au délai d'entreposage et des conditions environnantes de stockage du produit.

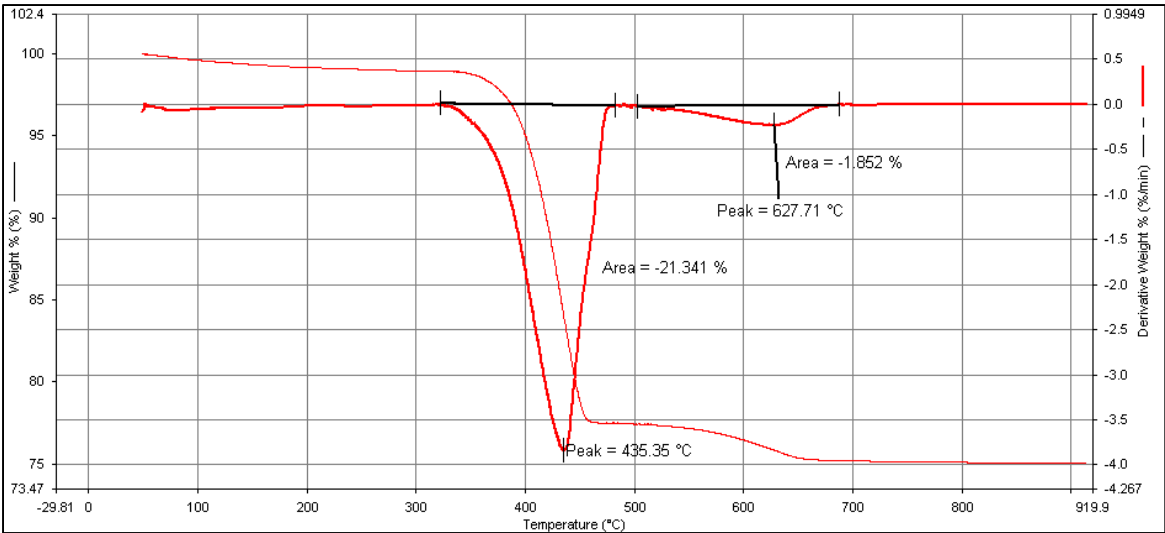


Figure 1.14 Analyse thermogravimétrique de la chaux hydratée calcique (*Graymont High Calcium*) reçue : la perte de masse et sa dérivée en fonction de la température (TGA/DTG)

Tableau 1.8 Comparatif de la composition chimique de la chaux hydratée après analyse (m%)

	Chaux hydratée High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN) [Provenance du fournisseur]	Chaux hydratée High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN) [Suivant l'analyse TGA/DTG; masse initiale = 16,274 mg]
SiO ₂	1,4	-
Al ₂ O ₃	0,3	-
Fe ₂ O ₃	0,2	-
CaO	75,7	75,8 (constant)
MgO	1	-
Autres oxydes	-	-
Perte au feu (%)	24,1	24,2 (incluant l'eau avant 300°C)
Hydroxyde disp.	93,80%	87,74% (perte en carbonate)
Densité relative (g/cm ³)	2,3 – 2,4	2,28 ± 0,03 (mesuré en laboratoire avec de l'eau dans un flacon de type Le Chatelier, voir la méthode au chapitre 3)

1.4 Chaux hydraulique naturelle

La chaux hydraulique naturelle provient généralement d'un gisement de calcaire crayeux siliceux. Le gisement de calcaire impur peut être contaminé par différentes sources de silice notamment l'argile ou des dépôts de crustacés. Afin d'employer la chaux hydraulique naturelle comme liant, elle doit subir un traitement thermique tel que la calcination, l'extinction et éventuellement le broyage. Lors du traitement thermique de la matière, la quantité de silice qui se combinera avec l'oxyde de calcium (CaO) pour former des silicates de calcium (C_2S ou C_3S) dépend principalement de la méthode et de la température de la cuisson. Le traitement thermique de la chaux hydraulique naturelle se réalise à une température maximale de 1000°C se rapprochant de la température de cuisson de la chaux aérienne. L'impact environnemental de la chaux hydraulique naturelle demeure dans la cuisson de la matière et du combustible utilisé pour le traitement thermique. L'extinction, lors du traitement thermique, permet de limiter la présence à moins de 1,0% de chaux vive fortement réactive (CaO) dans le produit final.

L'approvisionnement en chaux hydraulique naturelle en Amérique du Nord est supporté principalement par l'importation provenant d'Europe. Une chaux hydraulique naturelle provenant du Portugal sous le nom commercial *Secil Natural Hydraulic Lime 3,5* (*Secil NHL 3,5*) est couramment utilisée en Europe. La composition minéralogique à l'aide d'un essai à la diffraction aux rayons X présentée à la Figure 1.15 renseigne sur la présence des différentes phases hydrauliques qui compose le matériau (Silva et al., 2014). La Figure 1.16 expose par analyse thermogravimétrique réalisée dans ce travail de recherche la forte présence initiale de calcite (CaCO_3) dans le matériau se décomposant entre 550°C à 800°C . La nomenclature «3,5» dans le nom commercial du produit renseigne sur la résistance minimale en MPa d'un mortier réalisé avec ce matériau selon les procédures prescrites du fabricant. Actuellement, la simple utilisation d'une chaux hydraulique naturelle d'une résistance minimale de 3,5 MPa peut satisfaire à la tenue minimale d'un béton végétal en jeune âge dû en partie à la réaction hydraulique et à la réaction par carbonatation que la chaux hydraulique naturelle apporte en formule hybride. Le choix a donc été fait de prendre ce matériau comme référence dans les essais de cette recherche comme témoin aux formulations des bétons végétaux à l'étude.

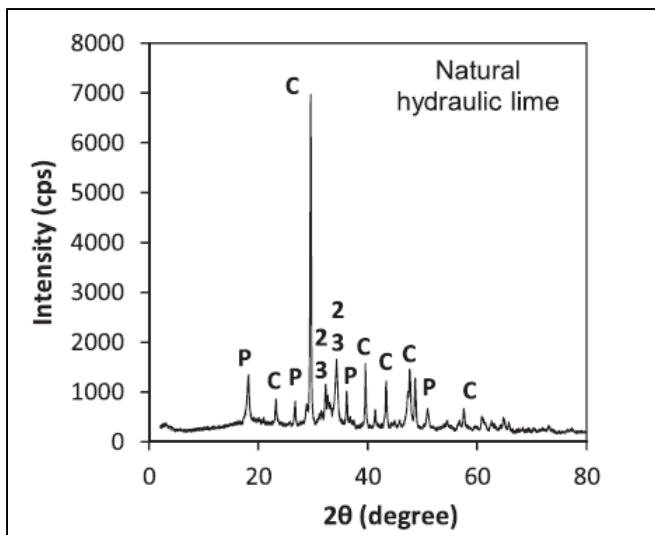


Figure 1.15 Diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de la chaux hydraulique naturelle *Secil* (C : Calcite; P : Portlandite; 2 : dicalcium silicate (C_2S); 3 : tricalcium aluminate (C_3S ou C_3A)) de Silva et al. (2014)

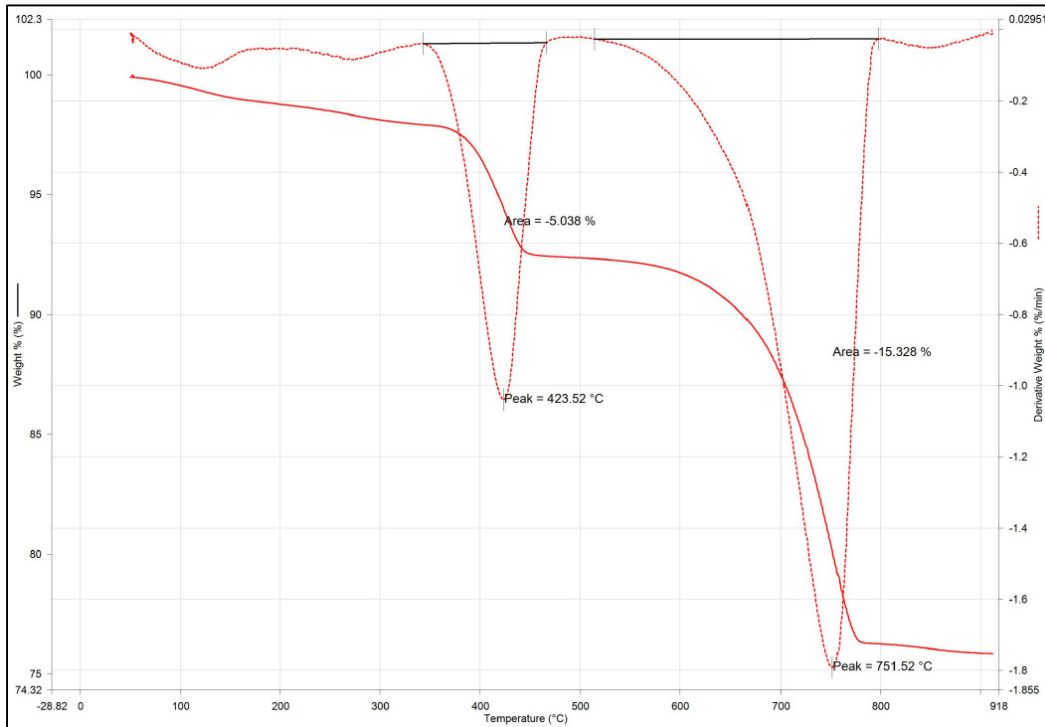


Figure 1.16 Analyse thermogravimétrique de la chaux hydraulique naturelle *Secil* NHL 3,5 reçue : la perte de masse et sa dérivée de la masse en fonction de la température (TGA/DTG)

1.5 Bilan du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif de survoler les éléments primordiaux à prendre en considération selon la littérature en vue de concevoir un liant nord-américain pour la confection d'un béton végétal de chanvre. Parmi les ressources végétales disponibles, le granulats de chanvre, soit la chènevotte, de structure macroscopique et microscopique similaire au bois d'œuvre permet d'atteindre les performances thermiques et hydriques nécessaires pour l'usage d'un tel matériau au sein d'une enveloppe de bâtiment. Le choix d'utiliser le chanvre dans un tel matériau demeure tout d'abord à propos du fort caractère hygroscopique et thermique de la chènevotte, ainsi qu'en raison du caractère intéressant de séquestration du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse du chanvre lors de sa culture aussi ou plus efficace que l'arboriculture. L'utilisation d'un liant à base de chaux permet en premier lieu de lier les particules végétales entre elles et en second lieu de permettre le comportement hygrothermique du matériau final d'avoir lieu grâce à la chaux dans le liant, soit un matériau qui demeure naturellement perméable à la vapeur d'eau suivant sa cure. Les interactions possibles entre les composantes chanvre-liant-eau dans le matériau ont, dès lors, été investiguées et documentées. La réaction de prise hydraulique ou pouzzolanique du liant sera inévitablement impactée par la présence du granulats de chanvre en solution alcaline.

Les connaissances acquises sur la prise de la chaux hydratée par carbonatation nous indiquent que ce phénomène réactionnel survient obligatoirement en présence de vapeur d'eau. De plus, la cinétique de diffusion du CO₂ atmosphérique au travers de la masse de chaux saturée d'eau et en cours du séchage est très lente, voire parfois inexistante. L'incorporation d'une matière minérale hydraulique ou pouzzolanique permet donc de pallier ce problème favorisant la prise du liant à l'intérieur de la masse du matériau final.

Les sources de matières hydrauliques compatibles avec le béton végétal de chanvre sont naturellement géosourcées en Europe et peu accessible en Amérique du Nord. Ce chapitre présentait donc également une exploration de quelques ressources pouzzolaniques disponibles localement sur le territoire nord-américain permettant possiblement de trouver une alternative économique et viable pour l'élaboration d'un liant à base de chaux hydraté adapté au développement d'un béton végétal de chanvre local.

CHAPITRE 2

Objectifs et méthodologie de recherche

2.0 Objectifs

L'orientation de cette recherche porte principalement sur la compréhension de la cure d'un matériau composite à fibre végétale aggloméré à l'aide d'une matrice liante minérale, soit le béton végétal de chanvre considéré comme étant un biomatériau. La qualité de quelques fibres végétales sera étudiée brièvement avant de retenir celle des plus prometteuses pour la confection de biomatériau de construction. En se référant aux différents travaux, principalement européens, déjà complétés sur le sujet, nous avons établi un objectif principal celui d'explorer les possibilités de concevoir un béton à fibre végétale avec les ressources accessibles en Amérique du Nord à coût abordable pour de fins commerciales. Actuellement, la confection de béton artisanal à fibres végétales en Amérique du Nord se réalise majoritairement par l'utilisation de matériaux géosourcés en provenance d'Europe, faisant ainsi grimper les coûts de production. Au niveau commercial, il n'est pas encore viable pour une entreprise canadienne de promouvoir le béton de chanvre suivant les formulations européenne avec des matériaux importés tout en demeurant compétitif sur le marché. Une étude exploratoire visant à recourir aux matériaux actuellement accessibles en Amérique du Nord pour formuler un liant minéral adéquat permettra de répondre à cette problématique locale.

Le constituant principal d'un liant minéral à fibres végétales est majoritairement de la chaux aérienne. En Europe, il est possible d'employer uniquement de la chaux hydraulique ou en conciliation un mélange avec chaux aérienne pour ainsi effectuer une prise rapide du biomatériau. Or, en Amérique du Nord, la chaux hydraulique n'est pas accessible géologiquement. En conséquent, un liant secondaire à prise hydraulique, soit du ciment Portland ou une pouzzolane, est de mise pour produire un béton de chanvre adapté. Dans cette perspective, ce projet de recherche propose d'étudier le potentiel de multiples sources de Matières Premières (MP) de nature pouzzolanique qui s'offrent en Amérique du Nord pour solutionner cette problématique. D'emblée, le ciment Portland est écarté de cette recherche

pour des raisons d'empreinte environnementale. La recherche de sources d'approvisionnement locales de pouzzolane est ici étendue à toute l'Amérique du Nord. Enfin, la fibre végétale employée dans cette recherche, la chènevotte, proviendra du Québec.

Notons que, suivant la formulation de liants adaptés incorporant des MP de sources locales, les formulations les plus prometteuses seront utilisées pour la confection de bétons de chanvre en laboratoire en vue de valider leurs performances dont, notamment, les performances mécaniques (compression et raideur) et hydriques.

Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, l'objectif principal de ce travail de recherche est présenté sous les objectifs spécifiques suivant :

1. Analyser le caractère réactif des différents matériaux pouzzolaniques sélectionnés;
2. Améliorer la cure du biomatériau suivant la compréhension de la prise pouzzolanique par l'optimisation des dosages des constituants du liant minéral;
3. Évaluer la montée en cohésion au fil du temps du biomatériau par des essais non destructifs et par des essais destructifs de convenance;
4. Déterminer, d'après les formulations concluantes du biomatériau, l'impact de la formulation d'un liant pouzzolanique optimisé sur les propriétés physiques hygroscopiques et de capillarité à l'eau du biomatériau formulé.

2.1 Élaboration d'une formulation du liant optimisé d'après la littérature

Actuellement au Canada, il n'existe pas de liants spécifiquement dédiés pour la confection de béton de chanvre. Certes, on peut envisager s'approvisionner en Europe ou aux États-Unis, mais ce faisant on va à l'encontre de l'essence même du développement du béton de chanvre qui se veut un matériau de construction pour contrer la production de GES. Au Canada, on peut facilement s'approvisionner en chaux de type aérienne pour développer un liant pour le béton de chanvre. Comme nous l'avons évoqué précédemment, ce type de chaux fait prise par carbonatation uniquement, laquelle est progressif et non homogène dans la masse des éléments de béton. Ce faisant, à jeune âge, une bonne proportion de la chaux hydratée est non carbonatée. Cette chaux libre non carbonatée dans un béton végétal n'a pas de propriétés liantes

et ne donne pas de cohésion au béton. Plusieurs approches itératives en combinant soit des pouzzolanes et/ou des matériaux hydrauliques tels des ciments Portland ou naturels et des chaux hydrauliques viennent pallier ce problème de montée en cohésion du béton de chanvre. Il faut donc chercher à combiner différentes MP pour élaborer un liant pour le béton de chanvre adapté à l'environnement canadien.

Le choix d'employer des pouzzolanes accessibles en Amérique du Nord à prix compétitif demeure une voie à privilégier, telle que le métakaolin, pour assurer une cohésion adéquate du béton. Pour ce faire, une connaissance approfondie de l'interaction chimique ainsi que des phases cimentaires produites dans un mélange de type chaux-métakaolin est primordiale pour mieux comprendre, améliorer et optimiser la cure des bétons végétaux de chanvre canadien. Également, une meilleure connaissance de l'impact des mélanges investigués quant à la prise et aux propriétés physiques des bétons végétaux de chanvre est essentiel pour l'optimisation d'un liant à saveur local. À cet égard, la propriété physique de 1^{er} plan à considérer est certainement la microstructure porale de la pâte pouzzolanique de chaux hydratée qui dicte en grande partie le potentiel hygroscopique du béton végétal de chanvre.

2.1.1 Le métakaolin comme pouzzolane

Nous avons évoqué à la section précédente l'importance du ratio massique de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ou celui de Si/Al quant à la proportion des différents hydrates formés (CSH, CASH et CAH) en présence de la chaux hydratée. Plus spécifiquement, les types d'hydrate en phase semi-cristalline (métastable) ou cristallins (stable) produits dépendent principalement du ratio massique AS_2/CH . Dans cette perspective, une description détaillée des réactions chimiques du métakaolin en présence de chaux revêt une importance majeure dans l'idée de développer un liant canadien pour le béton végétal de chanvre. Notamment la métakaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ou AS_2) offre des atouts pouzzolaniques à considérer (Murat, 1983; DeSilva, 1990; Siddique & Klaus, 2009).

Les principaux hydrates issus de la prise d'une pâte de chaux-métakaolin sont bien connus. Rojas & Cabrera (2002) ont documenté l'évolution des principaux hydrates qui se forment au sein d'une pâte de chaux-métakaolin à température ambiante en cours de cure, soit les CSH,

C_2ASH_8 (stratlingite ou gehlénite hydraté) et C_4AH_{13} (tétracalcium d'aluminate hydraté). Or, la cinétique d'apparition des hydrates formés dans un mélange de chaux et de métakaolin en solution aqueuse est particulièrement dépendante de la température et du temps de cure. Suivant une analyse thermogravimétrique (TGA/DTG), Rojas & Cabrera (2002) ont montré que les hydrates apparaissent plus rapidement lors d'une cure à 40°C ou 60°C qu'à la température ambiante. Le type d'hydrates formé dépend particulièrement des proportions massiques du trio SiO_2 - Al_2O_3 - CaO tel que schématisé à la Figure 2.1. D'après DeSilva (1992), cette figure représente, la projection des phases hydratées possible de précipiter dans un mélange chaux-métakaolin à 55°C. Les régions I et II représentent celles où il y a un équilibre chimique entre les phases d'hydrogarnet coexistant avec les phases de type CSH ($Ca/Si > 1,7$). La région III représente quant à elle celle où il y a un équilibre chimique entre les phases d'hydrogarnet coexistant avec les phases de type CSH ($1,7 > Ca/Si > 0,8$). La dernière région IV représente celle où il y a un équilibre chimique entre les phases d'hydrogarnet coexistant avec les phases de gehlénite (C_2ASH_8) et les phases de type CSH ($Ca/Si = 0,9$). Selon cet auteur, la structure chimique de certains de ces hydrates peut également évoluer dans le temps pour former des liens chimiques plus solides entre eux permettant une augmentation significative de la cohésion de la pâte durcie. L'évolution des hydrates formés est proportionnelle à la densification de la structure de la pâte durcie.

CSH - Il existe une évolution de la structure chimique des phases hydratées de type CSH qui dépend essentiellement du ratio massique Ca/Si . Lorsque le ratio massique Ca/Si est près de 1,5, la formation d'un CSH moins évolué surnommé jennite est favorisé. À l'inverse, lorsque le ratio massique Ca/Si est plutôt près de 0,83 ou 5/6, la formation d'un CSH plus évolué surnommée tobermorite est accentué (Pelisser et al., 2012). D'après la récente revue de la littérature sur les propriétés des phases cimentaires hydratées de type CSH réalisée par Tang et al. (2021), les auteurs expliquent notamment l'importance du ratio massique Ca/Si dans la structure des CSH. Une augmentation du ratio Ca/Si mènerait à une diminution du niveau de polymérisation dans la structure des chaînes de silicates composant les CSH. Le niveau de polymérisation des chaînes de silicates est étroitement lié aux propriétés mécaniques finales renforçant ainsi la matrice liante. Lors de la détection au microscope à balayage électronique (SEM) des différents types de CSH, les mêmes auteurs rapportent une différence notable dans

leur morphologie respective. La morphologie des CSH les plus évolués de type 1 surnommée tobermorite se caractérise telles des fibres intercalées sous forme de toile ou d'un filet tandis que la morphologie des CSH moins évolués de type 2 ou 3 surnommée jennite se caractérise plutôt telles des plaques superposées. Cette différence physique notable au SEM explique en partie le comportement distinctif de ces types d'hydrates, notamment en matière de leur résistance mécanique ainsi que leur structure porale respective.

À température plus élevée, soit à 60°C une seconde phase hydratée plus évoluée apparaît plus rapidement lors de l'essai thermogravimétrique (TGA/DTG), soit l'hydrogarnet (C_3AH_6) qui semble être l'hydrate le plus stable et cristallisé d'une pâte chaux-métakaolin (Rojas & Cabrera, 2002). Le consensus scientifique n'est pas clair si cet hydrate pourrait se former à température ambiante également. En sommes, l'évolution croissante en densité des hydrates débute essentiellement depuis la jennite, la tobermorite, la stratlingite et la gehlénite, suivi de l'hydrate C_4AH_{13} et enfin l'hydrogarnet (C_3AH_6) de formule très dense par rapport aux autres hydrates précédents beaucoup moins denses (Frías & Cabrera, 2000; Siddique & Klaus, 2009).

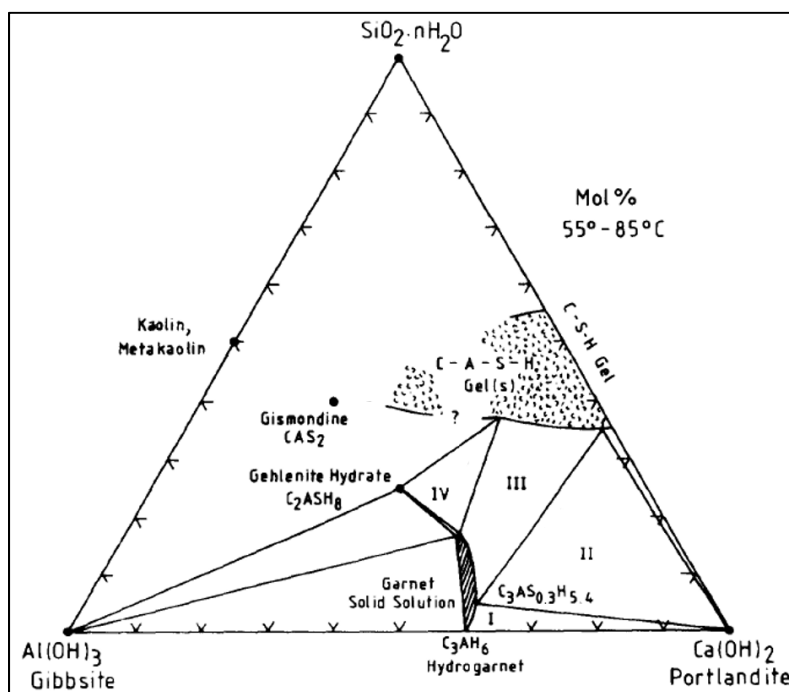


Figure 2.1 Diagramme ternaire massique $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ de la projection des phases hydratées possible de précipiter dans un mélange chaux-métakaolin à 55°C de DeSilva, (1992)

Les pâtes de chaux avec pouzzolanes ont la particularité d'avoir un réseau poral plus fin que les mélanges cimentaires sans pouzzolane. Au travers de leur revue de la littérature sur le métakaolin utilisé comme ajout cimentaire, Siddique et Klaus (2009) ont soulevé que le métakaolin avait la particularité d'affiner considérablement la grosseur des pores dans la microstructure des pâtes cimentaires lors d'essais à la porosimétrie par intrusion de mercure (Khatib & Wild, 1996). En effet, la proportion des pores de rayons plus petits que $0,02\ \mu\text{m}$ se voit augmenter lorsque la proportion en métakaolin dans le mélange ciment Portland-métakaolin augmente passant de 0% à 15% de substitution de ciment par le métakaolin (Khatib & Wild, 1996). Les mêmes conclusions ont été répertoriées par Khatib & Clay (2004) lors de leur essai de capillarité par immersion dans l'eau pour des mélanges de béton de ciment incorporant du métakaolin notant ainsi une réduction de la pénétration d'eau dans les spécimens de béton : la perméabilité des bétons de ciment se trouvant donc ainsi réduite en présence de métakaolin. Les chercheurs Khatib & Clay (2004) mentionnent que les hydrates plus denses formés lors des réactions pouzzolanique sont à l'origine de cet affinement poral de la pâte hydratée, mais que la densification des hydrates formés entre 14 et 28 jours de cure augmente légèrement la porosité totale par absorption d'eau des spécimens en raison d'une réduction du volume de solide des hydrates formés à ce moment plus dense. Khatib & Clay (2004) supposent donc la formation d'hydrogarnet (C_3AH_6) entre 14 et 28 jours de cure à température ambiante densifiant ainsi légèrement la pâte observée par leur essai avant 14 jours de cure lorsque les autres hydrates moins denses prédominaient dans la pâte telle que les CSH, C_2ASH_8 et C_4AH_{13} . Cela supporte le fait selon ces auteurs que l'hydrogarnet pourrait se former à la température ambiante entre 14 et 28 jours de cure.

Est-ce que la réduction de la dimension des pores des pâtes pouzzolaniques par le métakaolin ainsi que par les hydrates formés dans la pâte a un impact réducteur sur la qualité hygroscopique de régulation d'humidité des futurs bétons végétaux qui le compose? Répondre à cette question permettrait de mieux approuver cette pouzzolane prometteuse comme matériau réactif composant le liant à base de chaux aérienne d'un futur béton végétal.

Dans la thèse de doctorat réalisée par Magniont (2010), l'auteure a approfondi les propriétés intrinsèques de sorption/désorption de vapeur d'eau d'un mélange hydraulique et pouzzolanique constitué de chaux hydraulique naturelle (NHL-5 MPa) et de métakaolin (ratio $\text{Si}/\text{Al} = 2,5$) de proportion massique égale de 50% chacun pour la formulation d'un liant minéral pour la confection d'un béton végétal de chanvre. En comparant son mélange de bases NHL5/Métakaolin comme témoin (TEM), le même mélange avec des adjuvants (ADJ) améliorant la porosité globale de la matrice liante à un mélange de liant de référence, soit la NHL-5 MPa uniquement, la chercheuse remarque que son mélange TEM possède effectivement des propriétés intrinsèques de sorption/désorption de vapeur d'eau réduite par rapport à la NHL de référence. La chercheuse mentionne que les adjuvants introduits permettent toutefois d'atteindre les performances de la NHL de référence. Une représentation graphique de ses résultats de sorption/désorption de vapeur d'eau de ses échantillons est présentée à la Figure 2.2. Ceci nous indique qu'il est plausible de croire à des performances hygroscopiques réduites de régulation d'humidité des bétons végétaux composés de métakaolin sans adjuvant. Magniont (2010) mentionne également que le choix unique d'utiliser une proportion massique de 50%/50% en chaux hydraulique naturelle (NHL5) et en métakaolin était un choix de formulation basé sur la meilleure résistance mécanique à la compression des pâtes liantes uniquement suivant son plan d'essai de substitution par le métakaolin dans le mélange à partir de 12,5% jusqu'à 50%. Ce choix de formulation n'était donc pas basé sur une optimisation de la consommation de la chaux libre dans le mélange. Celui-ci optimisé selon le calcul stœchiométrique qu'elle présente à environ 26,4% de substitution par le métakaolin afin de maximiser la formation d'hydrates théoriques dans la pâte liante. Une optimisation en proportion massique d'une formulation de type chaux-pouzzolanes sans adjuvant s'avère donc une approche pertinente à investiguer afin de tenter de pallier ce problème de réduction hygroscopique de la matrice liante en raison des réactions de type pouzzolanique.

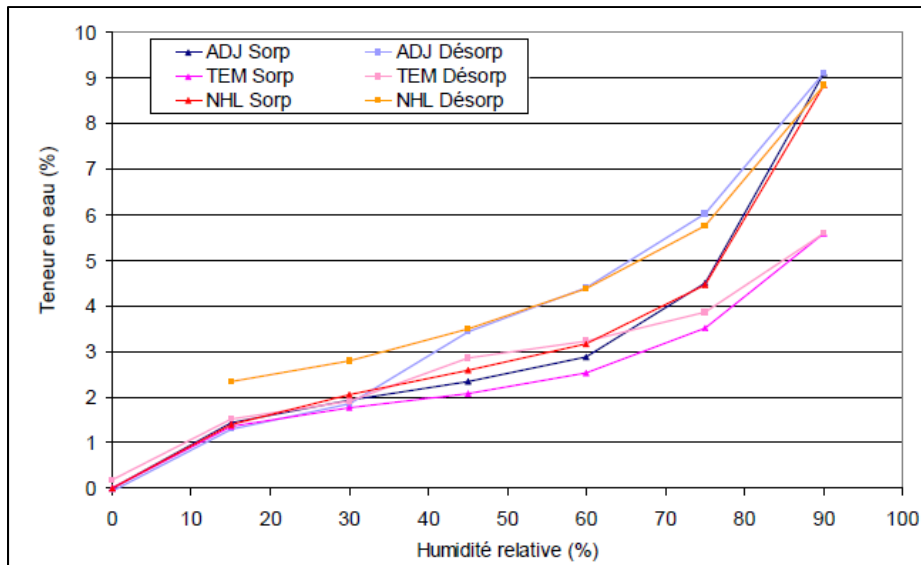


Figure 2.2 Isothermes de sorption/désorption de vapeur d'eau à 20°C des liants TEM, ADJ et NHL de Magniont (2010)

Or, tel que présenté précédemment, il a été soulevé par Magniont (2010) qu'une formulation massique de 50%/50% en chaux hydraulique naturelle 5 MPa-Métakaolin ($Si/Al=2,5$) affectait de façon notoire le caractère hygroscopique de la matrice liante diminuant possiblement l'efficacité du futur béton végétal à réguler les fluctuations de l'humidité à l'intérieur du milieu bâti. Magniont (2010) a donc tenté d'ajouter des adjuvants chimiques à la formulation pour améliorer le caractère hygroscopique de la pâte liante.

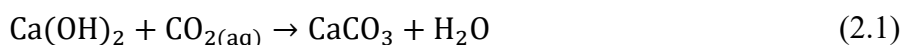
Cette approche par Magniont (2010) supporte les spécificités présentées précédemment dans ce chapitre sur l'affinement des pores d'une matrice liante pouzzolanique ou cimentaire avec l'ajout de métakaolin. D'après les récents travaux de recherche réalisés par Bharadwaj et al. (2021) portant notamment sur la prédiction du volume des pores et de leur connectivité entre elles, les chercheurs proposent une approche basée sur un modèle théorique de prédiction des pores dans un béton de ciment incluant des cendres volantes. Bharadwaj et al. (2021) mentionnent que la substitution du ciment Portland hautement réactif par une cendre volante moins réactive augmente significativement les volumes capillaires des pores. En comparant deux sources de cendres volantes, soit la première moins réactive que la seconde, les auteurs remarquent une augmentation effective des volumes capillaires des pores pour les mélanges incorporant la cendre volante moins réactive que les formulations incorporant la seconde

endre volante plus réactive supportant donc davantage leur hypothèse discutée. Cela nous amène à nous questionner sur l'intérêt d'innover une formulation chaux-pouzzolanes de nature ternaire à 2 pouzzolanes différentes plutôt que binaires à une seule pouzzolane afin d'augmenter possiblement les volumes capillaires des pores dans la matrice liante pouzzolanique.

En se référant aux récents travaux réalisés par Bharadwaj et al. (2021), est-il possible d'augmenter les volumes capillaires des pores connectés des pâtes liantes pouzzolaniques en substituant une pouzzolane moins réactive au métakaolin améliorant ainsi l'hygroscopicité des bétons végétaux formulés?

2.1.2 Formulation théorique optimisée d'un liant pour le béton végétal de chanvre

Pour optimiser la montée en cohésion d'un béton de chanvre, il convient de maximiser les différentes réactions chimiques qui ont cours suivant sa mise en place en cherchant à tirer profit des réactions de carbonatation et pouzzolaniques propre à un liant de chaux avec pouzzolane. La cinétique des mécanismes est fort complexe. Le béton de chanvre constitué d'un liant de chaux avec pouzzolane ne confère pas leur cohésion uniquement quant aux réactions hydrauliques et/ou pouzzolaniques. En effet, dès les premiers instants d'assèchement du béton de chanvre, le CO₂ atmosphérique pénètre son réseau poreux pour carbonater la chaux hydratée et former de la calcite sous forme cristallisée rigidifiant ainsi le béton principalement sur ses surfaces exposées à l'air. En effet, la carbonatation se produit généralement lorsque la surface du matériau est exposée à l'air où une concentration naturelle en CO₂ est présente. La réaction de carbonatation survient rapidement dans les premiers millimètres de l'élément de béton et dans les premières heures suivant l'exposition après le départ des premières molécules d'eau par évaporation. L'échange chimique se produit lorsqu'une molécule de chaux hydratée échange une molécule d'eau liée pour une molécule de CO₂ dissous synthétisé par l'équation suivante :



Il se crée alors à cet instant une couche de quelques millimètres carbonatée sur les surfaces exposées à l'air atmosphérique. Cette couche présente un affinement des pores dans la

microstructure par la cristallisation de la chaux hydratée en carbonate de calcium (CaCO_3). Cette couche de carbonate de calcium empêche la diffusion efficace du CO_2 à l'intérieur du matériau (Lawrence et al., 2006; Pontiga et al., 2013; Samari et al., 2020). La chaux hydratée solubilisée à l'intérieur du matériau perd donc progressivement son eau par diffusion suivie par évaporation sans nécessairement réagir avec le CO_2 atmosphérique pour que la réaction de carbonatation se produise. En définitive, la chaux hydratée présente au centre du matériau demeure en poudre sèche n'assurant plus de liaison chimique satisfaisante à court et à moyen terme. À plus long terme, voire à très long terme, le CO_2 atmosphérique progressera dans la masse de chaux par diffusion des molécules d'eau chargée en carbonate dissous favorisant une cristallisation de la chaux hydratée au centre du matériau. La carbonatation de la totalité de la chaux hydratée d'un mortier composé de chaux aérienne par exemple ne peut toutefois rarement être totalement complète dû à la lenteur de la cinétique de progression du CO_2 atmosphérique au travers de la masse, même par exemple après plusieurs siècles d'exposition à l'air atmosphérique dans le cas d'une étude portant sur un mortier médiéval (Lawrence et al., 2006).

La contrainte temporelle de cette réaction à cinétique lente soutient un développement réactionnel plus efficace en cœur du matériau par des réactions pouzzolaniques. Le mode réactionnel préconisé pour la cure des futurs bétons végétaux dans cette recherche est donc de favoriser les réactions pouzzolaniques en cœur et les réactions de carbonatation sur les couches externes exposées à l'air atmosphérique. Cette formule hybride réactionnelle permet d'améliorer l'efficacité de la cure d'un tel matériau en vue d'en faire un produit manufacturé et non plus uniquement artisanal.

Pour ce faire, la solution principale retenue est de favoriser une consommation complète théorique de la chaux hydratée en cœur du matériau par les réactions pouzzolaniques décrites précédemment. Il est possible d'en calculer cette consommation par les connaissances théoriques existantes en ce qui concerne le mode réactionnel de la métakaoline ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ou AS_2) en solution avec la chaux hydratée (CH) selon un rapport massique fixe, soit AS_2/CH favorisant la formation de certains hydrates plus que d'autres.

D'après les travaux de Murat (1983) sur les mélanges pouzzolaniques chaux-métakaolin cités à plusieurs reprises dont dans les travaux réalisés par De Silva (1992) portant sur le même sujet ainsi que cité dans la revue littéraire plus récente réalisée par Siddique et Klaus (2009), Murat (1983) propose trois réactions d'hydratation possibles à température ambiante dans un mélange pouzzolanique chaux-métakaolin, soit :

i) Formation favorisée de tétracalcium aluminate hydraté (C_4AH_{13})



Où le ratio massique molaire total $AS_2 / 6CH = 0,5$

ii) Formation favorisée de tricalcium aluminate hydraté ou hydrogarnet (C_3AH_6)



Où le ratio massique molaire total $AS_2 / 5CH = 0,6$

iii) Formation favorisée de gehlénite hydratée ou stratlingite (C_2ASH_8)



Où le ratio massique molaire total $AS_2 / 3CH = 1,00$

En supposant un taux d'hydratation complet du mélange à 100%, celui qui nécessite le moins de pouzzolane à incorporer au mélange, soit le ratio AS_2/CH le plus bas en pouzzolane est la première équation des trois présentée précédemment, soit l'équation (2.2) favorisant la formation de C_4AH_{13} et des 2 moles de CSH de type tobermorite pour chaque mole de C_4AH_{13} formé. De plus, du fait que la seconde équation (2.3) présentée est très près de la stœchiométrie de la première équation (2.2) et que les réactions réelles dans le mélange peuvent être imparfaites d'après l'hypothèse que le ratio massique en CH réel peut être variable selon la formation progressive d'hydrates au cours du temps de la cure, la formation d'hydrates secondaires de type hydrogarnet, voire de type stratlingite peuvent toutefois toujours se former également. L'aspect important de ce calcul théorique repose sur la consommation de la chaux

hydratée (CH) dans le mélange. En choisissant de favoriser la première équation (2.2) présentée, il est possible de calculer les proportions théoriques d'un mélange chaux-métakaolin pour consommer la totalité de la chaux libre hydratée (CH) par la métakaolinite (AS₂) présente selon la composition chimique massique des deux constituants.

2.2 Vers une approche basée sur une formulation d'un mélange ternaire pouzzolanique

Suivant les aspects théoriques décrits précédemment dans le chapitre 1, l'adjonction d'une pouzzolane prometteuse telle que le métakaolin (MK) s'avère être une avenue attrayante en vue de répondre aux divers critères de conception soit notamment la consommation de la chaux libre (CH) en cœur du matériau par la métakaolinite (AS₂). Or, plusieurs préoccupations demeurent en ce qui concerne le comportement final du biomatériau composite confectionné. Une singularité soulevée par la littérature sur la réduction des pores par la réaction pouzzolanique entre la métakaolinite et la chaux libre a permis d'orienter les questions de recherche suivantes en vue de l'ébauche du plan expérimental de ce mémoire afin de répondre à ses questions :

Est-ce que la réduction de la dimension des pores des pâtes pouzzolaniques par le métakaolin ainsi que par les hydrates formés dans la pâte a un impact réducteur sur la qualité hygroscopique de régulation d'humidité des futurs bétons végétaux qui le compose?

En se référant aux récents travaux réalisés par Bharadwaj et al. (2021), est-il possible d'augmenter les volumes capillaires des pores connectés des pâtes liantes pouzzolaniques en substituant une pouzzolane moins réactive au métakaolin améliorant ainsi l'hygroscopicité des bétons végétaux formulés?

Dans le cas proposé d'une formulation ternaire à 2 pouzzolanes, une optimisation des constituants formulés est primordiale pour répondre aux divers questionnements théoriques pouvant améliorer la cure des matériaux de bétons végétaux à base de chaux sans toutefois diminuer significativement leur potentiel hygroscopique (Figure 2.3). En définitive, en admettant une hydratation complète et que la réactivité des constituants satisfait l'équation stœchiométrique (2.2) pour un ratio fixe AS₂/CH égale à 0,5 (paramètre fixe théorique

incertain), il a été convenu d'étudier des pâtes de chaux contenant divers dosages en matériaux pouzzolaniques (paramètre variable certain) pour un ratio variable Si/Al et ce, en vue de quantifier le degré de chaux libre résiduel suivant la réaction pouzzolanique ainsi que le volume des pores capillaires présent dans la pâte durcie (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Description des paramètres fixes et variables de la formulation du liant optimisé

Paramètres de formulation du liant	Description du paramètre
Paramètre variable certain	Ratio massique Si/Al ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) total présent dans le mélange
Paramètre fixe théorique incertain	Rapport Ca/Si (CaO/SiO_2) restant suivant la consommation de la chaux théorique par la métakaolinite (AS_2) selon un rapport AS_2/CH fixé à 0,5 (voir équation (2.2))

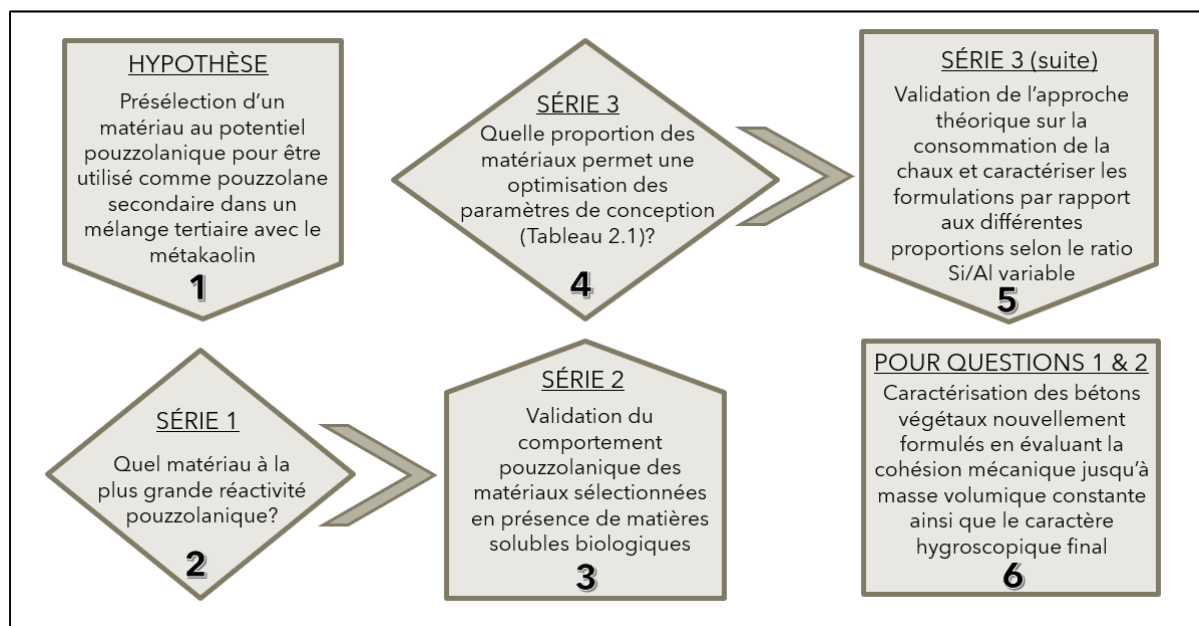


Figure 2.3 Diagramme de la méthodologie décisionnelle du projet selon l'approche d'une formulation ternaire optimisée

2.3 Synthèse du plan expérimental et des types de caractérisation

Le plan expérimental est synthétisé sous forme d'un schéma linéaire en quatre volets distincts s'exécutant l'un à la suite de l'autre. En se référant à Figure 2.4 présentant la vue d'ensemble du plan expérimental, chacun des quatre volets se divise alors en sous-volet où les deux principaux objectifs expérimentaux du volet y sont clairement mentionnés. Les essais de caractérisation qui en découleront viendront répondre aux différents objectifs expérimentaux de chaque volet du plan expérimental. Ensemble, l'achèvement successif de ces quatre volets mènera à une possible optimisation des bétons végétaux à base de chaux hydratée, soit l'objectif premier de ce travail.

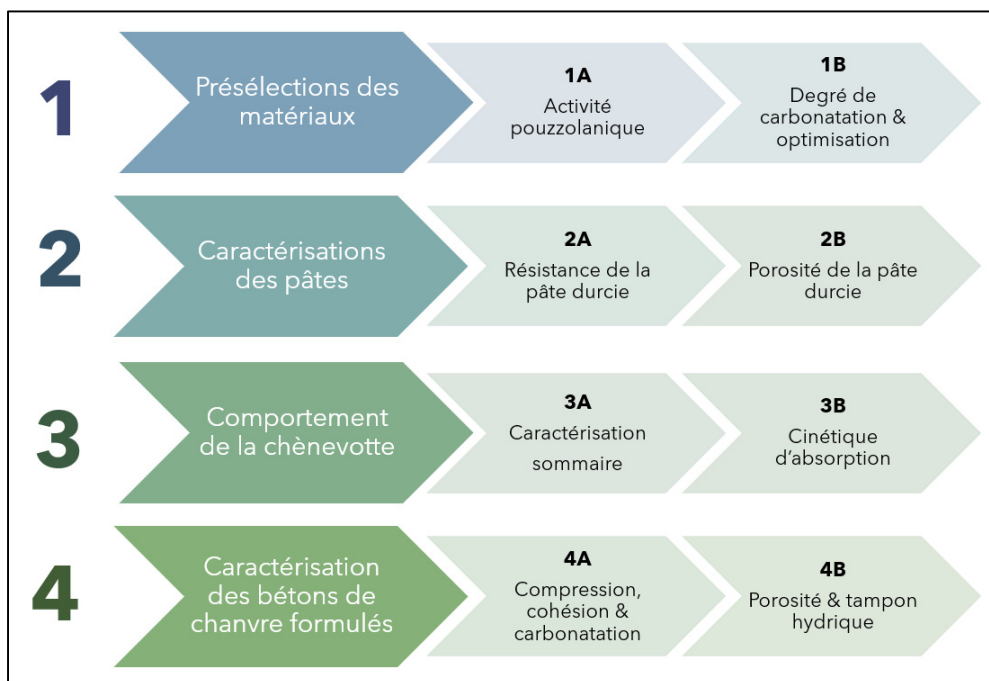


Figure 2.4 Schéma de la vue d'ensemble du plan expérimental linéaire

Les caractérisations effectuées dans ce travail de recherche sont sommairement représentées dans le Tableau 2.2 suivant. Le tableau est subdivisé en différentes catégories d'essai soit, A- Masses volumiques et porosités, B- Distribution des particules, C- Propriétés de consistance, D- Évolution de la cure/réaction et E- Propriétés suivant la cure. Les essais sont découplés par types d'éléments à savoir les granulats végétaux, poudres minérales, pâtes fraîches, pâtes durcies et enfin les bétons végétaux.

Tableau 2.2 Synthèse des essais effectués dans ce mémoire de recherche

Type de caractérisation	Granulats végétaux	Poudres minérales	Pâte fraîche	Pâte durcie	Béton végétal
A- Masses volumiques et porosités					
Masse volumique apparente	X	X	X		
Masse volumique absolue	X	X			
Porosité ouverte à l'eau				X	X
Absorption d'eau	X				
Prise de pH	X	X			
B- Distribution des particules					
Granulométrie par tamisage	X				
Granulométrie laser		X			
C- Propriétés de consistance					
Essai d'étalement			X		
Essai de teneur en air			X		
Essai de rétention d'eau			X		
D- Évolution de la cure/réactions					
Calorimétrie isotherme			X		
Analyse thermogravimétrique (TGA)				X	
Essai de résonance non destructif					X
Évolution du séchage					X

Type de caractérisation (suite)	Granulats végétaux	Poudres minérales	Pâte fraiche	Pâte durcie	Béton végétal
E- Propriétés suivant la cure					
Compression mécanique				X	X
Essai de capillarité					X
Essai de la capacité de tampon hydrique (VCTH ou MBV)					X
Essai de caractérisation thermique					X
Essai de caractérisation acoustique					X

CHAPITRE 3

Matériaux et méthodes d'essai

3.0 Matériaux

Les matériaux de source minérale qui ont été utilisés dans cette recherche sont présentés individuellement dans le chapitre 1. Les pouzzolanes utilisées sont : la poudre de verre (PV), la terre diatomée du Nevada (MN), la terre diatomée de l'Oregon (WL), la zéolithe (ZE), la perlite expansée (PE), le métakaolin (MK), le laitier de haut fourneau (GB), la cendre de boue de désencrage (PS). Les deux chaux utilisées sont : la chaux hydratée du Québec (CHX) et la chaux hydraulique naturelle du Portugal (NHL). La chènevotte utilisée dans cette recherche provient d'une tige de chanvre du cultivar « Férimon ». Les tiges de chanvre ont été récoltées au Lac St-Jean (QC) et défibrées au Québec dans la ville de Lavaltrie.

3.0.1 Composition chimique

La composition chimique des matières premières sélectionnées n'a pas été réalisée lors de ce projet de recherche. Les compositions chimiques provenant des fabricants ont été employées sauf pour le métakaolin *Metapor*, celui-ci provenant de la littérature récente (Brylewska et al., 2018) en raison d'un document du fournisseur datant de plus d'une dizaine d'années. Le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2 suivants présentent les compositions chimiques d'après les fournisseurs et de la littérature pour les matériaux utilisés dans ce mémoire. La composition chimique de la chènevotte est présentée à l'Annexe III, celle-ci provient d'un cultivar similaire à celui employé dans cette recherche tirée de la littérature.

Tableau 3.1 Compositions chimiques des pouzzolanes étudiées (% de masse)

	Poudre de verre Verrox (Québec, CAN)	Terre diatomée CELATOM MN-51 (Nevada, US)	Terre diatomée WHITELAKE EARTH (Oregon, US)	Zéolithe Z-Lite (Colombie- Britannique, CAN)	Perlite Expansée Perlite Canada (Québec, CAN)	Metakaolin (metapor) (Brylewska, 2018) (Ontario, CAN)	GGBS (Newcem, Lafarge Avril 2021) (Québec, CAN)
SiO ₂	74,1	73,6	80,0	72,9	73,2	54,3	36,3
Al ₂ O ₃	2,0	7,8	7,9	12,6	13,5	26,7	10,3
Fe ₂ O ₃	0,4	1,8	2,4	1,7	1,2	0,4	0,9
CaO	13,6	5,6	1,3	1,4	0,7	3,1	43,4
MgO	1,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,6	6,6
K ₂ O	0,6	-	0,7	4,0	3,9	1,4	-
Na ₂ O	7,2	-	0,4	1,1	3,4	12,6	0,5
TiO ₂	0,1	-	0,4	0,2	0,1	-	-
Autres oxydes	-	2,3	-	-	-	-	-
Perte au feu (%)	-	5,5	-	-	1,2	-	-
Densité	2,54	2,00	2,00	-	-	2,06	2,88

Tableau 3.2 Composition chimique des types de chaux étudiées (% de masse)

	Chaux hydratée High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN)	Chaux hydraulique naturelle Secil 3.5 (Grilo et al., 2014) (Portugal)
SiO ₂	1,4	5,7
Al ₂ O ₃	0,3	1,8
Fe ₂ O ₃	0,2	1,2
CaO	75,7	62,0
MgO	1,0	1,0
K ₂ O	-	0,5
Na ₂ O	-	0,1
TiO ₂	-	0,1
Autres oxydes	-	-
Perte au feu (%)	24,1	26,0
Hydroxyde disp.	93,8%	> 25,0%
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	25 275	-
Surface BET (m ² /g)	16,6	-
Densité	2,30 – 2,40	2,70

3.0.2 Nomenclature des matières premières disponibles

Le Tableau 3.3 présente les étiquettes utilisées dans ce mémoire pour chaque matériau disponible. Les huit premiers matériaux de la liste sont des pouzzolanes et les deux derniers matériaux sont des types de chaux.

Tableau 3.3 Étiquette des matières premières disponibles

	Étiquette
Poudre de verre, Verrox (Québec, CAN)	PV
Terre diatomée, CELATOM MN-51 (Nevada, US)	MN
Terre diatomée, WHITELAKE (Oregon, US)	WL
Zéolithe, Z-Lite (Colombie-Britannique, CAN)	ZE
Perlite expansée, Perlite Canada (Québec, CAN)	PE
Metakaolin (metapor) (Ontario, CAN)	MK
GGBS (Newcem, Lafarge Avril 2021) (Québec, CAN)	GB
Boue de désencrage (Paper sludge), <i>Cascade</i> (Québec, CAN)	PS
Chaux hydratée, High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN)	CHX
Chaux hydraulique naturelle, Secil 3,5 (Portugal)	NHL

3.1 Méthode de caractérisation des matières premières minérales

Cette section présente la méthode de caractérisation des matières premières minérales étudiées. En ce qui concerne les matières premières végétales utilisées, le lecteur peut se référer à l'Annexe III présentant les autres méthodes de caractérisation relatives aux bétons végétaux de chanvre et des granulats de chanvre.

3.1.1 Masse volumique apparente tassée et absolue

La masse volumique apparente des matières premières sèches reçues est réalisée à l'aide d'un récipient cylindrique normalisé de volume connu de 400 cm³. La matière en poudre est introduite de façon successive sur 3 couches en prenant soin de donner quelques coups de maillet sur le cylindre afin d'éviter tout vide d'air sur le rebord du récipient. Le dessus du

cylindre est ensuite arasé à l'aide d'une règle et pesé sur une balance d'une précision 0,1g. Chaque matériau est pesé ainsi trois fois.

La masse volumique absolue, $\rho_{\text{abs}}(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3})$ des matières premières sèches reçues est mesurée selon la norme CSA A3004-A2 en prenant comme liquide étalon l'eau disponible au laboratoire à température ambiante, les matières sèches séparément n'étant pas hydrauliques. La prise de mesure se fait en remplissant un flacon de type Le Chatelier d'une masse d'eau (m_1) et ensuite d'une masse (m_2) de matériaux et d'eau (m_3) pour en déduire le volume déplacé par le matériau granulaire. L'équation de la masse volumique absolue suivante présente la relation entre la masse d'eau déplacée par le matériau submergé selon la masse volumique de l'eau pour en déduire son volume intrinsèque absolu.

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{m_2}{V_p} = \frac{m_2 \cdot \rho_{\text{eau}}}{m_1 + m_2 - m_3} \quad (3.1)$$

- ❖ m_1 : masse du flacon rempli totalement d'eau (g)
- ❖ m_2 : masse de la poudre sèche introduite (g)
- ❖ m_3 : masse du flacon rempli totalement d'eau et de la poudre sèche introduite (g)
- ❖ V_p : volume intrinsèque de la poudre sèche (cm^3)
- ❖ ρ_{eau} : masse volumique de l'eau à une température donnée (g/cm^3)

3.1.2 Granulométrie laser

La granulométrie laser a été réalisée sur les poudres sélectionnées, soit la chaux hydratée calcique (CHX), le métakaolin (MK), le laitier de haut fourneau (GB) et la terre diatomée (WL) à l'aide de l'appareil Mastersizer Hydro EV de Malvern Instruments (Figure 3.1). La gamme de mesure effectuée s'étale de 0,05 à 500 μm . Un total de cinq mesures pour chaque poudre sélectionnée a été fait. Le solvant utilisé est de l'eau, aucun matériau seul étant hydraulique. Lors de l'essai, l'ultrason a été employé pendant un total de 150 secondes avec une rotation à 2000 rpm de l'agitateur pour l'ensemble des matériaux granulaires testés. L'ultrason permet de réduire l'agglomération des particules pouvant fausser les résultats lors de la mise à l'essai.

Une approximation sur la forme des particules non sphériques a été choisie afin de limiter toute éventuelle imprécision par l'appareil de mesure.



Figure 3.1 Mastersizer
Hydro EV de Malvern
Instruments

Suivant les résultats obtenus lors de l'analyse granulométrique au laser, il est possible de déduire la valeur d'étalement SPAN du matériau granulaire. Cette valeur nous renseigne sur le niveau d'étalement granulométrique des particules. Plus la valeur SPAN est grande plus le matériau connaît une granulométrie étalée. Au contraire, une petite valeur SPAN renseigne davantage à une granulométrie serrée.

$$\text{SPAN} = \frac{Dv(90) - Dv(10)}{Dv(50)} \quad (3.2)$$

- ❖ SPAN : Coefficient de polydispersité;
- ❖ $Dv(50)$: diamètre volumique médian (μm);
- ❖ $Dv(90)$: diamètre correspondant à 90% des particules en volume cumulé;
- ❖ $Dv(10)$: diamètre correspondant à 10% des particules en volume cumulé.

3.1.3 Prise de pH

La prise du potentiel hydrogène (pH) nous informe du pH de la solution d'eau de chanvre ainsi que celle-ci mélangée à de l'eau de chaux. Initialement, l'eau saturée en chaux présente un pH entre 12,0 et 13,0 selon le type de chaux et sa pureté. L'introduction des fibres de chanvre viendra émettre des résidus organiques acides dans la solution. Une eau de chaux-chanvre

présentera donc un pH différent qu'une eau de chaux pure. L'essai de prise de pH permet de mesurer l'impact d'une solution chaux-chanvre saturée en eau. Suivant la calibration du pH-mètre (Figure 3.2), la prise de mesure s'effectue en abaissant la sonde de pH dans la solution pendant quelques minutes avant la stabilisation de la mesure.

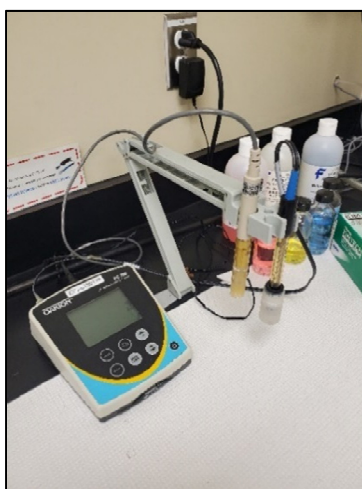


Figure 3.2 Station de prise de pH

3.2 Méthodes de caractérisation des pâtes de chaux à l'état frais et l'état durci

Les bétons végétaux de chanvre sont constitués de trois composants distincts : le granulats de chanvre, le liant minéral et l'eau. Afin d'optimiser les performances du béton végétal de chanvre à l'état durci, une bonne compréhension du comportement de la pâte fraîche et durcie est en revanche nécessaire (Hustache, 2008). Cette section permettra de voir l'approche expérimentale derrière la compréhension des pâtes en vue de confectionner les différents bétons végétaux.

3.2.1 Pâte de chaux fraîche

Le comportement à l'état frais du béton végétal, c'est-à-dire l'agglomération et la cohésion des fibres après compactage, est étroitement lié au comportement de la pâte de chaux fraîche. Notamment, le dosage en eau est un facteur important dans l'élaboration d'une pâte de chaux pour le béton végétal de chanvre. Une caractérisation adéquate des pâtes de chaux fraîches permettra donc de mieux comprendre le comportement des bétons à confectionner.

3.2.1.1 Méthode de mélange et de mise en moule

La méthode de mélange et de mise en moule des pâtes de chaux fraîches est élaborée en s'inspirant de la norme CSA A3004-C1 et la norme CSA A3004-C2 qui est plus attribuable à une pâte cimentaire ou à un mortier cimentaire. Or, dans la situation actuelle, le ciment est remplacé par de la chaux hydratée. La rhéologie de la chaux hydratée en pâte est différente du ciment. La chaux possède une très grande surface spécifique ainsi qu'une cohésion élevée à l'état frais. Cela lui confère des propriétés distinctes de tenue et d'accroche à des surfaces verticales. C'est entre autres pour cette raison que la chaux hydratée est employée en grande proportion dans l'industrie de la maçonnerie. Son apparence malléable et déformable lui confère une bonne thixotropie lors des poses des briques par exemple. Le remplissage des moules normalisés pour la confection de cube de 50 mm s'est réalisé à l'aide d'une table vibrante en plus d'une mise en place à l'aide du butoir afin d'éviter toute formation de bulles d'air de gros diamètre prises dans la pâte. Un malaxeur de type robot à mortier a été employé pour le mélange des pâtes (Figure 3.3). La méthode de mélange des pâtes de chaux et de mise en moule suit le Tableau 3.4 et le Tableau 3.5 respectivement. Les échantillons sont ensuite conservés pendant 7 jours dans leur moule. Suivant le démoulage, ceux-ci sont conservés dans une salle humide à température ambiante et humidité contrôlée (>95%HR) jusqu'au 28^e jour.

Tableau 3.4 Méthode de mélange des pâtes de chaux

Opération	Durée	Malaxeur
1. Peser des constituants en poudre du liant	-	Arrêt
2. Introduction dans la cuve des poudres	-	Arrêt
3. Malaxage à sec des constituants	4 min	En marche – Vitesse 1
4. Malaxage à sec des constituants	1 min	En marche – Vitesse 2
5. Introduction de l'eau de gâchage dans la cuve	-	Arrêt
6. Malaxage humide des constituants hydratés	2 min	En marche – Vitesse 2
7. Râclage des contours de la cuve	15 sec	Arrêt
8. Dosage en eau, au besoin, pour la consistance minimale de mise en moule	45 sec	En marche – Vitesse 2
9. Malaxage de la pâte dosée en eau	2 min	En marche – Vitesse 2

Tableau 3.5 Méthode de mise en moule des pâtes liantes

Opération	Durée
1. Remplissage des moules à mi-hauteur (25mm) à l'aide d'une cuillère	-
2. Damage de la 1 ^{re} couche avec le bourroir en caoutchouc (32 coups selon la norme CSA A3004-C2)	-
3. Vibration du moule à l'aide de la plaque vibrante à amplitude maximale (moule non attaché, fréquence de 60 Hz)	30 sec
4. Remplissage des moules à pleine hauteur (50mm) à l'aide d'une cuillère	-
5. Damage de la 2 ^e couche avec le bourroir en caoutchouc (32 coups selon la norme CSA A3004-C2)	-
6. Vibration du moule à l'aide de la plaque vibrante à amplitude maximale (moule non attaché, fréquence de 60 Hz)	30 sec
7. Arasage du dessus des moules à l'aide d'une truelle	-
8. Nettoyage des contours des moules	-
9. Pose d'une pellicule de plastique au-dessus des moules pour conservation 7 jours	-



Figure 3.3 Robot à mortier de type Hobart

L'utilisation de la plaque vibrante est nécessaire dans le cas des mélanges de pâte de chaux en raison de la difficulté de consolidation dans les moules (Figure 3.4). La consistance des mélanges itératifs et le dosage en eau se sont fait par l'appréciation générale de la consistance des pâtes. Le dosage en eau nécessaire était celui permettant la mise en moule de façon appréciable sans effort d'étalement dans le moule. Le contrôle appréciable de la consistance des pâtes de chaux se réalisait visuellement, car la rhéologie des différentes pâtes de chaux variait considérablement selon le type de pouzzolane utilisée. Enfin, le dosage en eau changeait selon les proportions des constituants et les types de matières premières minérales employés.



Figure 3.4 Mise en moule des cubes de pâte liante

3.2.1.2 Essai d'étalement

L'essai d'étalement suit la norme CSA A3004-C1 suivant la méthode de mélange des pâtes liantes (liant + eau). L'étalement est une bonne mesure de la consistance d'une pâte fraîche. L'essai d'étalement a permis de mieux comparer quelques formulations de pâte liante et leur dosage en eau respectif dont par exemple une pâte de chaux-laitier de haut fourneau présentée à la Figure 3.5. L'essai consiste à remplir un moule conique sur la table à secousse. La mesure d'étalement se note avec un pied à coulisse sur 4 mesures de diamètre représentant le pourcentage d'accroissement du diamètre original de la pâte.



Figure 3.5 Essai d'étalement pour différent dosage en eau d'une pâte fraîche chaux-laitier de haut fourneau

3.2.1.3 Essai de teneur en air et masse volumique apparente

La méthode d'essai pour la détermination de la teneur en air sur pâte de chaux suit la norme CSA A3004-C4. La masse volumique apparente de la pâte fraîche est calculée également suivant cette méthode d'essai normalisée. Suivant l'étape de malaxage décrite plus haut, la méthode consiste à remplir un récipient cylindrique de volume connu de 400 cm³. Suivant l'arasement de la couche finale, une pesée du récipient plein est effectuée. La teneur en air est ainsi calculée à partir de la masse de la pâte fraîche, de la densité des constituants et des proportions du mélange. L'essai est refait trois fois et la moyenne des 3 pesées est conservée pour le calcul de la teneur en air ainsi que la masse volumique apparente.

$$\rho_{\text{pâte}}\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{m_{\text{pâte}}(\text{g})}{V_{\text{pâte}}(\text{cm}^3)} \quad (3.3)$$

3.2.1.4 Essai de rétention d'eau

Dans l'élaboration du béton végétal de chanvre, l'absorption des granulats est un paramètre important à prendre en compte pour la formulation. Lorsque la pâte de chaux est en contact avec une surface poreuse sèche, il y a nécessairement un échange d'eau interstitielle importante au contact de la surface poreuse pouvant assécher la pâte ou le mortier avant la prise initiale. Pour cette raison, lors de la formulation d'un béton végétal de chanvre, la rétention d'eau de la pâte est un facteur significatif à prendre en compte.

L'essai de rétention d'eau est basé sur la norme ASTM C1506-17 qui consiste à faire une dépression de 50 mmHg ou 6,7 kPa pendant 60 secondes d'une pâte à l'état frais (Figure 3.6). L'utilisation d'une pompe sous vide reliée à un Büchner de 150 mm de diamètre et d'un filtre No1 est nécessaire pour exécuter l'essai. L'échantillon de pâte à l'essai a subi initialement un essai d'étalement sur une table à choc pour mesurer sa consistance initiale : « étalement avant dépression ». Ensuite, l'échantillon est réintroduit dans le malaxeur pour 30 secondes avant d'être déposé sur le filtre humide dans le Büchner. Suivant la dépression d'une minute effectuée, l'échantillon subit une dernière mesure d'étalement sur table à choc afin de mesurer sa consistance finale et désignée « étalement après dépression ». La rétention d'eau de la pâte peut donc être ainsi calculée selon l'équation (3.4) suivante :

$$\text{Rétention d'eau [\%]} = \frac{\text{Étalement après dépression}}{\text{Étalement avant dépression}} \times 100 \quad (3.4)$$



Figure 3.6 Essai de rétention d'eau d'une pâte à l'état frais; photo A : mise en place du papier filtre humide; photo B : dépôt de la pâte fraîche sur le papier filtre; photo C : pâte fraîche mise sous vide; photo D : retrait du papier filtre en vue de faire l'étalement final

3.2.1.5 Mesure de la réactivité pouzzolanique par calorimétrie isotherme

La calorimétrie est l'étude de la thermodynamique qui permet de mesurer la chaleur dégagée ou absorbée lors d'une réaction quelconque. La calorimétrie isotherme permet de rendre constante dans le temps la température extérieure du milieu réactionnel afin que celle-ci n'interfère pas avec la chaleur réelle de la réaction. Le mélange réactionnel à l'étude est placé dans une ampoule en verre de 20 ml près d'une seconde ampoule de référence identique dans une enceinte à température contrôlée et à pression constante (Figure 3.7). La différence de chaleur absorbée ou dégagée lors de la réaction est compensée par le système de l'appareil pour conserver la même température dans l'enceinte de mesure.

Enfin, une variation d'enthalpie dans le milieu réactionnel, soit endothermique ou exothermique provoquera à pression constante un dégagement de chaleur en Joules et un travail compensatoire en Watt par l'appareil ramené sur un graphique temporel et par unité de masse introduite. L'ampoule de référence constituée d'eau ou de sable d'Ottawa permet à l'appareil de corriger les fuites de mesures entre les deux ampoules en ce qui a trait aux chaleurs spécifiques connues ou estimées des matériaux introduits.

La calorimétrie isotherme permet enfin de comparer des matériaux dits réactifs en présence de solutions basiques et leur degré de réactivité en mesurant la chaleur totale dégagée en joules lors d'un essai de mesure. Cela est particulièrement utile lorsqu'il faut étudier le caractère amorphe d'un matériau siliceux et son pouvoir réactif en comparaison avec d'autres matériaux à l'étude.



Figure 3.7 Enceinte de mesures du calorimètre isotherme

L'instrument commercial *TAM Air* de *TA Instruments* de calorimétrie isotherme employé dans ce travail de recherche répond à la norme ASTM C1702-17 et celui-ci est calibré périodiquement en ce sens. Dans des ampoules de verre de 20 ml, les matériaux pouzzolaniques disponibles sont mélangés à de la chaux aérienne hydratée calcique (Figure 3.8) à l'aide d'une tige de verre pendant 1 minute et ceux-ci sont ensuite placés à l'intérieur de

l'enceinte de mesure près de l'ampoule de référence respective. Les essais ont été réalisés à 40°C et à 23°C sur une durée de 7 jours. Les résultats sont ensuite reportés sur deux graphiques, soit le premier représentant le taux de chaleur dégagé dans le temps en Watt/g liant et l'autre graphique représentant la chaleur dégagée totale cumulée en joules/g liant.

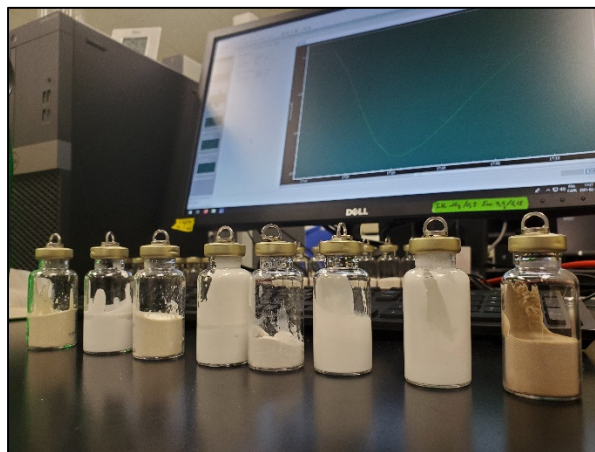


Figure 3.8 Représentation des mélanges dans les ampoules de verre pour l'essai de calorimétrie

3.2.2 Pâte de chaux durcie

Avant de bien caractériser un béton végétal de chanvre, la caractérisation de la pâte de chaux durcie est primordiale. Il faut se rappeler que cette recherche porte sur l'élaboration d'un liant de chaux avec pouzzolane pour la confection du béton de chanvre. Il est donc nécessaire d'évaluer les performances des combinaisons possibles, et ce, suivant la disponibilité des matières premières et pour différents ratios de mélange.

3.2.2.1 Conservation des éprouvettes après démoulage

La conservation des éprouvettes de pâte durcie s'est réalisée dans un environnement contrôlé humide saturé supérieur ou égal à 95%HR à la température ambiante de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à leur mise à l'essai respective.

3.2.2.2 Compression mécanique à la presse hydraulique

La mesure de la résistance à la compression demeure une méthode simple, fiable pour évaluer le niveau de cohésion d'une pâte ou d'un béton. Dans notre cas, l'atteinte d'une résistance en compression maximale du béton de chanvre n'est pas en soi une obligation ni un critère de conception. Une résistance minimale est cependant souhaitable d'après les règles professionnelles de *Construire en Chanvre* en France (Fédération Française du Bâtiment, 2009), laquelle s'établit à 0,2 MPa à 60 jours. L'essai de compression est pratique pour fins de comparaison quant à l'efficacité de mélanges étudiés.

L'essai de compression sur pâtes durcies a été réalisé suivant la norme CSA A3004-C2 (essais sur cubes). Les essais ont été réalisés à 7 jours et 28 jours. La presse hydraulique utilisée pour les essais de compression a une capacité de 2000 kN (Figure 3.9). La vitesse d'application de la force pour la mesure de la résistance en compression est de l'ordre de 0,5 kN/sec. Afin de calculer précisément la contrainte maximale en compression, les cubes sont préalablement pesés et mesurés à l'aide d'un pied à coulisse fixe de précision $\pm 0,01$ mm (Figure 3.10).



Figure 3.9 Presse hydraulique
pour l'essai de compression
mécanique



Figure 3.10 Pied à coulisse fixe

3.2.2.3 Porosité ouverte à l'eau par immersion

La porosité ouverte à l'eau par immersion des pâtes de chaux durcies dépend notamment des constituants utilisés, du malaxage et du dosage en eau dans le mélange. Plus il y a d'eau dans le mélange, plus la porosité ouverte de la pâte durcie va augmenter. En revanche, la nature des constituants utilisés comporte également elle aussi une certaine porosité initiale (absorption d'eau) qui viendra impacter la quantité d'eau de gâchage de la pâte fraîche et donc aussi sur la porosité ouverte finale de cette pâte durcie. Il est donc important d'analyser l'impact des dosages des constituants et l'apport en eau du mélange sur la porosité ouverte des éprouvettes. Également, une relation importante existe entre la résistance en compression et la porosité ouverte de la pâte à l'état durci. Notons que la mesure de la porosité ouverte à l'eau par immersion est réalisée suivant l'essai de compression mécanique avec les mêmes morceaux d'échantillons récupérés. Lors de cet essai, les échantillons sont submergés dans l'eau sous vide pendant une durée prédéterminée afin d'évacuer le plus possible les microbulles accrochées au spécimen et dans les pores de surface pouvant amener un biais dans le calcul de la porosité ouverte (Figure 3.11).

L'essai de porosité ouverte à l'eau par immersion est réalisé selon les étapes suivantes :

1. Récupération échantillons en forme de cône suivant l'essai de compression;
2. Échantillons submergés dans l'eau sous vide pendant 15 min à 23 mmHg (3 kPa);
3. Échantillons laissés submergés pendant 24h dans la cuve sous vide (valve fermée);
4. Pesé dans l'eau des échantillons ($M_{ds\ l'eau}^{saturé} \pm 0,1\text{ g}$);
5. Échantillons retirés de l'eau, essuyés rapidement et pesés dans l'air ($M_{ds\ l'air}^{saturé} \pm 0,1\text{ g}$);
6. Échantillons mis au four ventilé à 105°C pendant 48h;
7. Pesé à l'état sec ($M_{ds\ l'air}^{sec}$) des échantillons sur une balance de précision $\pm 0,1\text{ g}$.

L'équation de la porosité ouverte à l'eau par immersion ($n_{ouverte}$) :

$$\left[\frac{M_{ds\ l'air}^{saturé} - M_{ds\ l'air}^{sec}}{M_{ds\ l'air}^{saturé} - M_{ds\ l'eau}^{saturé}} \right] * 100\% = n_{ouverte} (\%) \quad (3.5)$$



Figure 3.11 Essai de la porosité ouverte à l'eau par immersion; photo A : mise des échantillons submergés sous vide; photo B : disposition des échantillons pour la mise à l'étuve; photo C : conservation des échantillons submergés 24 heures; photo D : microbulles sortantes des échantillons durant l'essai; photo E : pompe à l'air utilisée pour l'essai

3.2.2.4 Analyse thermogravimétrique (TGA/DTG)

L'analyse thermogravimétrique est une variante de l'étude thermodynamique. Elle est basée sur le changement de masse d'un échantillon au cours du temps en élevant la température à une vitesse donnée. L'instrument de mesure est muni d'un four interne où un échantillon à tester est placé dans un creuset de mesure. Un creuset de référence est placé au côté du creuset de mesure, agissant telle une ligne de base massique en guise de synchronisation avec les changements massiques entre les deux creusets. Cette analyse thermogravimétrique (TGA) avec son dérivé (DTG) temporel ou par rapport à la température permet d'étudier plus précisément les transitions de phase, l'absorption en eau, l'adsorption/désorption en eau et certains phénomènes chimiques tels que la chimisorption, la décomposition thermique et les réactions solide-gaz.

Cette méthode de caractérisation permet d'analyser également la quantité d'eau liée chimiquement dans un échantillon afin d'avoir une idée plus précise de la quantité de Portlandite (chaux libre) restante par exemple suivant les réactions chimiques d'hydratation et de carbonatation. La teneur en carbonate peut être également estimée par cet essai.

Afin de procéder à l'analyse thermogravimétrique des différentes formulations, un arrêt d'hydratation sous bain d'isopropanol a été réalisé au cœur des éprouvettes cubiques suivant l'essai en compression de toutes les itérations de pâte formulée à 28 jours de cure. L'utilisation d'un alcool de type isopropanol permet de limiter les échanges hydriques de la pâte liante récupérée au cœur et limiter la transformation de la portlandite en carbonate. L'arrêt d'hydratation doit donc être réalisé dans la minute suivant l'essai de compression. Suivant l'arrêt d'hydratation, l'assèchement des poudres est effectué sous vide suivi de la mise en sachet dans un dessiccateur en vue de compléter l'essai thermogravimétrique sur l'appareil disponible à cet effet, soit le *Pyris Diamond (TG/DTA)* de *Perkin Elmer Instruments* (Figure 3.12).

L'arrêt d'hydratation des échantillons cubiques est réalisé selon les étapes suivantes :

1. Récupération du spécimen « B » suivant l'essai de compression à 28 jours;
2. Ouverture du spécimen et récupération en cœur d'un échantillon équivalent à 3,0 g du spécimen;
3. Égrainage à l'aide d'un mortier et d'un pilon de l'échantillon de 3,0 g dans l'isopropanol;
4. Conservation de l'échantillon dans l'isopropanol pour une période de 30 min à 1 h;
5. Filtration sous vide Büchner sur filtre No50 pour récupérer l'échantillon une fois sec;
6. Mise de l'échantillon au four à 40°C pour une période de 9-10 min;
7. Mise en sachet de l'échantillon et entreposage dans un dessiccateur en vue de l'essai TGA.

La méthode thermogravimétrique (TGA) employée lors de l'essai suit les étapes suivantes :

1. Utilisation d'un creuset en platine pour des températures de 600°C et plus;
2. Ouverture du flux de gaz d'argon avec un débit de 100,0 ml/min;
3. Conserver pendant 3,0 min le flux en continu à 40°C;
4. Chauffer de 40°C à 900°C à une vitesse de 10°C/min;
5. Conserver pendant 1 min le flux en continu à 900°C;
6. Refroidissement de l'échantillon pendant environ 10 à 15 min.

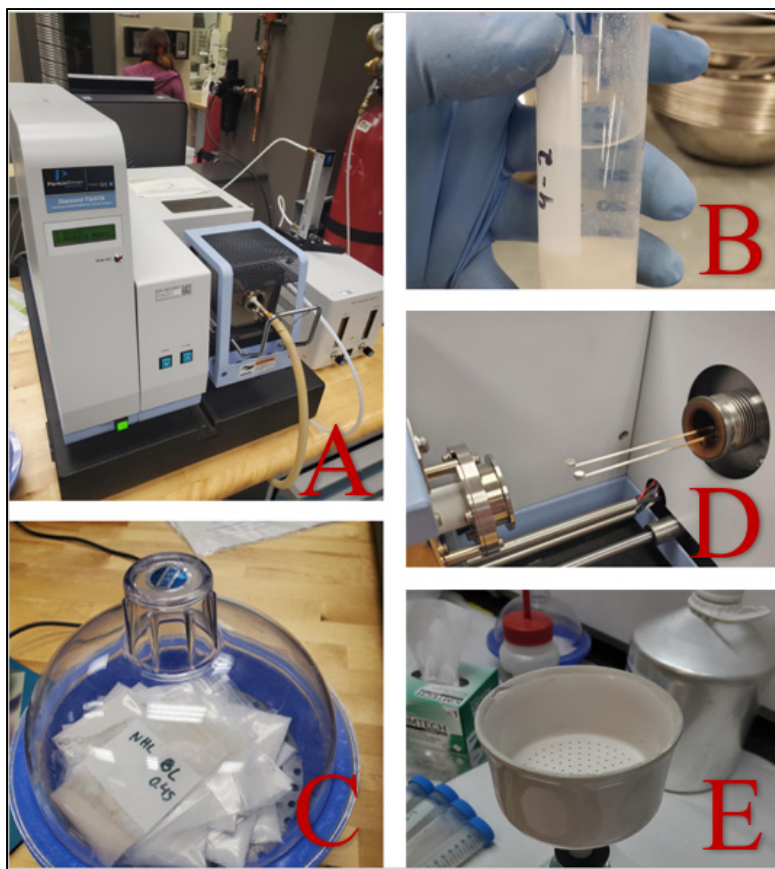


Figure 3.12 Arrêt d'hydratation et essai thermogravimétrique; photo A : appareil TG *Pyris Diamond*; photo B : arrêt d'hydratation des pâtes durcies dans l'isopropanol; photo C : conservation des échantillons dans un dessiccateur en vue de l'essai thermogravimétrique; photo D : mise en place des échantillons dans les creusets d'analyse dans l'appareil TG; Photo E : récupération de l'échantillon en poudre sur papier filtre après l'arrêt d'hydratation

3.3 Caractérisation de la réactivité des pouzzolanes

Certains matériaux disponibles possèdent un potentiel pouzzolanique. Le caractère potentiel est significatif afin de justifier leur mise à l'essai lors de la calorimétrie isotherme. D'après les recherches de Avet et al. (2016), l'intérêt d'une hausse de température partant de 20°C à 40°C pour l'exécution de l'essai du calorimètre isotherme repose essentiellement sur une accélération de la réaction et s'interpose peu dans l'apparition des types phases cimentaires produites. Il a été donc décidé d'exécuter l'essai de la calorimétrie exploratoire des matériaux

au potentiel pouzzolanique à 40°C sur 7 jours. Le matériau au plus grand potentiel pouzzolanique a donc été sélectionné d'après la chaleur dégagée totale par gramme de liant mélangé en formule binaire avec la chaux hydratée. Un second essai de calorimétrie isotherme de quelques matériaux a été réalisé également à 23°C sur 7 jours pour mieux différencier les caractères réactifs de ces matériaux disponibles à température ambiante. Une approche par caractérisation mécanique des pâtes durcies à 28 jours et l'impact de l'eau végétale sur la réactivité observée au calorimètre à 23°C ont été fait.

3.3.1 Réactivité à 40°C

Les matériaux reçus ont été conservés dans un laboratoire à $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ jusqu'à leur conditionnement et leur mise à l'essai. Pour l'analyse à la calorimétrie isotherme à 40°C, les matériaux ont été conditionnés à 40°C sur minimalement 72h avant leur mise à l'essai.

Pour amorcer l'étude, une base commune entre chaque mélange a été fixée suivant un ratio massique de la teneur en calcium (Ca) en référence à celles de la silice et de l'alumine ($\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$). Le ratio est établi en référence à la composition chimique des matériaux étudiés tels que synthétisés aux Tableau 3.1 et Tableau 3.2. L'intérêt premier de cette approche est de fixer au moins un paramètre commun indépendamment des aspects physiques propres à chacun des matériaux étudiés (granulométrie, surface spécifique, autres) et de leur spécificité quant à la proportion de matière amorphe. Afin de mieux corroborer les résultats de chaleur dégagée des mélanges au potentiel pouzzolanique, la résistance à la compression des pâtes pouzzolaniques de chaux durcies a été mesurée sur cubes, suivant une cure de 28 jours en chambre humide à température ambiante. À noter que pour ces pâtes pouzzolaniques de chaux le rapport E/L est différent d'une pâte à l'autre. Le Tableau 4.2 donne les rapports E/L correspondants à chacune des pâtes testées. Le rapport E/L a été mis entre parenthèses dans le tableau pour en faciliter la lecture. Trois cubes ont été testés pour chacun des mélanges et l'écart type est présenté graphiquement pour chacune des valeurs moyennes calculées. L'écart-

type est parfois très petit pour certaines valeurs et celui-ci est donc difficilement perceptible graphiquement.

Tableau 4.2 permet de différencier chacun des mélanges effectués en laboratoire d'après leur ratio massique spécifique pour la caractérisation mécanique des pâtes durcies ainsi que la chaleur dégagée des mélanges binaires par l'essai au calorimètre isotherme. Le lecteur peut se référer à l'exemple de calculs disponible dans l'Annexe I afin de mieux comprendre les proportions choisies.

3.3.2 Calcination de la boue de désencrage reçue

La méthode et les résultats de calcination de la boue de désencrage reçue sont présentés à l'Annexe II. La calcination incomplète de la boue de désencrage à 750°C pendant 2 heures nous indique que la méthode utilisée devrait être révisée dans une future recherche afin de calciner totalement cette boue pour ainsi mieux évaluer le potentiel pouzzolanique de cette matière.

3.3.3 Réactivité à 23°C

Suivant la première étape exploratoire des matériaux au potentiel pouzzolanique disponible en Amérique du Nord, une comparaison du matériau sélectionné de terre diatomée WL avec d'autres ajouts cimentaires potentiels permet de situer efficacement le matériau dans le contexte actuel. Afin de limiter les futurs écarts de résultats entre la calorimétrie isotherme et la résistance à la compression des pâtes durcies, il a été déterminé d'exécuter les essais au calorimètre isotherme à la même température que celle des essais de compression mécanique, soit à la température ambiante. Pour cette seconde étape, la réactivité de la terre diatomée WL a été comparée au métakaolin (MK) disponible en Ontario et le laitier de haut fourneau (GB) disponible au Québec. Un essai supplémentaire en ce qui concerne la boue de désencrage calcinée a également été considéré lors de cette étape. La boue de désencrage en provenance du Québec a été calcinée en laboratoire à une température se basant sur la littérature, soit 750°C pendant 2 heures (Jang et al., 2018). Les résultats de réactivité sont présentés de la même façon que les autres matériaux et ceux-ci sont comparés au témoin à atteindre, soit la NHL.

D'après la Figure 3.13 présentant les différents paramètres principaux de performance entre les réactions de types purement hydrauliques et pouzzolaniques, la nature de comparaison des performances ne peut se limiter à un seul paramètre si les mélanges réagissent de façon différente. Dans notre cas, la comparaison avec d'autres ajouts cimentaires tels que le laitier de haut fourneau ne permettait pas de comparer les résultats sur un seul paramètre variable, soit le rapport massique chimique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ tel qu'initialement formulé pour différencier la performance de plusieurs pouzzolanes. Le laitier de haut fourneau, étant un matériau réactif hydraulique latent, est plus ou moins considéré comme une pouzzolane. En effet, une grande part de la réaction du laitier en solution basique est sous forme hydraulique et non pouzzolanique. Celui-ci formera donc des gels de CSH par lui-même sans la notion de consommation de la chaux libre présente. D'ailleurs, dans ce cas précis, l'index d'activité du laitier doit être notamment considéré dans l'équation théorique. Ces notions complexes réactionnelles du laitier n'ont pas été prises en compte dans ce mémoire et demanderaient une approche personnalisée pouvant faire partie d'une seconde recherche distincte. L'utilisation de matériaux purement pouzzolaniques permet jusqu'à présent une meilleure maîtrise et connaissance du milieu réactionnel pour les fins de cette recherche. Une comparaison des résultats obtenus au niveau du pourcentage de remplacement de chaux hydratée dans le mélange s'est donc avérée suffisante pour situer les mélanges purement pouzzolaniques face à cet ajout cimentaire de nature hydraulique latente.

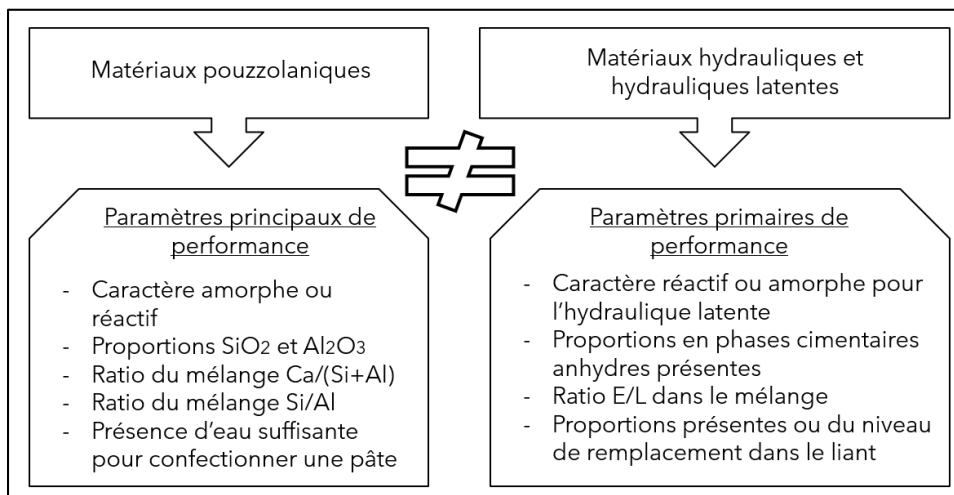


Figure 3.13 Schéma sommaire différenciatif des réactions de type pouzzolanique et hydraulique

Également, la composition chimique en minéraux des boues de désencrage était inconnue au moment de l'essai. Pour ces raisons, la comparaison de la réactivité des matériaux s'est réalisée selon un dosage en pourcentage de masse et non sous forme d'un rapport massique chimique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$. Le choix a donc été fait de fixer la quantité de pouzzolane en fonction d'un pourcentage massique fixe de remplacement à la chaux hydratée pour l'essai de la calorimétrie isotherme, soit de 30% et 50% dans le cas de la boue de désencrage calcinée.

En se référant aux détails de calcul des formulations optimisées disponibles à l'Annexe I et des paramètres de calcul fixes ou variables comme présentés au chapitre 2, plusieurs itérations des différentes formulations optimisées ont été réalisées sur plusieurs plages de paramètres différents. Les mélanges ternaires pouzzolaniques composés de métakaolin-terre diatomée ont connu une expérimentation plus élargie, car leur comportement réactionnel repose uniquement sur des réactions pouzzolaniques contrairement au laitier de haut fourneau se comportant plutôt comme un matériau hydraulique latent. Les équations théoriques retenues s'appliquent davantage à un mélange purement pouzzolanique.

3.4 Méthodes de caractérisation des bétons végétaux de chanvre

3.4.1 Méthode pour évaluer la Valeur de la Capacité de Tampon Hydrique (VCTH ou MBV)

L'humidité intérieure est un paramètre important pour évaluer la qualité d'air perçue par les occupants. Ce paramètre est également utilisé pour trouver la cause de divers problèmes de santé chez des occupants d'un bâtiment (Rode et al., 2005). Les matériaux qui sont en mesure d'absorber de l'humidité lors des excès ressentis ou d'en restituer lorsque nécessaire dans les moments où l'air est trop sec sont à préconiser pour une meilleure hygiène de l'air intérieur et du confort ressenti chez les occupants. Ceux-ci se prononcent comme étant des matériaux hygroscopiques, où la teneur en eau changera de façon importante lors de changement d'humidité dans l'environnement. Les bétons végétaux sont des matériaux dits hygroscopiques. Les pores multiéchelles au sein de la structure du béton végétal de chanvre leur confèrent des propriétés uniques de gestion passive de l'humidité dans l'environnement bâti lorsqu'ils y sont incorporés (Hustache & Gourlay, 2012). Lorsqu'il est question de durabilité de l'enveloppe du bâtiment, la notion de l'humidité intérieure y joue un très grand

rôle. Les matériaux non hygroscopiques peuvent parfois perdre certaines de leur propriété thermique en présence d'un excès d'humidité (McFadden, 1988). L'utilisation de matériaux hygroscopiques s'affranchit en partie de cet aspect et ceux-ci conserve beaucoup mieux leurs propriétés thermiques dans ce sens améliorant les performances globales de l'enveloppe du bâtiment.

La méthode d'essai pour l'évaluation de la valeur de la capacité de tampon hydrique (VCTH) ou «Moisture buffering value (MBV)» tient compte d'un protocole nommé la méthode NORDTEST (Rode et al., 2005). Cette méthode provient d'un projet nordique de caractérisation de matériau voulant trouver une méthode standardisée pour évaluer les performances de certains matériaux sur leur caractère hygroscopique. Ce protocole demeure des suggestions ainsi qu'un guide pour les chercheurs dans le domaine des matériaux afin de mieux caractériser ce paramètre primordial de confort ressenti. Dans cette perspective, les bétons végétaux à base de chaux sont reconnus pour leur grande perméabilité à la vapeur et leur grande capacité à réguler l'humidité intérieure du bâti (Latif et al., 2015). Les particules végétales de chènevotte issues de la plante de chanvre sont fortement hydrophiles et agissent telles des éponges d'humidité et de régulation hygrothermique. Une caractérisation de ce paramètre est donc une nécessité dans ce travail de recherche portant sur l'étude de la formulation d'un béton végétal à base de chaux.

La méthode d'essai consiste à sceller des échantillons de matériaux laissant qu'une des faces exposées d'une superficie minimale de $0,01 \text{ m}^2$ dans un environnement à température et humidité contrôlée. Les échantillons sont ainsi conditionnés à température et humidité ambiante avant le début de l'essai, dès lors, leur masse initiale est notée sur une balance d'une précision $\pm 0,01 \text{ g}$. L'essai comprend plusieurs cycles d'humidité à température ambiante $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ subis aux échantillons, soit une humidité élevée pendant 8 heures et une humidité basse pendant 16 heures, ici il a été retenu 75%HR et 33%HR respectivement. D'autres cycles d'humidité sont également proposés dans l'essai, mais celle-ci est la plus utilisée dans la littérature (Rode et al., 2005). Des pesées successives sont donc ainsi notées au fil des cycles et de changement d'humidité. L'essai dure le nombre de cycles nécessaires afin de percevoir

une variation d'au plus 5% d'amplitude de jour en jour entre deux cycles de pesés subséquentes.

L'équation permettant de calculer la valeur de la capacité de tampon hydrique est présentée ci-bas, elle se calcule à chaque cycle de mesure, celle-ci totalisant 24h, se rapportant à l'écart entre les deux pesées du cycle choisi.

$$MBV = \frac{\Delta m}{A \cdot (HR_{\text{haute}} - HR_{\text{basse}})} \quad (3.6)$$

- ❖ MBV : Valeur de la capacité tampon hydrique ou
«Moisture Buffering Value» ($\text{g/m}^2 \cdot \%HR$)
- ❖ Δm : $m(t) - m(t = 0)$
- ❖ $m(t)$: masse du matériau au temps "t" (g)
- ❖ A : Surface exposée de l'éprouvette (m^2)
- ❖ HR_{haute} et HR_{basse} : Valeurs humidités relatives hautes et basses (%)

L'essai est réalisé dans une enceinte climatique commerciale de *Thermotron*. Celui-ci est en mesure de maintenir une humidité élevée de façon suffisante à $75\%HR \pm 5\%$ pendant toute la période nécessaire de l'essai. Cependant, l'enceinte climatique disponible n'était pas en mesure de procurer une humidité relative basse avoisinant les $33\%HR$. Il a donc été choisi de laisser reposer les échantillons hors de l'enceinte climatique à la température ambiante de $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et humidité relative ambiante de $30\%HR \pm 10\%$. La lecture de l'humidité par un hygromètre s'est réalisée à chaque cycle de pesée (Figure 3.14). L'équation s'est ainsi calculée à chaque cycle selon l'humidité basse notée lors des pesées pour le cycle respectif. Cette solution a été retenue pour effectuer l'essai dans les derniers délais du projet de recherche. Ce type de manipulation n'est toutefois pas sans risque de biais dans les mesures de pesées et d'humidité relative ambiante. En effet, il n'a pas été considéré lors de cet essai la vitesse et le film de l'air au-dessus des échantillons ayant un impact sur la valeur d'humidité réelle absorbée par le matériau. Également, il n'a pas été considéré qu'un différentiel d'humidité relative au courant de la période de basse humidité hors du moment de la prise de mesure sur l'hygromètre survient inévitablement. La basse humidité de calcul peut ne pas être représentative du cycle complet à basse humidité lors de l'essai, celle-ci demeure une approximation dans les circonstances

réelles de l'essai. Cependant, bien que les valeurs finales puissent ne pas être exactes et refléter de façon précise la valeur de la capacité de tampon hydrique des matériaux à l'étude, il est toutefois possible d'analyser la tendance entre les différentes formulations et les paramètres variables sujets à l'étude des propriétés hydriques du matériau. Dans ce contexte, cet essai est jugé valable pour répondre aux questionnements énoncés dans cette recherche.



Figure 3.14 Essai de la Valeur de la Capacité de Tampon Hydrique ou «Moisture Buffering Value»

3.4.2 Autres méthodes de caractérisation physique, hydrique, thermique et acoustique

Le lecteur peut se référer à l'Annexe III pour la suite des descriptions des autres méthodes de caractérisation des bétons végétaux de chanvre qui ont été réalisées dans le cadre de ce travail de recherche. Plus précisément, les autres méthodes de caractérisation décrites à l'Annexe III sont notamment : les méthodes de mélange et mise en moule, la méthode de conservation des échantillons, l'essai de résonance non destructif, la compression mécanique à la presse hydraulique, l'essai de capillarité, la porosité ouverte à l'eau par immersion, la méthode de caractérisation thermique et la méthode de caractérisation acoustique.

CHAPITRE 4

Résultats de caractérisation des formulations optimisées

Ce chapitre présente les résultats de caractérisation des formulations de pâtes pouzzolaniques à une (binaire) et à deux pouzzolanes (ternaire). Les résultats sont présentés sous forme de trois (3) séries d'essais distinctes se succédant l'un à la suite de l'autre suivant leur résultat respectif. L'ensemble des résultats est continuellement comparé à la formulation témoin, soit une pâte de chaux hydraulique naturelle 3,5 MPa (NHL).

SÉRIE 1 – Cette série repose essentiellement sur la réactivité des pouzzolanes disponibles en formule binaire (chaux + 1 pouzzolane), soit les deux terres diatomées (MN et WL), la poudre de verre (PV), la perlite expansée (PE) et la zéolithe (ZE) afin de conserver celle qui semble être la plus réactive de cette série. Afin de les comparer sur une base commune, les proportions massiques des constituants reposent sur des rapports fixés : $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al}) = \{1; 1,5; 2; 3 \text{ et } 4\}$.

SÉRIE 2 – Cette série repose sur la comparaison de la pouzzolane la plus réactive de la série 1 avec deux autres pouzzolanes connues couramment utilisées dans le domaine du béton de ciment, soit le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (GB). Les formulations sont sous forme binaire (chaux + 1 pouzzolane). Afin de les comparer sur une base commune, les proportions massiques de constituants reposent sur des pourcentages de remplacement de la chaux hydratée dans le mélange $\{20\%; 30\%; 50\%\}$. Une seule sélection de pourcentage retenue permettra d'évaluer leur comportement pouzzolanique respectif en contact avec l'eau de trempage de la chènevotte en solution alcaline chargée en composées biologiques hydrosolubles (pectines, hémicelluloses et autres), appelé de l'eau biologique de chanvre (HW) dans le cadre de ce mémoire.

SÉRIE 3 – Cette série repose sur la caractérisation d'une formulation ternaire pouzzolanique (chaux + 2 pouzzolanes). Ces mélanges comprennent une pouzzolane primaire commune qui s'est le mieux comporté en présence de l'eau de chanvre suivant les résultats de la série 2, soit le métakaolin (MK) et d'une pouzzolane respective secondaire moins réactive qui est l'une ou l'autre des deux pouzzolanes restantes de la série 2, soit la terre diatomées (WL) et le laitier de haut fourneau (GB).

4.1 SÉRIE 1

4.1.1 Résultats de calorimétrie isotherme à 40°C

Suivant les compositions chimiques des matériaux définies au Tableau 3.1 et au Tableau 3.2, la réactivité pouzzolanique des pâtes de chaux des pouzzolanes retenues pour cette étude a été déterminée par la calorimétrie isotherme à 40°C après 7 jours. Le Tableau 4.1 présente la proportion massique des pâtes testées au calorimètre en variant le rapport massique Ca/(Si+Al) dans le mélange représenté par la variable X dans le tableau.

Tableau 4.1 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en calorimétrie à 40°C (E/L=1,0) pour évaluer la réactivité pouzzolanique selon un rapport massique variable [$X = \text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al}) = \{1,0; 1,5 \text{ et } 2,0\}$]

Nom du mélange	MN-X	WL-X	PE-X	PV-X	ZE-X	NHL (témoin)	CHX (témoin)
Chaux	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	100% Chaux hydraulique	100% Chaux hydratée
Pouzzolane (PZ)	Terre diatomée MN51	Terre diatomée White Lake	Perlite Expansée	Poudre de Verre	Zéolithe	-	-
$X = \text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ (% massique)	CHX : PZ	CHX : PZ	CHX : PZ	CHX : PZ	CHX : PZ	-	-
X = 1,0	0,55:0,45	0,55:0,45	0,55:0,45	0,50:0,50	0,60:0,40	-	-
X = 1,5	0,65:0,35	0,65:0,35	0,65:0,35	0,60:0,40	-	-	-
X = 2,0	0,70:0,30	0,70:0,30	0,70 :0,30	0,65:0,35	-	-	-

4.1.2 Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ égale à 1

La Figure 4.1 présente la relation entre la chaleur massique dégagée après 7 jours pour les pâtes maintenues en condition isotherme à 40°C dans le calorimètre. La réactivité de chaux hydraulique naturelle ou en anglais « Natural Hydraulic Lime (NHL) » est également reportée à cette figure et sert, en quelque sorte de référence. En effet, le liant principal utilisé pour la confection de béton de chanvre est la chaux hydraulique, laquelle n'est pas disponible au Canada. La réactivité du NHL sert donc de seuil minimal à atteindre dans la formulation d'un liant binaire ou ternaire visant l'usage d'une pouzzolane. La réactivité de la chaux hydratée (CHX) seul a également été évalué pour des raisons de comparaison.

À l'exception du mélange ZE-1, toutes les pâtes testées présentent une chaleur massique dégagée supérieure à celle du NHL. Cette notion est importante afin de spécifier si le matériau au potentiel pouzzolanique est inerte ou réactif. Les mélanges MN-1 et WL-1 sont les plus réactifs du groupe, soit les deux sources de terres diatomées. La pâte de chaux avec la perlite expansée (PE) et celle avec la poudre de verre (PV) sont également plus réactives que le NHL.

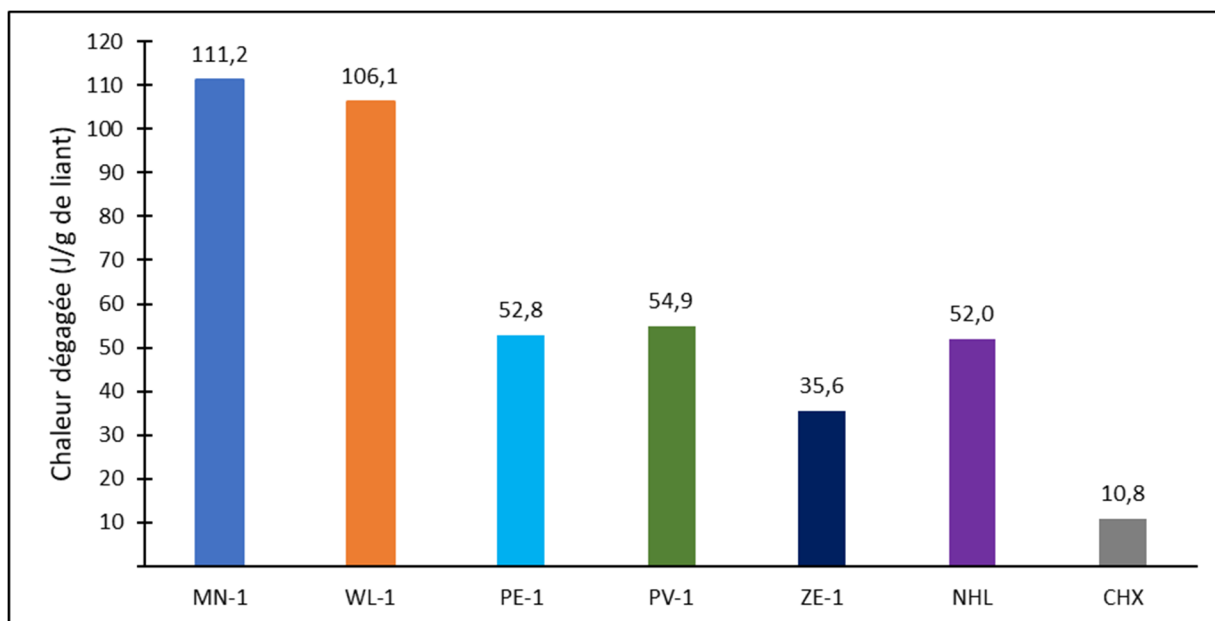


Figure 4.1 Chaleur massique totale dégagée (J/g de liant) sur 7 jours à 40°C des pouzzolanes pour un rapport massique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ fixe

4.1.3 Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ supérieur à 1

Afin d'observer l'impact d'une variation massique des constituants de la pâte pouzzolanique de chaux sur la chaleur dégagée totale au calorimètre, la Figure 4.2 présente les résultats d'une 2^e série d'essais en faisant varier le rapport massique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ dans le mélange : ratios de 1,0, 1,5 et 2,0. En réduisant ainsi la fraction de pouzzolane dans le mélange, une baisse attendue de la chaleur dégagée totale est observée sans toutefois descendre significativement sous la valeur correspondante à celle de la pâte de chaux témoin (NHL : 52,0 J/g de liant). Toutes les pouzzolanes ont été testées lors de cette 2^e série d'essais à l'exception de la zéolithe (ZE) qui demeurerait inférieure au témoin à plus fort dosage (ZE-1) : il n'était pas intéressant pour notre besoin d'essayer à plus faible dosage pour cette raison. Le dégagement de chaleur total du mélange sur 7 jours renseigne sur les possibles liens chimiques pouzzolaniques qui survient dans le mélange. Les liens chimiques de types pouzzolaniques sont à l'origine de la résistance à la compression des pâtes durcies à base de chaux hydratée.

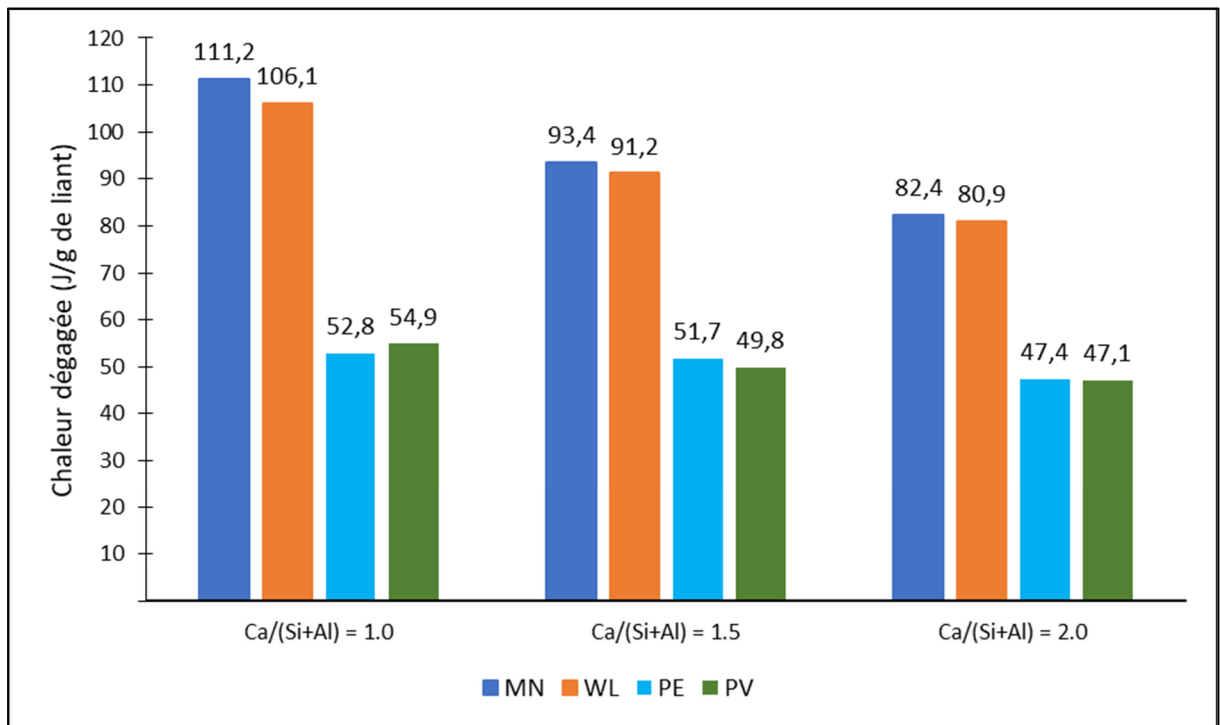


Figure 4.2 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 40°C des pouzzolanes pour un rapport massique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ variable

4.1.4 Résistance à la compression

Afin de mieux corroborer les résultats de chaleur dégagée des mélanges au potentiel pouzzolanique, la résistance à la compression des pâtes pouzzolaniques de chaux durcies a été mesurée sur cubes, suivant une cure de 28 jours en chambre humide à température ambiante. À noter que pour ces pâtes pouzzolaniques de chaux le rapport E/L est différent d'une pâte à l'autre. Le Tableau 4.2 donne les rapports E/L correspondants à chacune des pâtes testées. Le rapport E/L a été mis entre parenthèses dans le tableau pour en faciliter la lecture. Trois cubes ont été testés pour chacun des mélanges et l'écart type est présenté graphiquement pour chacune des valeurs moyennes calculées. L'écart-type est parfois très petit pour certaines valeurs et celui-ci est donc difficilement perceptible graphiquement.

Tableau 4.2 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en compression (E/L : variable) pour évaluer la réactivité pouzzolanique

Nom du mélange	MN-X	WL-X	PE-X	PV-X	ZE-X	NHL (témoin)
Chaux	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	100% Chaux hydraulique
Pouzzolane (PZ)	Terre diatomée MN51	Terre diatomée White Lake	Perlite Expansée	Poudre de Verre	Zéolithe	-
X=Ca/(Si+Al) (% massique)	CHX : PZ : (E/L)	CHX : PZ : (E/L)	CHX : PZ : (E/L)	CHX : PZ : (E/L)	CHX : PZ : (E/L)	E/L = 0,45
X = 1	0,55:0,45: (1,2)	0,55:0,45: (1,1)	0,55:0,45: (1,4)	0,50:0,50: (0,6)	0,60:0,40: (0,6)	-
X = 2	0,70:0,30: (1,0)	0,70:0,30: (0,9)	0,70 :0,30: (1,0)	0,65:0,35: (0,6)	0,70:0,30: (0,65)	-
X = 3	0,75:0,25: (0,9)	0,75:0,25: (0,85)	0,80 :0,20: (0,8)	0,75:0,25: (0,6)	-	-
X = 4	0,80:0,20: (0,8)	0,80:0,20: (0,8)	0,85:0,15: (0,7)	0,80:0,20: (0,6)	-	-

4.1.5 Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ égale à 1

La Figure 4.3 montre la résistance en compression moyenne pour les pâtes pouzzolaniques de chaux testées avec un rapport massique chimique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ égale à 1. Également, la résistance en compression de la pâte de chaux hydraulique de référence (NHL) est présentée. En comparaison au témoin à atteindre, soit la NHL, aucune des pâtes pouzzolaniques de chaux étudiées ne présente une plus grande résistance à la compression que la pâte de référence, et ce, en dépit du fait que la substitution de la chaux hydratée calcique par les pouzzolanes testées dans les mélanges réalisés soit non négligeable : proportion avoisinant le 50% massique. Il faut néanmoins souligner que la porosité des pâtes pouzzolaniques de chaux testées ($E/L \geq 0,60$) s'avère être nettement plus importante que celle de la pâte de chaux de référence ($E/L = 0,45$). Hormis le fait que le rapport E/L est particulièrement élevé ($E/L \geq 1,1$) pour les pâtes de chaux avec terre diatomée (MN-1 et WL-1), la résistance en compression de ces pâtes est excellente et voisine de celle de la pâte de chaux de référence.

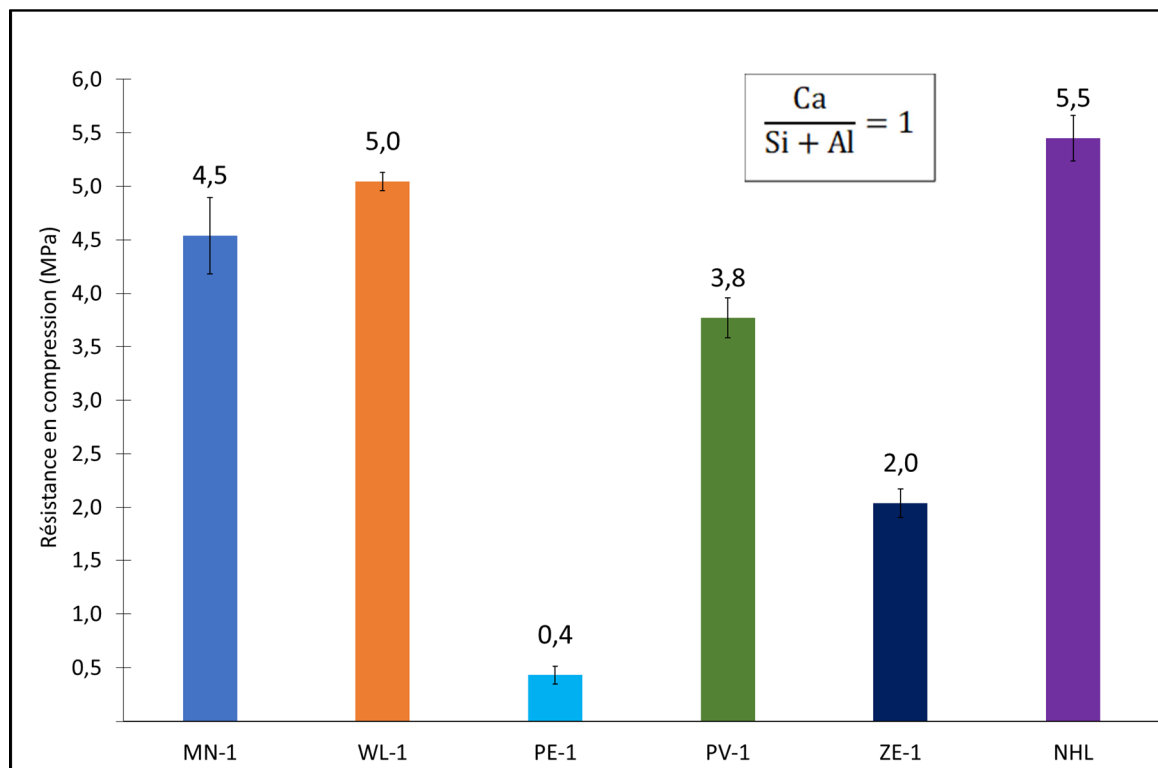


Figure 4.3 Résistances en compression des cubes de pâtes durcies des pouzzolanes à 28 jours de cure (21°C – 95%HR) pour les pouzzolanes étudiées

4.1.6 Pâtes pouzzolaniques de chaux avec rapport $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ supérieur à 1

D'autre part, pour chaque matériau au potentiel pouzzolanique à l'étude, plusieurs mélanges ont été réalisés en variant la fraction en pouzzolane suivant des rapports massiques $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ établis et synthétisés au Tableau 4.2. Le rapport massique variable $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ permet une distinction évidente entre les mélanges contenant la même proportion en minéraux réactifs.

La Figure 4.4 présente les résistances en compression moyenne des pâtes pouzzolaniques de chaux durcies à 28 jours selon des proportions variables de pouzzolane. Les résultats montrent que les deux sources de terres diatomées (MN et WL) présentent les meilleurs résultats mécaniques à terme parmi les matériaux étudiés. La terre diatomée (WL) présente une plus grande résistance moyenne en compression que l'autre source de terre diatomée (MN) et ce, peu importe le rapport massique chimique. En considérant les rapports E/L utilisés pour avoir une consistance comparable, il apparaît que la terre diatomée WL est probablement plus fine et moins absorbante en eau que la terre diatomée MN, ce qui explique en partie ces écarts. Rappelons que la quantité des mélanges avec la zéolithe (ZE) ont été limités, car le mélange ZE-1 présentait une chaleur dégagée totale moindre que le témoin au calorimètre, soit la NHL.

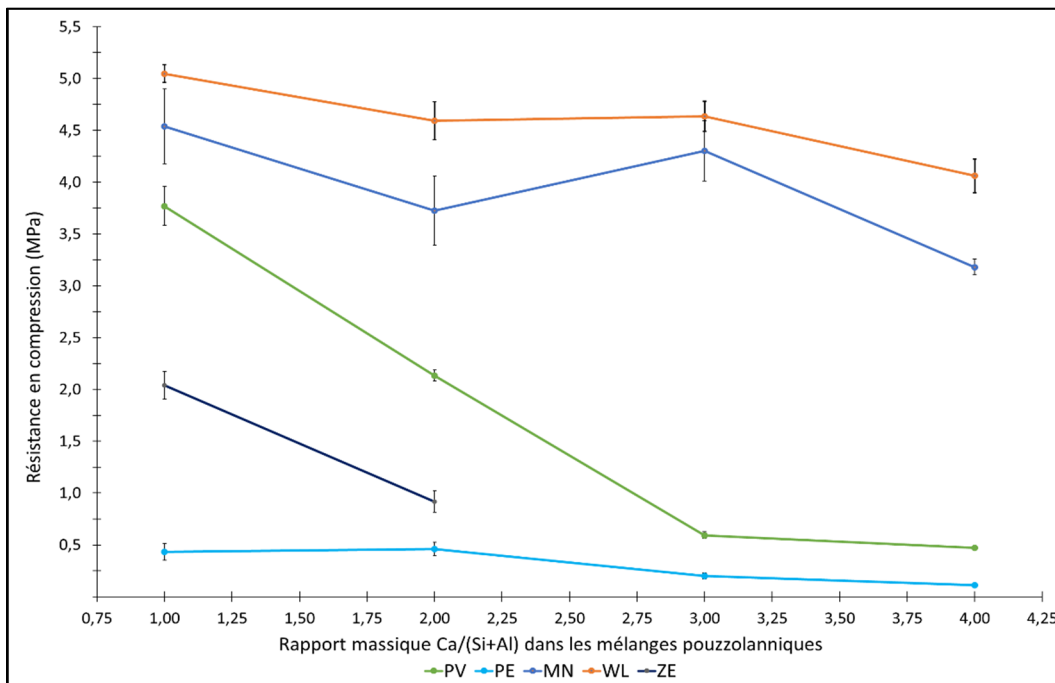


Figure 4.4 Résistances en compression des cubes de pâtes durcies des pouzzolanes à 28 jours de cure (21°C – 95%HR) pour un rapport massique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ variable

Les pâtes de chaux incorporant la poudre de verre (PV) présentent un comportement nettement différent de celui des pâtes avec terres diatomées. Ces dernières nécessitent un rapport massique chimique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ de moins de 2 pour présenter une résistance en compression acceptable à température ambiante, soit pour des dosages en pouzzolane inférieure à 35% dans un mélange binaire.

Les pâtes de chaux avec perlite expansée (PE) ne présentent aucune résistance à la compression à température ambiante à 28 jours de cure et ce, peu importe le rapport massique chimique considéré. Cela vient contrevenir aux résultats du calorimètre isotherme à 40°C pendant 7 jours où la chaleur massique dégagée pour les pâtes de chaux avec perlite expansée (PE) était semblable à celle des pâtes de chaux avec poudre de verre pour des rapports massiques chimiques équivalents. Il est possible que les réactions pouzzolaniques pour la perlite expansée (PE) nécessitent une température plus élevée afin de se manifester.

Finalement, les pâtes de chaux avec zéolithe (ZE) présentent une faible réaction pouzzolanique se traduisant par une résistance à la compression moindre que celle pour les pâtes de chaux incorporant de la terre diatomée et celles avec poudre de verre (PV). Les pâtes ZE et PE ont été retirées des essais subséquents pour raison pratique : les résidus des pâtes ne permettaient de faire l'essai de porosité ouverte à l'eau par immersion de façon satisfaisante sans s'effriter.

4.1.7 Porosité ouverte à l'eau par immersion

Les trois matériaux au potentiel pouzzolanique ayant permis d'atteindre les résistances en compression les plus élevées (pâtes de chaux avec MN, WL et PV) ont été sélectionnés pour évaluer leur porosité ouverte par immersion dans l'eau. La Figure 4.5 montre la porosité ouverte des pâtes de chaux incorporant de la terre diatomée (MN et WL) et celle avec poudre de verre (PV) suivant les rapports massiques chimiques considérés. Les deux terres diatomées se comportent différemment de la poudre de verre (PV) principalement par le fait que la terre diatomée est un matériau très poreux et qu'une grande quantité d'eau dans le mélange sert à compenser l'absorption en eau des particules de terre diatomée nécessitant un plus gros rapport eau/liant (E/L) dans le mélange afin d'obtenir une consistance de pâte suffisante à la mise en moule.

D'après les résultats obtenus, la quantité d'eau dans les mélanges de terre diatomée interfère peu avec la résistance mécanique des pâtes. Le paramètre impactant la résistance demeure principalement le rapport massique chimique dans le mélange en ce qui concerne les deux sources de terre diatomée. Pour un même rapport E/L pour tous les mélanges binaires avec la poudre de verre (PV), une diminution de la porosité ouverte accessible à l'eau survient lorsque le rapport massique chimique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ est réduit jusqu'à 1. La résistance à la compression des mélanges de poudre de verre se voit toutefois augmenter lorsque ce même rapport massique chimique diminue. Cela indique que les réactions chimiques pouzzolaniques formant les calcium de silicate hydratés (CSH) dans le mélange affinent quelque peu les pores ouverts de la pâte durcie en ce qui concerne les mélanges binaires avec de la poudre de verre (PV). En comparaison avec le témoin, la porosité ouverte à l'eau de la pâte de chaux hydraulique naturelle (NHL) pour un rapport E/L = 0,45, atteint une valeur nettement plus basse de 0,511.

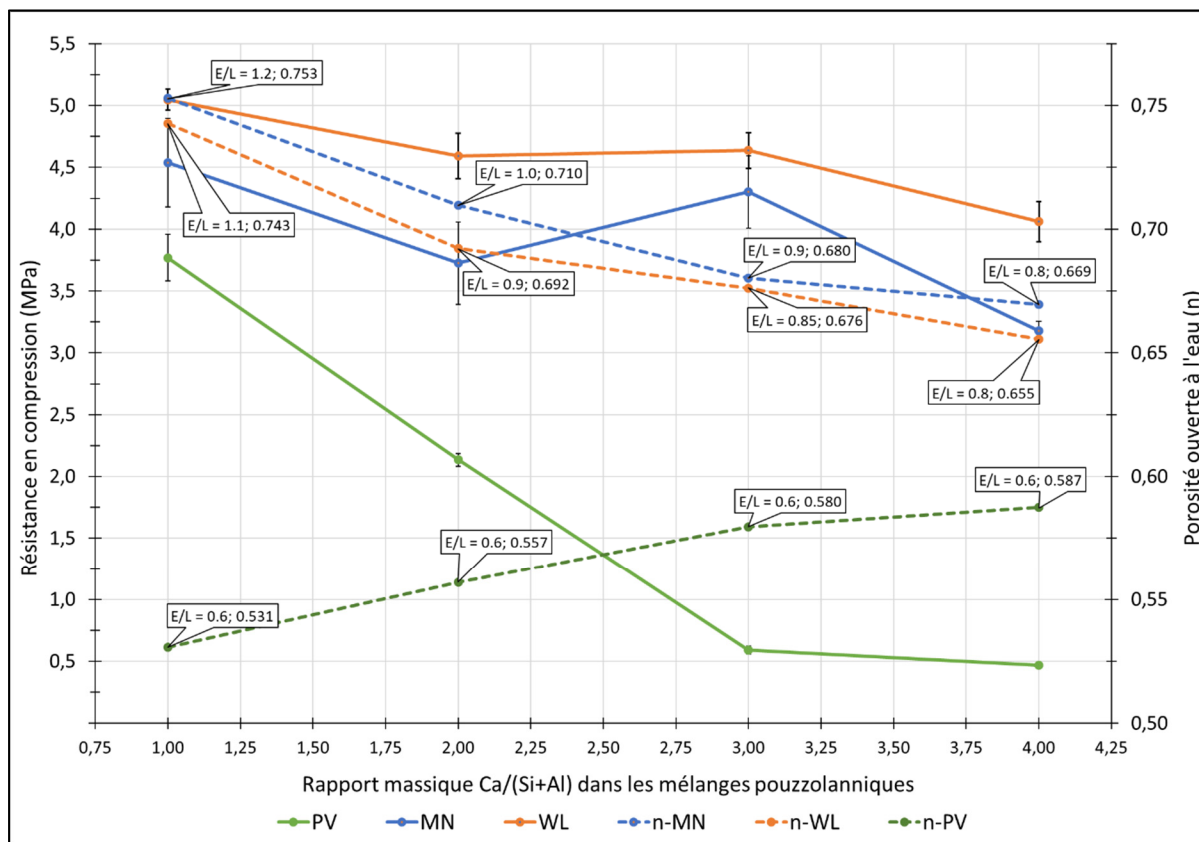


Figure 4.5 Relation entre la porosité ouverte à l'eau et la résistance à la compression des pouzzolanes selon un rapport massique $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ variable pour les mélanges de terre diatomée (MN), terre diatomée (WL) et poudre de verre (PV)

4.1.8 Choix de la pouzzolane secondaire

Parmi les pouzzolanes étudiées, la terre diatomée WL semble être la ressource disponible qui s'est le mieux comportée suivant les résultats au calorimètre isotherme à 40°C sur 7 jours et la résistance à la compression des pâtes pouzzolaniques de chaux durcies après 28 jours de cure en chambre humide à température ambiante. En se référant à la Figure 4.5, les pâtes de chaux avec la terre diatomée WL possèdent une meilleure résistance à la compression que celles avec la terre diatomée MN et ce, peu importe le rapport massique chimique employé dans les mélanges. Il apparaît que la pâte de chaux avec la terre diatomée WL suivant un rapport massique chimique de 4 détient également une résistance à la compression similaire, soit de l'ordre de 4 MPa, à celle avec poudre de verre (PV) à rapport massique chimique de 1. Donc, en considérant la quantité de pouzzolane dans le mélange binaire avec la chaux hydratée, il est concevable d'obtenir la même résistance en compression avec 20% (%masse) de terre diatomée comparativement à 50% (%masse) de poudre de verre en substitution à la chaux hydratée. Par ailleurs, la plus grande porosité ouverte des pâtes de chaux avec les terres diatomées permet d'anticiper de meilleures propriétés hygrothermiques du nouveau liant pour béton de chanvre. Enfin, les ressources de pouzzolanes étant habituellement plus onéreuses que la chaux hydratée, le choix d'utiliser la terre diatomée WL comparativement à la poudre de verre (PV) est tout à fait justifié d'un point de vue économique.

4.2 SÉRIE 2

4.2.1 Résultats de calorimétrie isotherme à 23°C

La série 1 a permis de sélectionner la pouzzolane la plus réactive lors de la première phase exploratoire des matériaux disponibles au potentiel pouzzolanique, soit la terre diatomée WhiteLake (WL). La série 2 permet maintenant de mettre en perspective cette pouzzolane parmi d'autres pouzzolanes déjà employées dans le domaine du béton de ciment. Pour évaluer l'impact de la température sur la réactivité des pâtes de chaux avec les pouzzolanes étudiées, les essais de calorimétrie ont été refaits à 23°C suivant les compositions des pâtes telles que définies au Tableau 4.3 selon un dosage massique en pouzzolane (Y) variable. Afin de faciliter la lecture du tableau, les rapports E/L sont mis entre parenthèses et les rapports Ca/(Si+Al) sont mis entre crochets. Rappelons que nous avons incorporé aux pouzzolanes déjà à l'étude, un laitier de hauts fourneaux (GB) qui présente un potentiel cimentaire du fait de sa composition, c'est-à-dire la capacité de produire des hydrates sans avoir à consommer de la chaux comme il se doit pour une pouzzolane.

Tableau 4.3 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en calorimétrie à 23°C (E/L=1,0) pour évaluer la réactivité pouzzolanique

Nom du mélange	WL-Y	MK-Y	GB-Y	PS1-Y	PS2-Y	NHL
Chaux	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydraulique
Pouzzolane (PZ)	Terre diatomée White Lake	Métakaolin	Laitier de haut fourneau	Boue de désencrage non broyée calcinée à 750°C-2h	Boue de désencrage broyée calcinée à 750°C-2h	-
Y=%PZ (% massique)	CHX : PZ : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : [Ca/(Si+Al)]	-
Y=30	0,70:0,30: [2,0]	0,70:0,30: [2,1]	0,70:0,30: [4,3]	0,70:0,30: [-]	0,70:0,30: [-]	-
Y=50	-	-	-	0,50:0,50: [-]	0,50:0,50: [-]	-
Note				Composition chimique inconnue		

Les résultats de la Figure 4.6 montrent qu'à proportion égale de remplacement de la chaux hydratée dans un mélange binaire, la pâte de chaux avec la terre diatomée WL n'est pas plus réactive que celles avec le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (GB). Il est important de noter la différence dans les résultats entre la chaleur massique dégagée totale sur 7 jours à 23°C par rapport à 40°C. La cinétique de la réaction pouzzolanique s'accélère particulièrement lors d'une hausse de la température. Une chaleur massique dégagée d'une réaction pouzzolanique sur 7 jours à 40°C est sensiblement similaire à une chaleur massique dégagée sur 28 jours à 23°C. Cependant, il est plus pratique de faire des essais à 23°C pour mieux coïncider avec ce qu'il est plus probable de trouver en réalité, c'est-à-dire sur le terrain.

Par ailleurs, la pâte de chaux avec boue de désencrages calcinée (2 heures à 750°C) présente une réactivité similaire à celle de la pâte de chaux de référence (NHL) lorsque le pourcentage massique en remplacement à la chaux hydratée dans un mélange binaire est de l'ordre de 50% et ce, peu importe si la boue de désencrage a été initialement broyée (PS2) ou non broyée (PS1) avant l'essai de calcination. Le broyage initial de la boue de désencrage avant calcination a donc peu d'influence sur la réactivité du matériau après calcination. Enfin, la pâte de chaux avec la terre diatomée WL a dégagé davantage de chaleur par gramme de liant sec que celle avec la boue de désencrage calcinée. Par conséquent, il a été convenu de poursuivre l'étude sur pâtes durcies avec la terre diatomée WL, le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (GB).

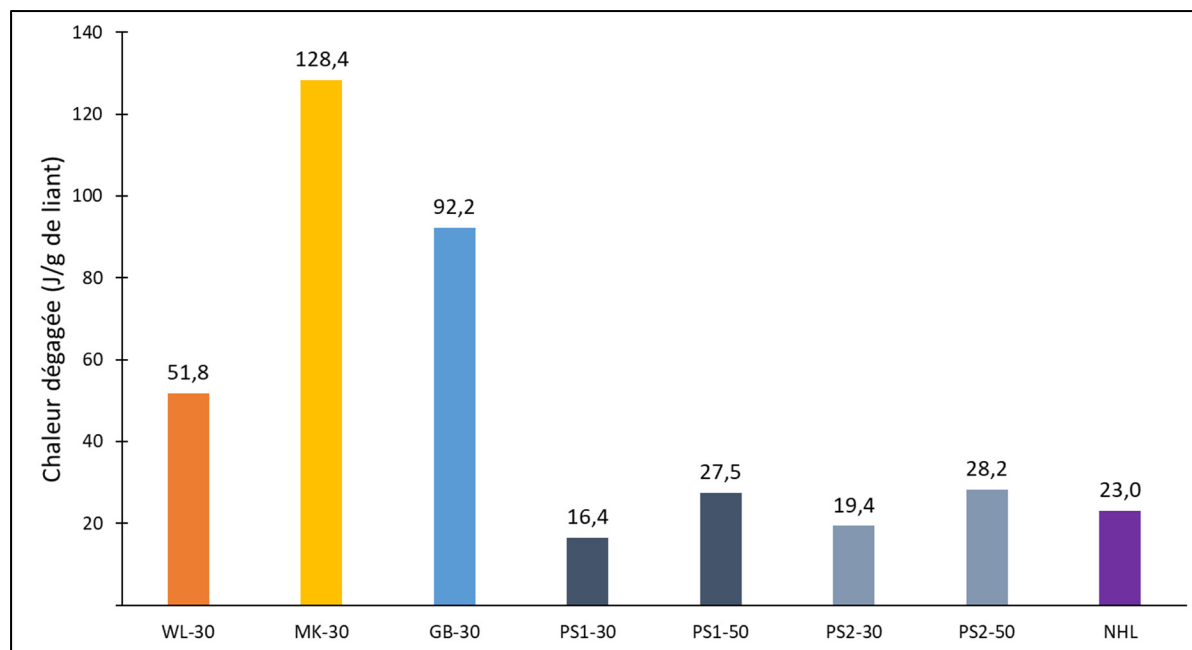


Figure 4.6 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 23°C des mélanges pouzzolaniques selon un pourcentage de remplacement de la chaux hydratée dans le mélange fixe

4.2.2 Résistance à la compression à 28 jours sur pâtes durcies

Pour évaluer la résistance à la compression des pâtes de chaux avec les pouzzolanes étudiées, des essais de compression ont été réalisés sur cube de pâtes durcies suivant les compositions des pâtes telles que définies au Tableau 4.4, soit en variant le pourcentage de remplacement de chaux hydratée dans le mélange. Le rapport $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$, malgré qu'indiqué dans le Tableau 4.4, n'a plus été utilisé comme base commune pour l'interprétation des résultats entre les pouzzolanes pures et le laitier de haut fourneau : un matériau hydraulique latent. Le Tableau 4.4 présente les compositions et la nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane à dosage en rapport massique (Y) variable testée en compression à 23°C à dosage en eau E/L variable. Afin de faciliter la lecture du tableau, les rapports E/L sont mis entre parenthèses et les rapports $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ sont mis entre crochets.

Tableau 4.4 Composition et nomenclature des pâtes de chaux avec pouzzolane testées en compression à 23°C (E/L = variable) pour évaluer la réactivité pouzzolanique

Nom du mélange	WL-Y	MK-Y	GB-Y	NHL
Chaux	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydratée (CHX)	Chaux hydraulique
Pouzzolane (PZ)	Terre diatomée White Lake	Métakaolin	Laitier de haut fourneau	-
Y=%PZ (% massique)	CHX : PZ : (E/L) : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : (E/L) : [Ca/(Si+Al)]	CHX : PZ : (E/L) : [Ca/(Si+Al)]	E/L = 0,45
Y=15	-	-	0,85:0,15: (0,65): [8,4]	-
Y=20	0,80:0,20: (0,8): [3,2]	0,80:0,20: (0,65): [3,5]	0,80:0,20: (0,63): [6,5]	-
Y=30	0,70:0,30: (1,0): [2]	0,70:0,30: (0,65): [2,1]	0,70:0,30: (0,60): [4,3]	-
Y=50	0,50:0,50: (1,2): [0,9]	0,50:0,50: (0,65): [1,0]	0,50:0,50: (0,55): [2,5]	-
Y=65	-	-	0,35:0,65: (0,53): [1,8]	-

Les résultats des essais en compression des pâtes pouzzolaniques de chaux durcies à 28 jours (chambre humide et T_{ambiante}) sont présentés à la Figure 4.7. Ils montrent pour les pâtes de chaux avec laitier de haut fourneau (GB) et la terre diatomée WL, que la résistance évolue de façon quasi linéaire suivant la proportion de pouzzolane dans le mélange. Cependant, ce n'est pas le cas pour les pâtes de chaux avec le métakaolin (MK) où l'évolution de la résistance n'est pas proportionnelle au taux de remplacement de pouzzolane dans le mélange binaire avec chaux hydratée. Les résultats montrent un plateau de résistance pour les pâtes qui contiennent entre 30% et 50% (%masse) de métakaolin. Il semble qu'à partir d'un certain pourcentage massique de remplacement, un excès de matière pouzzolanique dans le mélange n'améliore

plus les propriétés mécaniques à la compression pour les pâtes de chaux avec métakaolin. D'après les résultats obtenus, il semble qu'à partir de 30% de remplacement de la chaux hydratée par les pouzzolanes testées permet une hausse de la résistance à la compression. À cette proportion de substitution, le mélange composé de métakaolin et celui de laitier de haut fourneau surpassent considérablement le témoin NHL. Le mélange de terre diatomée à 30% de substitution s'y approche également sans toutefois le surpasser.

Rappelons que le mécanisme de gain de résistance dans une pâte de chaux purement pouzzolanique porte essentiellement sur le type et la teneur en hydrates précipités lors de la réaction (DeSilva, 1992). Les rapports chimiques massiques $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al})$ et AS_2/CH sont des paramètres importants de prédiction du type et du taux d'hydrates formés. En se référant aux équations stœchiométriques présentées au chapitre 2, nous pouvons établir une proportion de substitution critique en pouzzolane où la consommation de la chaux libre (CH) est optimale limitant le gain de résistance des pâtes durcies à un certain pourcentage dans le mélange.

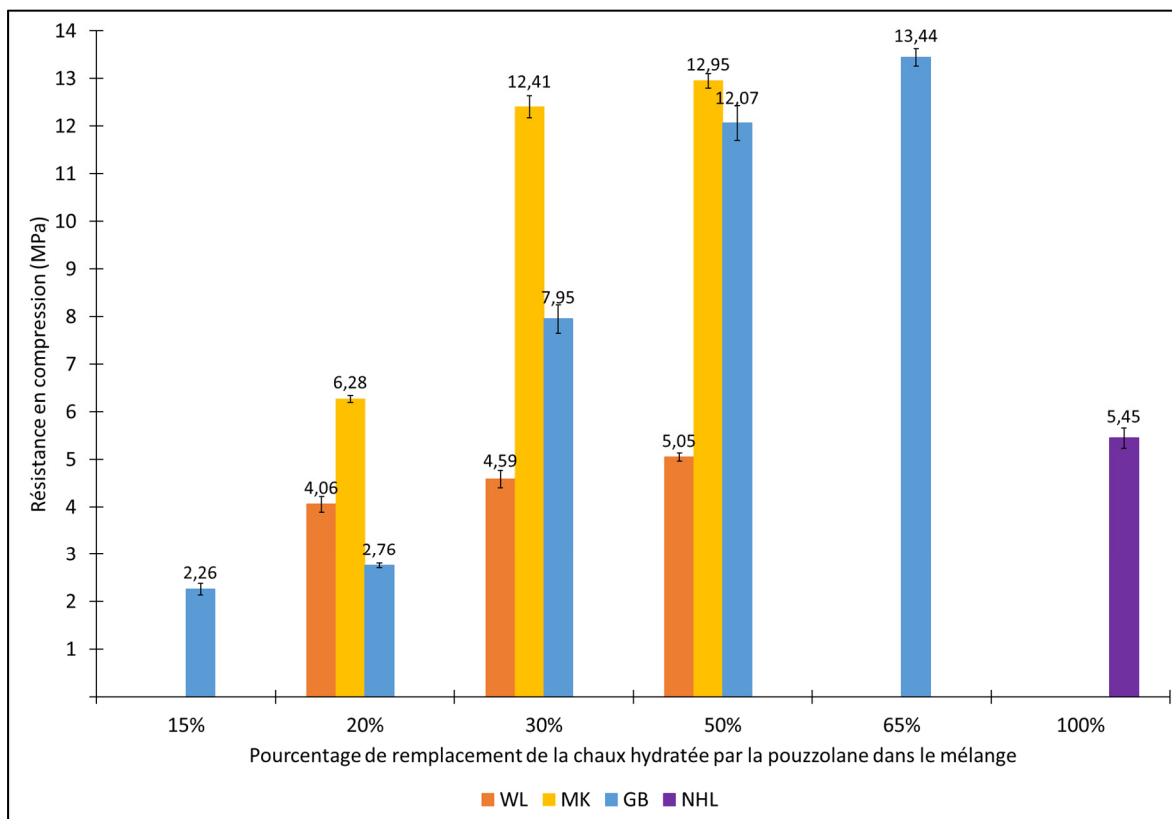


Figure 4.7 Résistance à la compression à 28 jours des mélanges pouzzolaniques binaires selon un pourcentage variable de remplacement de la chaux hydratée dans le mélange

4.2.3 Porosité ouverte des pâtes pouzzolaniques de chaux

La mesure de la porosité ouverte à l'eau a été effectuée sur des fragments de pâtes prélevés suivant l'essai de compression. Au total trois (3) fragments de chaque échantillon sont testés.

La Figure 4.8 montre la porosité moyenne et l'écart type pour les fragments des pâtes de chaux durcies testées dans le cadre de la 2^e série. Les résultats montrent une porosité ouverte similaire entre les pâtes de chaux pour les mélanges contenant le laitier de haut fourneau (GB) et celles avec le métakaolin (MK). Pour ces pâtes, la porosité ouverte diminue légèrement avec le pourcentage massique de remplacement de la chaux hydratée pour ces deux matériaux (GB et MK). Par ailleurs, les pâtes de chaux avec la terre diatomée WL sont très poreuses et de surcroît cette porosité augmente en fonction du taux de remplacement de la chaux dans le mélange binaire. Notons que les trois matériaux sélectionnés (GB, MK et WL) ont toutefois une porosité ouverte toujours plus élevée que celle de la pâte de chaux témoin (NHL). Contrairement à toute attente, le rapport E/L n'est pas le meilleur indicateur de la résistance à la compression des pâtes pouzzolaniques tel qu'il est anticipé généralement pour une pâte de ciment Portland. Les réactions pouzzolaniques sont des réactions complexes où divers hydrates formés à différents rapports massiques peuvent influencer grandement la résistance en compression. Enfin, on peut penser à priori qu'un plus grand pourcentage de vides pour une même résistance mécanique mène potentiellement à de meilleures propriétés hydriques et thermiques attendues pour des bétons végétaux de chanvre.

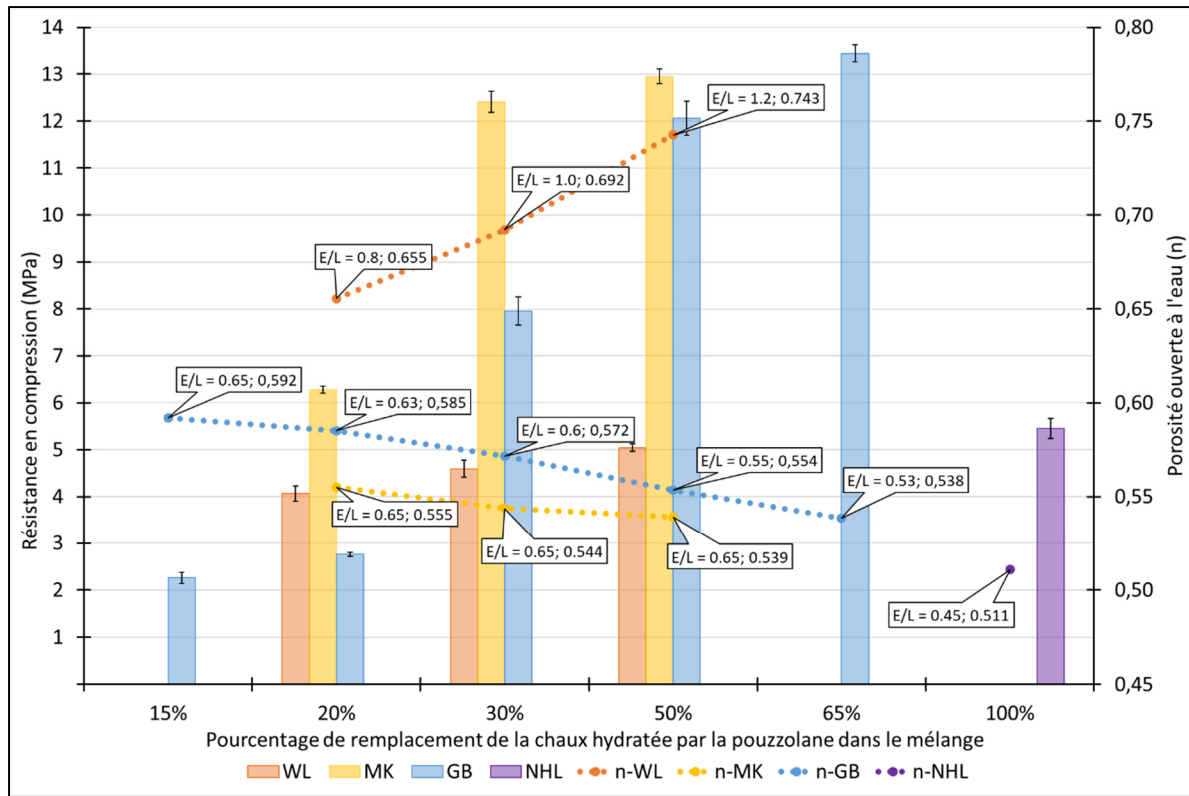


Figure 4.8 Relation entre la porosité ouverte à l'eau et la résistance à la compression des mélanges pouzzolaniques binaires selon un pourcentage de remplacement de la chaux hydratée variable

4.2.4 Impact de l'eau biologique sur la réactivité en calorimétrie isotherme à 23°C

Les granulats issus du chanvre sont des composées biologiques et lignocellulosiques. Elles sont composées essentiellement de cellulose, de lignine, d'hémicellulose et de pectines (Hustache, 2008). Les deux principaux constituants de cellulose et de lignine composent la structure même du granulat de chanvre. Les composés d'hémicellulose et de pectines constituent la minorité de la chènevotte. Ces deux derniers constituants sont des substances hydrophiles facilement extractibles dans l'eau lors du trempage de la chènevotte. Lors d'un trempage dans un solvant alcalin comme dans l'eau saturée de chaux, une attaque plus importante de la chènevotte survient dégradant ainsi davantage sa structure moléculaire (Sedan et al., 2007). Par conséquent, une extraction plus importante des composés hydrosolubles survient alors en solution alcaline. Ces substances solubles, essentiellement des hémicelluloses et des pectines, vont venir interagir dans le processus de réaction hydraulique et pouzzolanique

de la matrice liante (Walker & Pavía, 2014). Afin de mieux comprendre quel impact ces substances ont sur la réactivité des matériaux sélectionnés, le choix de mélanger l'eau biologique de chanvre, c'est-à-dire l'eau chargée en composés organiques hydrosolubles, saturée de chaux à l'eau de gâchage des pâtes pouzzolaniques de chaux testées au calorimètre isotherme à température ambiante permet d'évaluer l'impact de la réactivité du liant dans le contexte du béton végétal de chanvre. Selon la Figure 4.9, l'eau biologique de chanvre avec la chaux semble avoir une couleur plus jaunâtre que l'eau de chanvre seulement renseignant sur cette possible attaque alcaline accrue de la chènevotte accélérant la mise en solution de ces composés hydrosolubles en plus grande quantité.

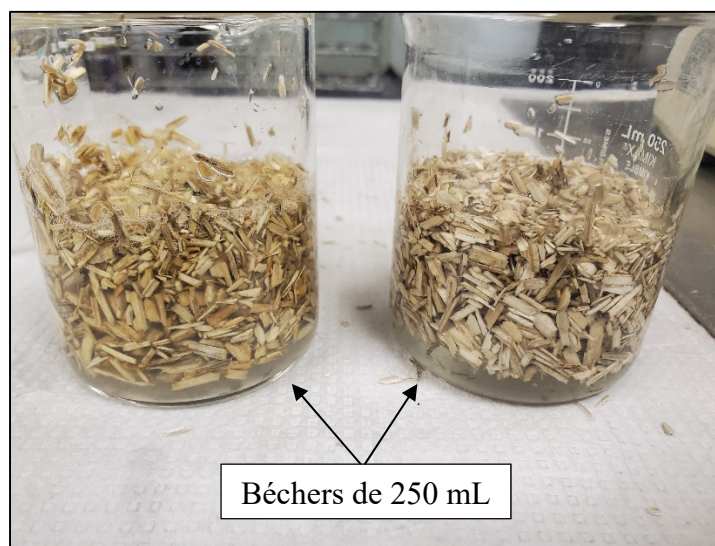


Figure 4.9 Observations des mélanges de la chènevotte avec l'eau de chaux à gauche et la chènevotte avec l'eau distillée à droite

4.2.4.1 Le potentiel Hydrogène (pH) de la solution de l'eau de chaux avec les fibres végétales

Tout d'abord, une évaluation simple du pH de l'eau de chanvre (Hemp Water, HW) est essentielle à la bonne compréhension de son impact sur la réactivité des matériaux pouzzolaniques. Une réaction pouzzolanique est fortement dépendante du pH de la solution (Shi & Day, 2000a). Les minéraux des pouzzolanes nécessitent une attaque alcaline afin de se solubiliser. L'échelle de pH est logarithmique. Une diminution de quelques dixièmes sur cette échelle de mesure mène à un impact significatif du potentiel de réaction de matériaux

pouzzolaniques (Shi & Day, 2000b). D’après le Tableau 4.5 et la Figure 4.10, il est remarqué qu’effectivement l’eau de chanvre, légèrement acide par rapport à l’eau distillée neutre, vient impacter sur le pH de la solution alcaline de chanvre mesuré à 12,45 comparativement à une solution de chaux seule de même dosage mesuré à 12,87. Les essais en calorimétrie de pâtes de chaux confectionnées avec de l’eau ayant été préalablement mise en contact avec des particules de chanvre va permettre de vérifier l’importance de l’alcalinité de l’eau sur la réactivité des pouzzolanes étudiées.

Tableau 4.5 pH des solutions aqueuses après 60 min de trempage des fibres végétales (10,0g) en présence de chaux hydratée saturée en solution (concentration de 1,0 g de chaux/100ml)

Solution aqueuse	Quantité chanvre	Quantité chaux hydratée	Quantité eau distillée	pH à t = 0 min	pH à t = 60 min
Eau distillée	-	-	100 ml	7,00	-
Eau de chanvre ou Hemp Water (HW)	10,0 g	-	100 ml	-	6,38
Eau de chaux hydratée	-	1,0 g	100 ml	12,87	-
Eau de chanvre saturée en chaux	10,0 g	1,0 g	100 ml	-	12,45

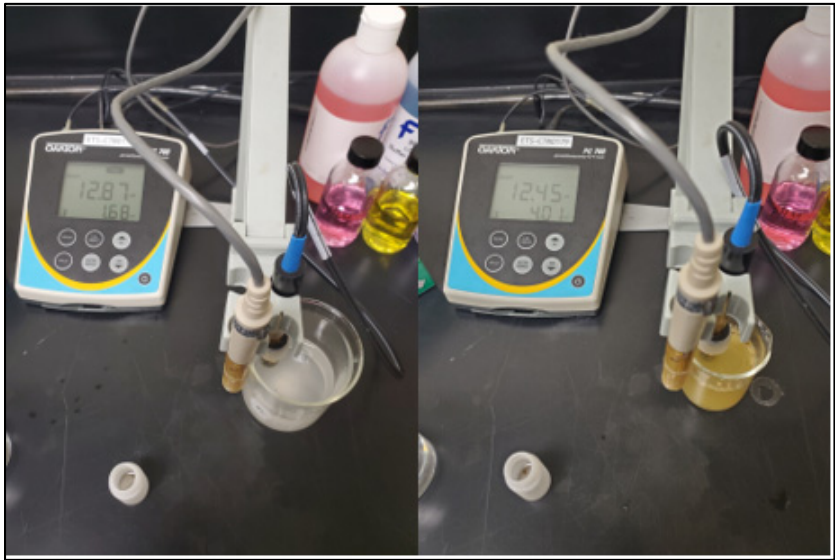


Figure 4.10 Impact des fibres végétales sur le pH de la solution saturée en chaux hydratée

4.2.4.2 Calorimétrie sur pâtes pouzzolaniques de chaux confectionnées avec de l'eau de trempage avec particules de chanvre

La cinétique de la réaction pouzzolanique est plus lente que la réaction d'un ciment hydraulique comme le ciment Portland. La réaction pouzzolanique survient de nombreuses heures, voire des semaines, après l'hydratation et la prise d'un ciment Portland. Comme nous l'avons évoqué au Chapitre 1, les pouzzolanes incorporées dans un béton conventionnel vont réagir avec la Portlandite (chaux libre, hydratée) issue de l'hydratation du ciment Portland. Dans le cas de pâtes pouzzolaniques de chaux, la chaux hydratée est initialement introduite dès le début du malaxage de la pâte. Le délai de la réaction pouzzolanique, ou encore l'évolution de la chaleur massique dégagée vont nous renseigner sur la cinétique de la pouzzolane étudiée dans le contexte où de l'eau de trempage biologique est utilisée. L'eau de trempage est utilisée pour obtenir les composés hydrosolubles issus du chanvre, appelée eau biologique dans ce mémoire.

Pour étudier l'importance de l'alcalinité de l'eau sur le potentiel réactif des pâtes pouzzolaniques de chaux à l'étude, nous avons convenu de limiter notre étude sur les mélanges binaires « chaux-pouzzolane » de 70% - 30% (%massique). En effet, nous avons montré précédemment que 30% de substitution de chaux par une pouzzolane s'avère être un dosage relativement optimal d'un point de vue mécanique. Cette 3^e série d'essais se limite également aux trois matériaux retenus pour la 2^e série, soit : le laitier de haut fourneau (GB), la terre diatomée (WL) et le métakaolin (MK). La réactivité de pâtes pouzzolaniques de chaux confectionnée avec de l'eau de trempage avec particules de chanvre et identifié « HW ou Hemp Water » est comparée avec les mêmes pâtes, mais confectionnées avec de l'eau pure.

Dans le graphique de la Figure 4.12 et l'histogramme de la Figure 4.13, on note la chaleur totale cumulée en J/gramme de mélange sec sur 7 jours à 23°C dans le calorimètre isotherme pour chaque matériau à l'étude. À l'exception du métakaolin (MK), l'ensemble des matériaux incluant la chaux hydraulique naturelle connaissent une réduction de la chaleur totale dégagée au cours des 7 premiers jours lorsque l'eau de gâchage est essentiellement de l'eau de chanvre saturée de chaux.

La Figure 4.11 montre que le taux de chaleur massique dégagée ($J \cdot s^{-1} \cdot g$ de liant⁻¹) est significativement impacté par l'eau de chanvre chargée en matière biologique. Notons que «

la prise pouzzolanique » s'effectue lors d'une modification de la pente décroissante du taux de chaleur massique dégagée. Plus la pente du taux de chaleur massique dégagée est modifiée et devient ascendante, plus la prise est importante. Il est noté dans cette figure une inhibition de cette « prise pouzzolanique » par une réduction de l'amplitude du pic du taux de chaleur dégagée lors de la réaction pour l'ensemble des matériaux testés. Les résultats montrent clairement l'impact de l'alcalinité de l'eau sur la réactivité des pâtes. Notamment, l'évolution du taux de chaleur massique dégagée pour la pâte de chaux avec métakaolin (MK) et celle-ci confectionnée avec de l'eau de trempage (MK-30-HW) se voit significativement décalée par rapport à celle de la pâte de chaux avec métakaolin et confectionnée avec de l'eau pure (MK-30). En effet, la pâte MK-30-HW présente un dégagement de chaleur s'étalant sur une plus longue période que la pâte MK-30 suivant les premières 35 heures de la réaction. Cela résulte d'une augmentation significative de la chaleur totale dégagée à 60 heures de la réaction pour la pâte MK-30-HW par rapport à la pâte MK-30. Cette période de prolongation de la phase de décélération où il y a davantage de chaleur dégagée entre ces deux pâtes lors de la réaction est représentée par une aire hachurée rouge dessinée sur la Figure 4.11 et la Figure 4.12. Une différence dans les types d'hydrate formés entre ces deux pâtes pourrait en expliquer la cause.

Cependant, les résultats de la Figure 4.11 montrent également une transition temporelle notoire du pic de la prise particulièrement visible entre les pâtes MK-30 et MK-30-HW ainsi qu'entre les pâtes GB-30 et GB-30-HW. Il faut noter qu'à température ambiante, le dégagement de chaleur des réactions pouzzolaniques est largement réduit et la cinétique de réaction est très lente de sorte qu'il peut être difficile de bien distinguer des différences réactionnelles graphiquement entre les courbes de deux pâtes similaires. En effet, plus le matériau est réactif, plus il est facile d'observer les écarts entre deux pâtes similaires. Dans le cas des pâtes de chaux avec métakaolin (MK) confectionnées avec et sans eau de trempage, de même que celles avec laitier de haut fourneau (GB), on estime que l'eau de trempage a pour effet de retarder la réactivité de ces pâtes de 10 et 15 heures respectivement. Walker et Pavía (2014) ont noté des retards de prise à l'essai de pénétration par l'aiguille Vicat similaire aux résultats obtenus au calorimètre isotherme pour des pâtes de chaux-métakaolin et de chaux-laitier de haut fourneau de 10 heures et 23 heures respectivement en mélange avec l'eau de chanvre comme eau de gâchage. Cet aspect de retard de prise est important dans un contexte de fabrication d'éléments

de béton végétal de chanvre de faibles épaisseurs en vue de cerner un temps de décoffrage suffisamment long pour permettre à la prise de survenir. Un décoffrage précoce d'éléments minces, avant la prise pouzzolanique, peut provoquer un assèchement précoce locale du béton végétal de chanvre, affectant ainsi la qualité finale du produit confectionné.

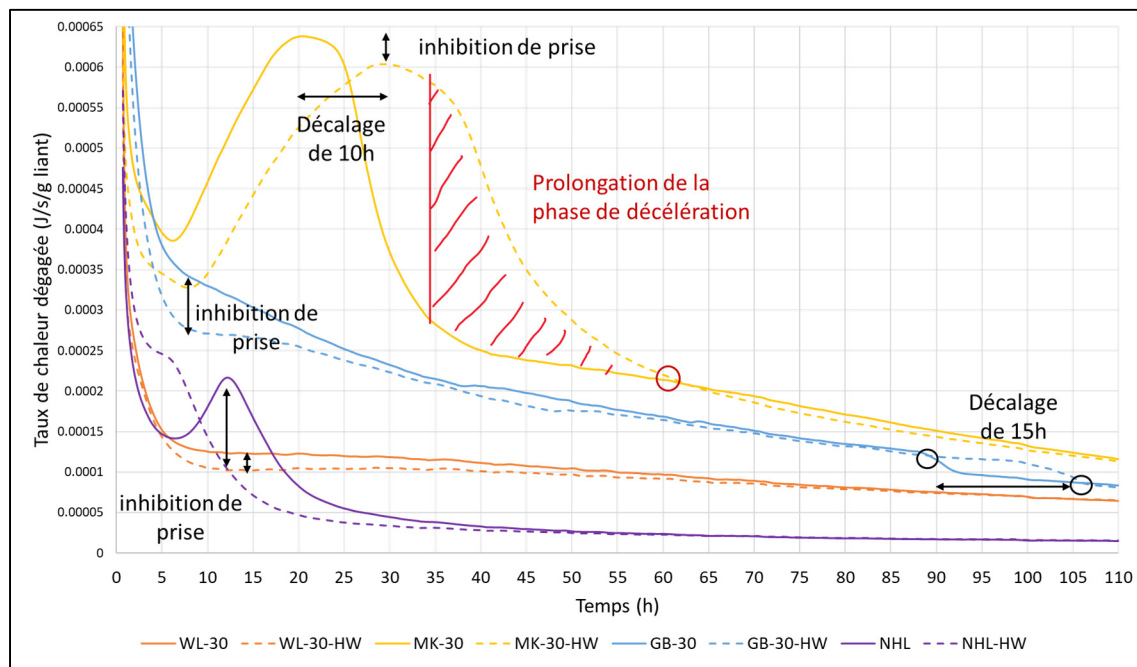


Figure 4.11 Effet de l'eau de chanvre (HW) en solution de pâte sur la réactivité calorifique des mélanges pouzzolaniques binaires retenus

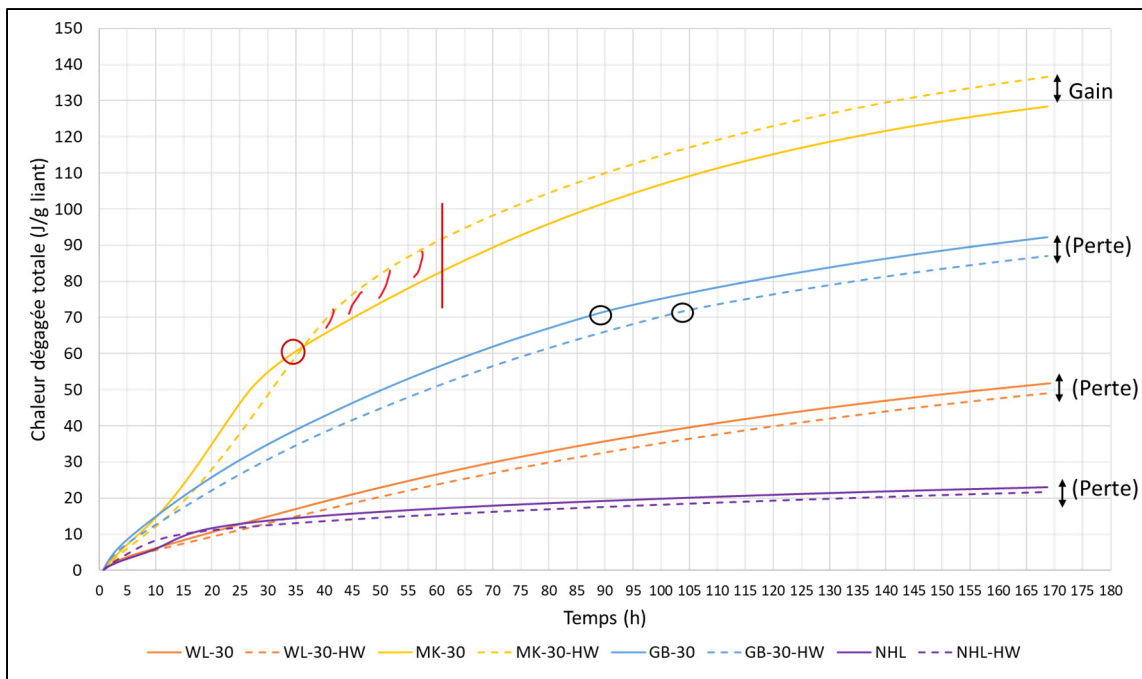


Figure 4.12 Effet de l'eau de chanvre (HW) en solution de pâte sur la chaleur dégagée totale des mélanges pouzzolaniques binaires retenus

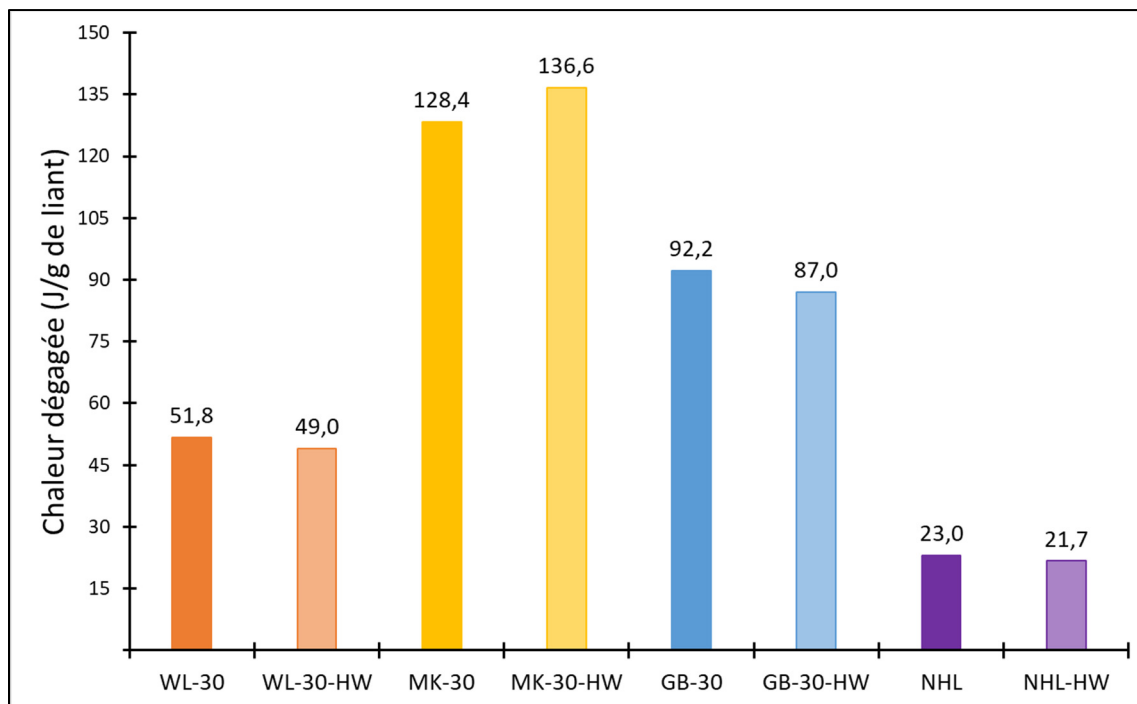


Figure 4.13 Chaleur massique dégagée totale (J/g de liant) sur 7 jours à 23°C des mélanges pouzzolaniques en présence d'eau de chanvre (HW)

4.2.4.3 Discussion de l'impact de l'eau biologique sur la réactivité pouzzolanique d'une pâte de chaux-métakaolin

Afin de mieux comprendre la différence du comportement pouzzolanique surprenante entre la pâte MK-30-HW et la pâte MK-30, nous avons tenté d'expliquer ce qui pourrait décrire ce phénomène observé au calorimètre. Le métakaolin (MK) possède une proportion significative d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) dans sa composition chimique massique. Ce faisant, les réactions chimiques d'une pâte de chaux avec métakaolin peuvent prendre d'autres formes d'hydrates telles que des CSH, CASH ou CAH. Il est possible que certains hydrates composés d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) tels que les CASH et les CAH formés dans la pâte puissent dégager une chaleur sur une plus longue période que les hydrates de type CSH. La formation de ses différents hydrates en solution survient de façon successive dans le temps en débutant principalement par la formation des CSH, ensuite par celles des CASH et des CAH finalement (Rojas & Cabrera, 2002; Walker & Pavía, 2014). L'inaccessibilité temporaire des ions calcium Ca^{2+} au début de la réaction pouzzolanique, en raison des pectines présentes dans l'eau de trempage utilisé au gâchage, réduit le nombre d'ions calcium Ca^{2+} disponible à ce moment clé pour la formation des 1^{ers} hydrates de CSH dans les premières heures de l'hydratation. En plus d'allonger le temps d'apparition des premiers hydrates de type CSH, l'accessibilité grandissante des ions calcium Ca^{2+} décalée dans le temps permet ultérieurement une plus grande disponibilité possible de ces ions calcium en solution pour former d'autres types d'hydrates tels que des CASH et/ou des CAH expliquant possiblement l'augmentation de la chaleur dégagée totale soulevée lors de l'essai au calorimètre isotherme pour une pâte de chaux avec métakaolin confectionné avec de l'eau de trempage biologique. Wu & Ye (2017) ont étudié les phases cristallines produites dans les mélanges de ciment avec des ajouts cimentaires et ils ont noté une plus grande présence d'hydrates de type CASH lorsque le rapport massique Ca/Si diminuait dans les mélanges. Une chélation des ions calcium Ca^{2+} dans la structure moléculaire des substances biologiques viendrait inévitablement impacter sur la baisse du rapport massique Ca/Si dans les débuts de la réaction pouzzolanique.

En d'autres mots, une baisse en ions Ca^{2+} en solution en raison du phénomène de chélation par les substances biologiques hydrosolubles réduirait temporairement le rapport massique Ca/Si et impacterait sur les types d'hydrate formés, ce qui corrobore avec l'interprétation d'une plus

grande formation d'hydrates de types CASH, d'après Wu & Ye (2017), que dans le mélange de référence sans substances biologiques présentes.

4.2.5 Bilan suivant la SÉRIE 1 et la SÉRIE 2

L'objectif de la série 1 était de répertorier des matériaux naturels ou recyclés au potentiel pouzzolanique accessibles en Amérique du Nord afin d'évaluer leur réactivité pouzzolanique en solution avec la chaux hydratée du Québec. La résistance à la compression des pâtes durcies à 28 jours a également été réalisée pour valider les résultats obtenus lors de l'essai à la calorimétrie isotherme. Parmi les pouzzolanes disponibles, la terre diatomée (WL) en provenance de l'Oregon des États-Unis est le matériau au potentiel pouzzolanique qui se rapprochait le plus du témoin à atteindre, soit la chaux hydraulique naturelle (NHL).

Ensuite, pour compléter l'objectif de la série 2 qui était de mettre en perspective la réactivité de la pouzzolane sélectionnée lors de la série 1 avec d'autres pouzzolanes actuellement utilisées dans le domaine du béton de ciment, la pouzzolane secondaire retenue a été comparée à deux ajouts cimentaires disponibles en Amérique du Nord, soit le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (GB). Tant au niveau de la chaleur dégagée totale à 23°C à 7 jours en J/gramme de mélange sec qu'à la résistance à la compression des pâtes durcies à 28 jours, la terre diatomée (WL) demeure moins réactive que les deux ajouts cimentaires sélectionnés. Cependant, la grande porosité de la terre diatomée (WL) améliore toutefois le pourcentage de vide des pâtes durcies. Pour cette raison, il est possible que de meilleures propriétés hygrothermiques soient attendues pour les bétons végétaux de chanvre composés en partie de ce matériau.

Lors de l'évaluation de l'impact de l'eau biologique végétale sur la réactivité des matériaux pouzzolaniques sélectionnés à la calorimétrie isotherme à température ambiante, tous ont connu un retard de la « prise pouzzolanique » ou une inhibition partielle de cette prise notoire par une diminution de l'amplitude du pic observé graphiquement. Contrairement à toute attente lors de l'essai à la calorimétrie isotherme, la pâte MK-30-HW confectionnée avec l'eau de trempage de chanvre connaît quant à lui une augmentation notoire de la chaleur totale dégagée sur 7 jours à 23°C par rapport à la pâte de référence MK-30 confectionnée avec de l'eau pure

malgré le retard de la « prise pouzzolanique » se traduisant par un décalage du pic noté à la Figure 4.11 précédente. L'augmentation de la chaleur dégagée totale notée à la Figure 4.12 se traduit fort probablement par une augmentation de la résistance à la compression de la pâte durcie pour un mélange contenant en grande proportion de métakaolin confectionnée avec l'eau de trempage du chanvre. Cet aspect est approfondi lors des essais réalisés de la SÉRIE 3.

Enfin, une piste de réflexion est ainsi proposée pour comprendre ce phénomène. Celle-ci demeure probablement dans le type des hydrates formés au cours de la réaction pouzzolanique. Nous estimons probable que les substances biologiques présentes dans la pâte retardent la quantité d'ions calcium Ca^{2+} accessible pour la formation des premiers hydrates de types CSH favorisant plutôt la formation de ces hydrates sur une période plus lente. Par conséquent, une accessibilité plus lente aux ions calcium Ca^{2+} provoquerait donc probablement une plus grande formation ultérieure des hydrates de type CASH ou CAH en abaissant temporairement le rapport massique Ca/Si dans la pâte : ce qui pourrait faire augmenter la chaleur dégagée totale notée au calorimètre isotherme.

Finalement, en se référant au schéma décisionnel présenté à la Figure 4.14, le métakaolin (MK) semble être le matériau se comportant le mieux en présence de substances végétales parmi tous les types de matériaux étudiés nous laissant présager être un bon candidat à la formulation d'un béton végétal de chanvre. Le métakaolin sera ainsi considéré comme la pouzzolane principale pour la dernière série 3 de ce chapitre en vue d'optimiser le volume capillaire des pores connectés de la pâte pouzzolanique par l'ajout d'une seconde pouzzolane moins réactive.

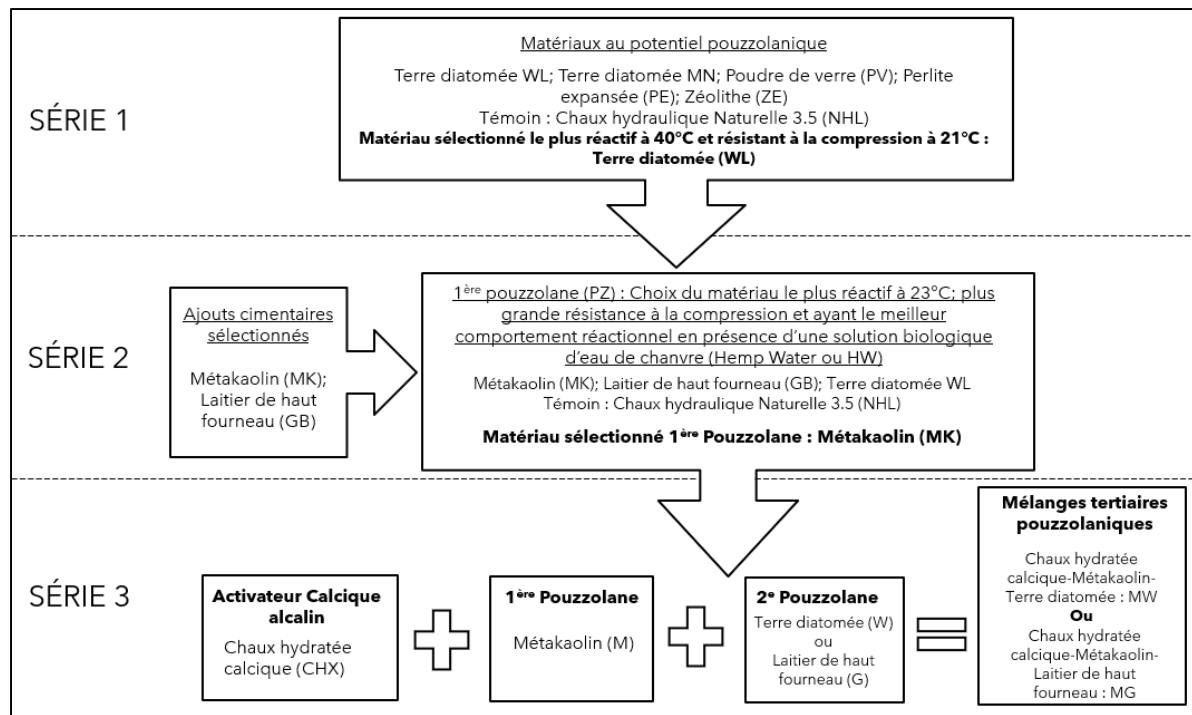


Figure 4.14 Schéma décisionnel des pouzzolanes de la formulation ternaire optimisée

4.3 SÉRIE 3

L'objectif de la série 3 est de valider les hypothèses concernant la théorie du mode réactionnel pouzzolanique d'un mélange de chaux hydratée calcique (CH) et de métakaolinite (AS₂). Plus précisément, la série 3 consiste à présenter les derniers résultats obtenus d'après l'approche expérimentale du chapitre 2 en ce qui concerne l'optimisation possible du volume capillaire des pores connectés des pâtes pouzzolaniques ternaires par la variation d'un paramètre certain, soit le ratio molaire massique Si/Al initial dans les mélanges. Cette dernière série 3 se veut répondre également à la problématique de la consommation totale de la chaux libre au cœur des pâtes en misant sur l'équilibre stœchiométrique de la réaction pouzzolanique par l'équation (2.2) ($AS_2/6CH = 0,5$). Suivant la caractérisation physique préliminaire des poudres minérales constituant les pâtes, l'étude des pâtes pouzzolaniques ternaires s'est portée notamment sur leur résistance mécanique à la compression, leur porosité ouverte à l'eau par immersion et leur décomposition chimique respective par l'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG).

4.3.1 Caractérisation physique des poudres minérales de la série 3

Les matières premières sélectionnées pour la formulation d'un liant pouzzolanique ont été physiquement caractérisées en laboratoire. La courbe granulométrique présentée à la Figure 4.15 renseigne sur la densité en volume des particules pour chaque matériau sélectionné. La seconde courbe granulométrique présentée à la Figure 4.16 renseigne sur la quantité de volume de particule cumulé passant sur la plage de taille granulométrique comprise en 0,01 μm à 1000 μm .

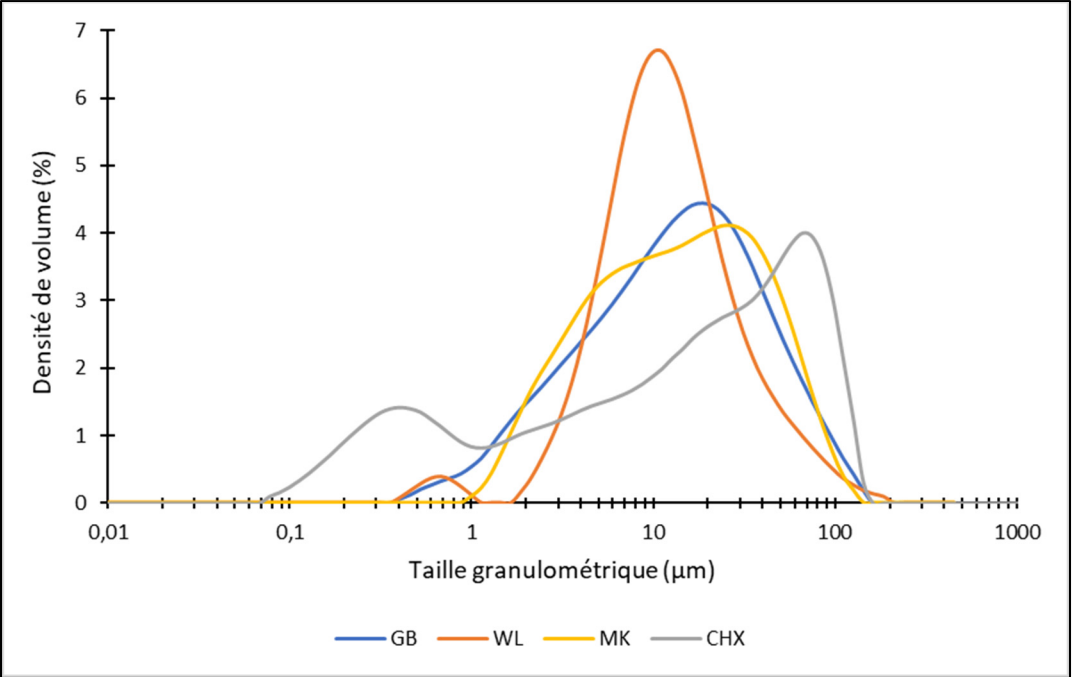


Figure 4.15 Répartition de la densité de volume des particules par matériau retenu

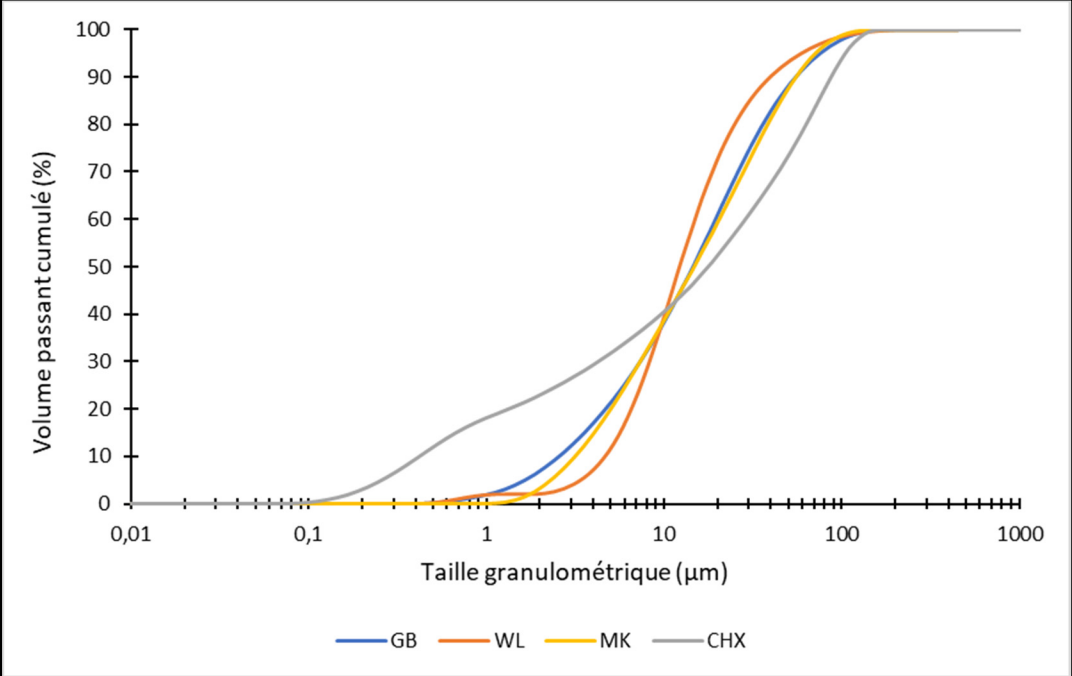


Figure 4.16 Courbe granulométrique des particules en pourcentage de volume cumulé par matériau retenu

La répartition granulométrique des matériaux sélectionnés varie légèrement entre le métakaolin (MK) et le laitier de haut fourneau (GB). Ces deux matériaux semblent comprendre une plage granulométrique similaire. Leur étendue SPAN est également très proche. La terre diatomée WL a donc un étalement de particule plus étroit que les deux autres matériaux sélectionnés. La chaux hydratée calcique (CHX) possède quant à elle une granulométrie plus étalée que les trois matériaux pouzzolaniques retenus d'après les valeurs de leur SPAN respectif présentés au Tableau 4.6.

Tableau 4.6 Caractéristiques de la taille des particules des poudres par granulométrie laser

Nom du matériau	Étiquette	Dv(90) (μm)	Dv(50) (μm)	Dv(10) (μm)	SPAN
Chaux hydratée	CHX	$88,3 \pm 0,9$	$18,50 \pm 0,60$	$0,436 \pm 0,011$	$4,75 \pm 0,10$
Terre diatomée	WL	$39,3 \pm 0,4$	$12,30 \pm 0,02$	$4,670 \pm 0,004$	$2,82 \pm 0,03$
Métakaolin	MK	$54,5 \pm 0,6$	$14,70 \pm 0,07$	$3,170 \pm 0,004$	$3,49 \pm 0,02$
Laitier de haut fourneau	GB	$54,4 \pm 0,6$	$14,50 \pm 0,07$	$2,580 \pm 0,005$	$3,57 \pm 0,02$

Les caractéristiques intrinsèques des matériaux retenus ont été évaluées en laboratoire en ce qui concerne la masse volumique absolue et apparente tassée. Ces valeurs sont présentées au Tableau 4.7. La masse volumique absolue est principalement utile pour l'estimation de la teneur en air des pâtes lors de l'étape de caractérisation des pâtes formulées à l'état frais en laboratoire.

Tableau 4.7 Caractéristiques intrinsèques des poudres mesurées en laboratoire

Nom du matériau	Étiquette	Masse volumique absolue (ρ_{abs}) [g/cm^3]	Masse volumique apparente tassée (ρ_{app}) [kg/m^3]
Chaux hydratée	CHX	$2,28 \pm 0,03$	$576,2 \pm 12,5$
Terre diatomée	WL	$2,01 \pm 0,06$	$345,4 \pm 4,5$
Métakaolin	MK	$2,07 \pm 0,05$	$629,3 \pm 11,0$
Laitier de haut fourneau	GB	$2,79 \pm 0,04$	$1272,8 \pm 20,7$

4.3.2 Caractérisation des formulations ternaires optimisées

Rappelons qu'il est connu par la littérature que l'ajout de métakaolin dans une pâte pouzzolanique de chaux ou de ciment affecte le réseau poreux en affinant les pores. Néanmoins, une des propriétés fondamentales dans la confection d'un béton végétal de chanvre c'est son potentiel hygroscopique laquelle est fortement tributaire de la porosité totale, mais également de la qualité du réseau poreux. Dans l'éventualité qu'un mélange pouzzolanique chaux-métakaolin affecte considérablement le caractère hygroscopique des bétons végétaux de chanvre, nous avons trouvé une combinaison ternaire à 2 pouzzolanes qui pourrait améliorer le réseau poreux en augmentant le volume capillaire des pores connectés en variant le ratio Si/Al initial. Le volume capillaire des pores connectés des pâtes sera évalué par le taux de carbonates présents à 28 jours de cure à l'aide de l'essai thermogravimétrique (TGA/DTG). Enfin, la série d'essais 3 sur les pâtes pouzzolaniques ternaires veut apporter des réponses à tous ces questionnements soulevés à la fois, dont également la consommation totale de la chaux libre.

Concrètement, pour cette 3^e série d'essais sur pâtes pouzzolaniques de chaux, nous avons défini trois mélanges pouzzolaniques ternaires en combinant suivant diverses proportions du métakaolin (MK), de la terre diatomée (WL) et du laitier de hauts fourneaux (GB). Plusieurs formulations de pâtes de chaux constituées avec le métakaolin et la terre diatomée ont été investiguées. Ces mélanges sont ici désignés : mélanges MW. Également, plusieurs formulations des pâtes de chaux avec métakaolin et laitier de haut fourneau ont été testées. Ces mélanges sont désignés : mélanges MG. Pour chacun des mélanges, les proportions optimisées des constituants ont été déterminées de manière à favoriser la formation de certains hydrates cibles tout en contrôlant la quantité de chaux libre consommée par la réaction mise en relief par l'équation (2.2).

En se rapportant toujours à l'équilibre stœchiométrique de l'équation (2.2), nous avons ajusté la quantité de chaux libre consommée par cette réaction en contrôlant le rapport Ca/Si restant après la consommation complète de la métakaolinite (AS₂) introduite. Enfin, pour chaque sous série de mélange favorisant une quantité fixe de chaux libre consommée par la métakaolinite, nous avons ajusté le ratio initial Si/Al en jouant sur les proportions des constituants des

mélanges ternaires de sorte à varier la cinétique des réactions chimiques et favoriser ainsi l'émergence de certains types d'hydrates. De manière plus spécifique les proportions établies pour chacun des mélanges visent : 1) limiter la formation de CSH supplémentaire (Ca/Si restant = 0), 2) favoriser la formation de CSH supplémentaire de type tobermorite ou marquée «T» ($\text{Ca/Si} = 0,83$) et, 3) favoriser la formation des CSH supplémentaire de type jennite ($\text{Ca/Si} = 2$; 4). Rappelons que la morphologie des CSH de type tobermorite est plutôt fibreuse, sous forme de toile, alors que celle des CSH de type jennite se présentent sous forme de plaquettes. Ces différences de morphologie, tributaire essentiellement au ratio Ca/Si , vont influencer à la fois la résistance et le réseau poreux, lequel gouverne la capacité hygroscopique de la pâte pouzzolanique de chaux hydratée. La pierre angulaire pour orienter et favoriser, du moins dans une perspective idéalisée, la production de certains types d'hydrates s'articule autour de la production de la métakaolinite (AS_2) dans le mélange. Suivant les équations stœchiométriques en lien avec la formation de CSH, CASH et CAH (équations (2.2) à (2.4)), les proportions des pâtes ternaires et testées ont ainsi été déterminées. Le détail des calculs est donné à l'Annexe I.

Notons que pour les pâtes de chaux des mélanges MW, un nombre plus important de formulations (17) ont été investiguées que pour les mélanges MG (8) car notamment le comportement réactionnel de mélanges MW repose essentiellement sur des réactions pouzzolaniques alors que pour les mélanges MG la présence du laitier de haut fourneau apporte une autre dimension en ce sens qu'il se comporte ultimement comme un liant hydraulique latent. Également, la terre diatomée amène un caractère poreux additionnel non négligeable à la pâte de par sa morphologie intrinsèque particulière. Une amélioration du caractère hygroscopique est alors particulièrement attendue pour les mélanges MW. Le Tableau 4.8 rappelle les étiquettes principales des matériaux et des mélanges ternaires MW et MG. Le Tableau 4.9 présente les proportions des huit formulations de type MG testées et le Tableau 4.10 présente les proportions des dix-sept formulations de type MW testées dans le cadre de cette 3^e série d'essais sur pâtes pouzzolaniques de chaux à 2 pouzzolanes.

Tableau 4.10 Nomenclature et composition des mélanges ternaires MW réalisés de chaux hydratée calcique (CHX)-métakaolin (MK)-terre diatomée (WL)

			Rapport Ca/Si restant après consommation de AS ₂			
			0,00	0,83	2,00	4,00
Rapport Si/Al	b	Matériaux	MW 0 - b	MW T ⁽¹⁾ - b	MW 2 – b	MW 4 – b
2,07	2,0	CHX	0,54 ⁽²⁾	0,60	0,66	0,73
		MK	0,46	0,40	0,34	0,27
		WL	0,00	0,00	0,00	0,00
		E/L	0,70	0,70	0,70	0,68
2,50	2,5	CHX	0,52	0,59	0,67	0,75
		MK	0,40	0,34	0,28	0,21
		WL	0,08	0,07	0,05	0,04
		E/L	0,73	0,73	0,75	0,73
3,00	3,0	CHX	0,49	0,58	0,67	0,76
		MK	0,35	0,29	0,23	0,17
		WL	0,16	0,13	0,10	0,07
		E/L	0,78	0,75	0,78	0,75
3,50	3,5	CHX	0,46	-	-	-
		MK	0,31	-	-	-
		WL	0,23	-	-	-
		E/L	0,84	-	-	-
4,00	4,0	CHX	0,43	0,57	0,68	0,79
		MK	0,28	0,21	0,15	0,10
		WL	0,29	0,22	0,16	0,11
		E/L	0,85	0,80	0,80	0,80

⁽¹⁾ T = La tobermorite est un type de CSH formé pour un ratio Ca/Si de 0,83 ou 5/6

⁽²⁾ Proportion massique

Suivant les formulations optimisées synthétisées au Tableau 4.9 et au Tableau 4.10, une 3^e série d'essais de caractérisation des pâtes fraîches et durcies a été réalisée dans le but de valider la similarité entre les différents types de mélange à l'état frais ainsi que répondre aux hypothèses concernant la consommation optimale de la chaux libre et le taux de carbonates présent.

4.3.2.1 Propriétés à l'état frais

Le Tableau 4.11 présente la variabilité des propriétés à l'état frais de trois pâtes de chaux avec doubles pouzzolanes. Les trois formulations testées ont été sélectionnées aléatoirement. Rappelons que la quantité d'eau de gâchage pour l'ensemble des formulations a été déterminée de façon incrémentale et visuellement satisfaisante pour remplir les moules sans difficulté. Il a été démontré par les résultats précédents que le rapport E/L n'est pas un facteur déterminant de la résistance en compression des pâtes pouzzolaniques de chaux. Nous voulions par ces essais à l'état frais valider notamment la consistance subjective que nous avons jugé satisfaisante parmi toutes les formulations lors des mises en moules. Un essai de chaque propriété par formulation sélectionnée aléatoirement a été réalisé pour valider leur différence.

Tableau 4.11 Résultats de caractérisation des pâtes fraîches de mélanges ternaires sélectionnés

			Mélanges ternaires étudiés		
			MW 0-3,5 ⁽¹⁾	MW 4-3	MG 4-3
Constituants	Chaux hydratée	CHX	0,46	0,76	0,61
	Métakaolin	MK	0,31	0,17	0,08
	Terre diatomée	WL	0,23	0,07	---
	Laitier de haut fourneau	GB	---	---	0,31
Dosage en eau	Rapport E/L		0,83	0,75	0,65
	Eau		Naturelle	Naturelle	Naturelle
Propriétés à l'état frais	Étalement (%)		92%	86%	112%
	Masse volumique (g/cm ³)		1,402	1,436	1,559
	Teneur en air (%)		1,49%	0,72%	0,45%
	Rétention d'eau (%)		80,7%	83,7%	82,6%
(1) les valeurs 0 et 3,5 représentent le ratio Ca/Si et Si/Al respectivement					

Les résultats du Tableau 4.11 montrent que les pâtes fraîches sélectionnées présentent une légère variabilité quant à leurs propriétés à l'état frais. Le caractère vitreux du laitier de haut fourneau dans la pâte de chaux du mélange de type MG lui confère un plus grand étalement parmi les pâtes testées, et ce, malgré un dosage en eau plus faible. Les autres paramètres soient

la masse volumique, la teneur en air et la rétention d'eau sont particulièrement semblables entre les trois pâtes de chaux testées. Rappelons que le dosage en eau requis pour la confection d'un béton végétal de chanvre est principalement gouverné par l'absorption des fibres végétales et partiellement gouverné par l'absorption d'eau du liant. Dès lors, la quantité finale d'eau qui sera incorporée au béton avec fibres végétales peut atteindre jusqu'à plus de deux fois la masse du liant sec.

4.3.2.2 Caractérisation à l'état durci des pâtes de chaux à deux pouzzolanes

La caractérisation physique à l'état durci des pâtes de chaux contenant deux pouzzolanes fait référence à la résistance à la compression et à la porosité. L'étude à partir de pâtes de chaux contenant deux pouzzolanes permet de vérifier l'importance du rapport Si/Al initial quant à la porosité et la résistance en compression des pâtes.

Mélanges ternaires MW - La Figure 4.17 présente la variation de la résistance en compression et leur porosité suivant le rapport Si/Al pour l'ensemble des mélanges de type MW (CHX+MK+WL). Exception faite des pâtes de chaux de la série des formulations MW 0-b qui présentent une compression optimale suivant le rapport Si/Al, les résultats montrent que la résistance en compression décroît systématiquement avec une plus petite proportion d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) dans la pâte pour les séries de formulation MW T - b; MW 2,0 - b et MW 4 - b. Les formulations optimisées visant une consommation totale de la chaux libre par la métakaolinite (AS_2), soit la 1^{ère} série des mélanges ternaires (MW 0 - b), présentent quant à elles des résultats différents (Figure 4.17). En effet, une plus grande résistance mécanique à la compression des pâtes MW 0 - b est observée lorsque le ratio Si/Al est compris entre 2,5 et 3,0 (MW 0 - 2,5 et MW 0 - 3,0). Ces résultats sont intéressants d'autant plus que leur rapport E/L respectif se trouve également plus élevé lorsque le ratio Si/Al augmente. Enfin, l'étude des types d'hydrates formés à différent ratio Si/Al peut nous permettre de mieux expliquer ces observations.

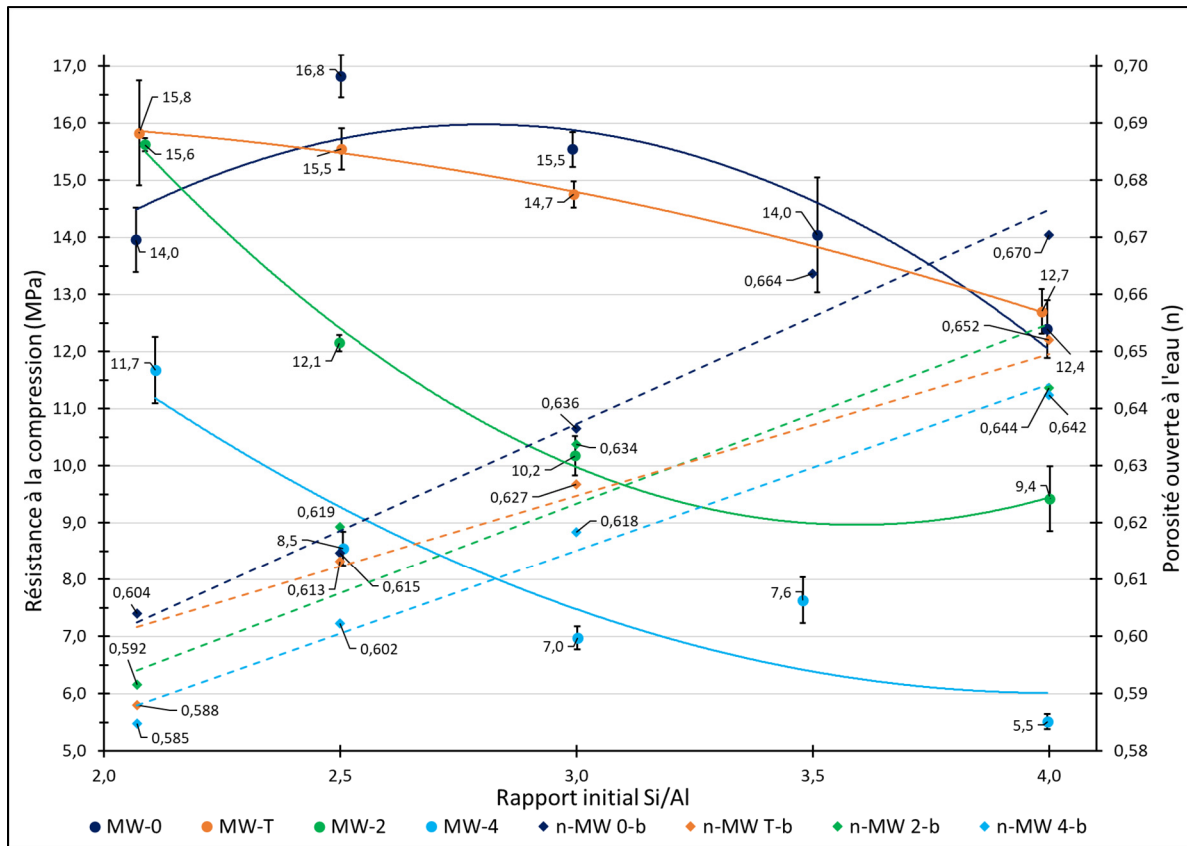


Figure 4.17 Résistance à la compression à 28 jours des formulations chaux-métakaolin-terre diatomée (MW) optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau

La Figure 4.18 présente la résistance en compression et mécaniques et la porosité ouverte à l'eau de la série de formulation optimisée des pâtes MW 0 – b. Exception faite du mélange MW 0 – 4,0, les résultats montrent que la résistance en compression pour tous les autres mélanges (MW 0 - 2,0; MW 0 – 2,5; MW 0 – 3,0; MW 0-3.5) est égale ou supérieure à 14,0 MPa. Prenant en compte la variation de la porosité ouverte accessible à l'eau de ces mélanges, on peut admettre que la résistance en compression des pâtes de formulations optimisées de la série MW-0 pour un ratio Si/Al initial partant de 2,0 à 3,5 est peu influencé par le rapport E/L dans le mélange. Une plus grande porosité de la pâte MW 0 – 3,5 lui confère malgré toute la même résistance mécanique à la compression que la pâte MW 0 – 2,0, soit 14,0 MPa. Une explication de ces résultats peut être reliée aux différents hydrates pouzzolaniques formés dans les pâtes de la série MW-0 en variant le ratio Si/Al initial.

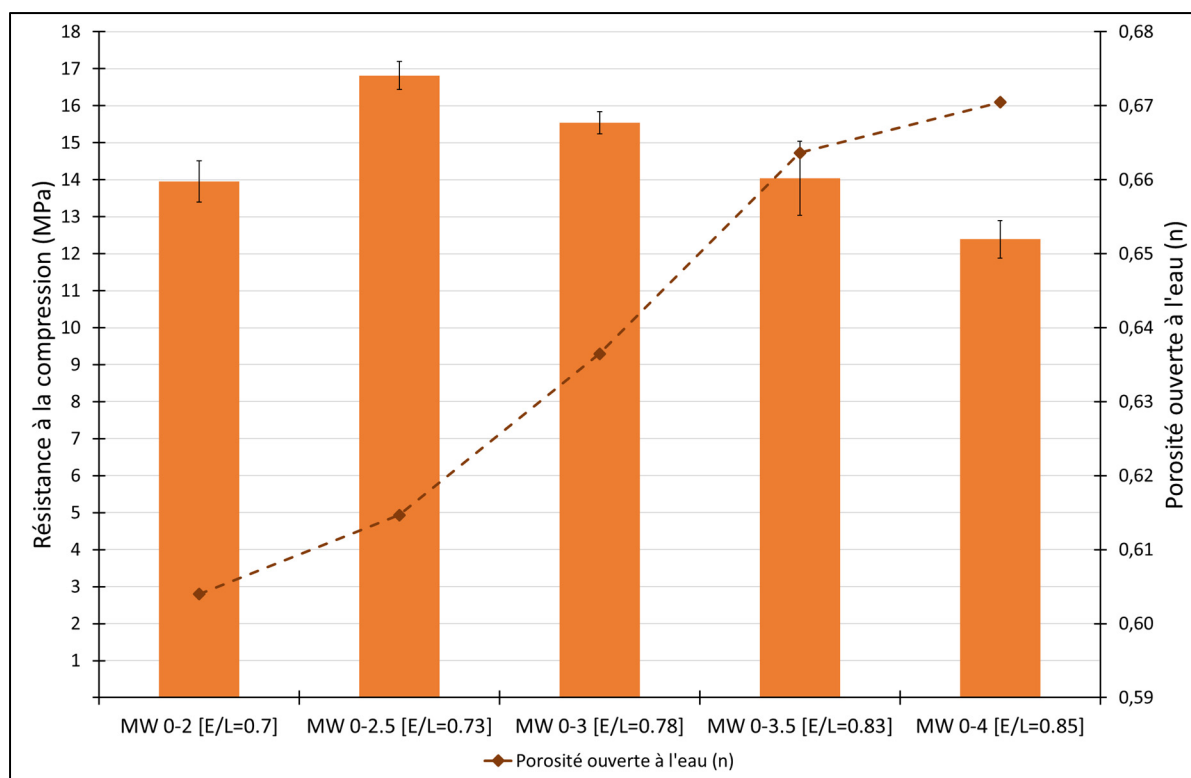


Figure 4.18 Résistance à la compression à 28 jours des formulations MW-0 optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau

Mélanges ternaires MG - La Figure 4.19 présente les résultats de résistance en compression et de porosité des pâtes de chaux confectionnées avec le métakaolin et le laitier de haut fourneau : mélanges ternaires de type MG. Les résultats de la résistance à la compression des pâtes montrent une variabilité significative sans suivre une tendance claire. Également, la résistance à la compression des pâtes semble être peu dépendante du ratio Si/Al initial. Par ailleurs, une augmentation du rapport E/L selon les proportions des pouzzolanes introduites n'entraîne pas forcément une diminution de la résistance en compression.

Les résultats de la Figure 4.19 montrent que les mélanges ternaires composés de métakaolin (MK) et de laitier de haut fourneau (GB) à un dosage massique équivalent $MK/GB = 1$ apportent une plus grande résistance en compression. En effet, la pâte de chaux MG 2 – 2,5, composé d'un total massique de 44% en pouzzolane, apporte la meilleure résistance en compression en plus de présenter une porosité ouverte à l'eau non négligeable. Xie et al. (2019) ont également trouvé que l'ajout de métakaolin et le laitier de haut fourneau dans une matrice de géopolymère présentaient ensemble une synergie chimique améliorant la résistance mécanique à la compression lorsque leur dosage massique de ces deux constituants était équivalent ($MK/GGBS = 1$) en comparant leurs résultats à un ciment Portland de référence.

Notons que le laitier de haut fourneau ne se comporte pas comme une pouzzolane pure, mais davantage comme un liant hydraulique. Le ratio Si/Al initial ne peut donc plus être utilisé comme seul paramètre dictant la cohésion finale de la pâte de chaux. Une gamme d'autres paramètres, plus exhaustive, doit être considérée lorsqu'il est question des mélanges ternaires incluant une matière hydraulique telle que le laitier de haut fourneau. Néanmoins, quelques mélanges ternaires de type MG seront conservés pour compléter à la variabilité des mesures lors de la confection des futurs bétons végétaux dans cette recherche.

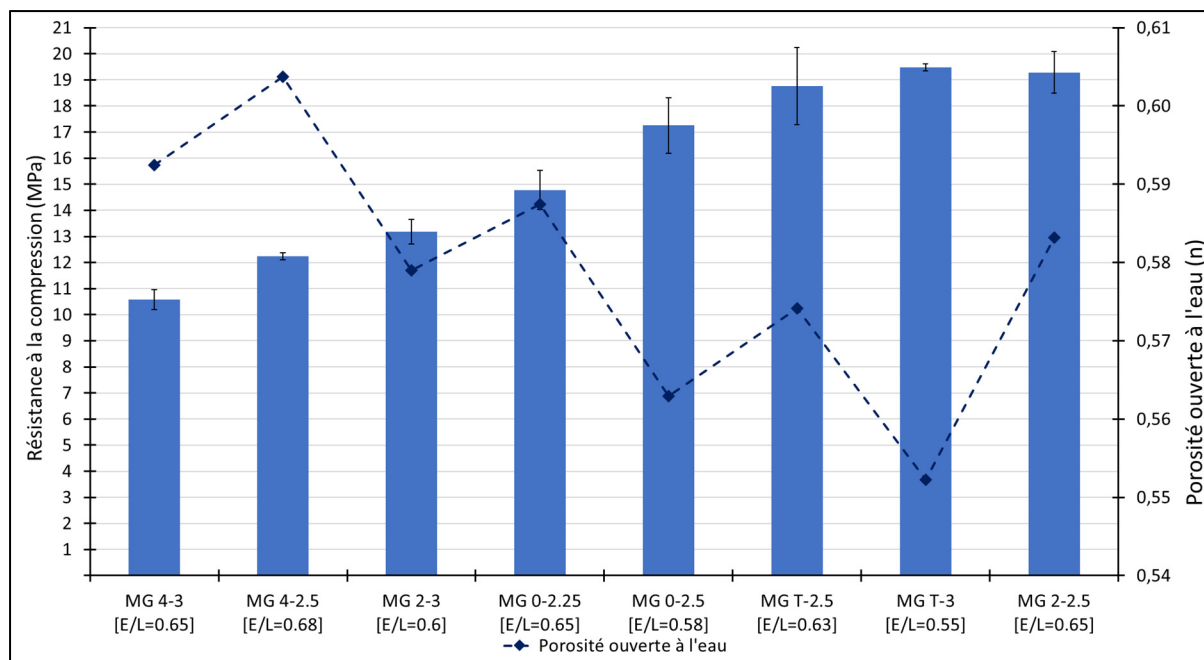


Figure 4.19 Résistance à la compression à 28 jours des formulations chaux-métakaolin-laitier de haut fourneau (MG) optimisée en relation avec leur porosité ouverte à l'eau

4.3.2.3 Influence de l'eau de trempage sur la résistance mécanique

Dans le cadre de la 2^e série sur pâtes pouzzolaniques de chaux incorporant le métakaolin (mélange binaire : CHX-MK), nous avons observé l'importance de l'alcalinité de l'eau quant à la réactivité mesurée au calorimètre isotherme. Nous avons convenu de vérifier l'impact de la qualité de l'eau sur la réponse en compression des pâtes de chaux confectionnée avec 2 pouzzolanes (mélanges ternaires). Pour ce faire, une quantité de chanvre suffisante a été saturée d'eau de chaux pendant une période de 24h pour retirer uniquement l'eau de chanvre saturée de chaux comme eau de gâchage tel que présenté à la Figure 4.20. Cet essai permet de soumettre les pâtes à un milieu réactionnel similaire aux bétons végétaux de chanvre pour mieux observer l'impact de l'eau biologique sur la réaction pouzzolanique. Les mélanges ternaires MW 0 – 3,0 (49% CHX; 35% MK; 16% WL; E/L = 0,78) et MG 0 – 2,3 (46% CHX; 39% MK; 15% GB; E/L = 0,65) ont été sélectionnés selon leur proportion similaire de leurs 3 constituants respectifs incorporés dans le mélange. Le rapport E/L respectif est demeuré inchangé pour les deux mélanges avec et sans eau de chanvre. Les spécimens ont suivi la même cure à température ambiante dans la salle humide. Les essais de compression ont été réalisés à

28 jours de cure suivie d'une analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) pour la complétion de l'analyse d'hydrates présents.

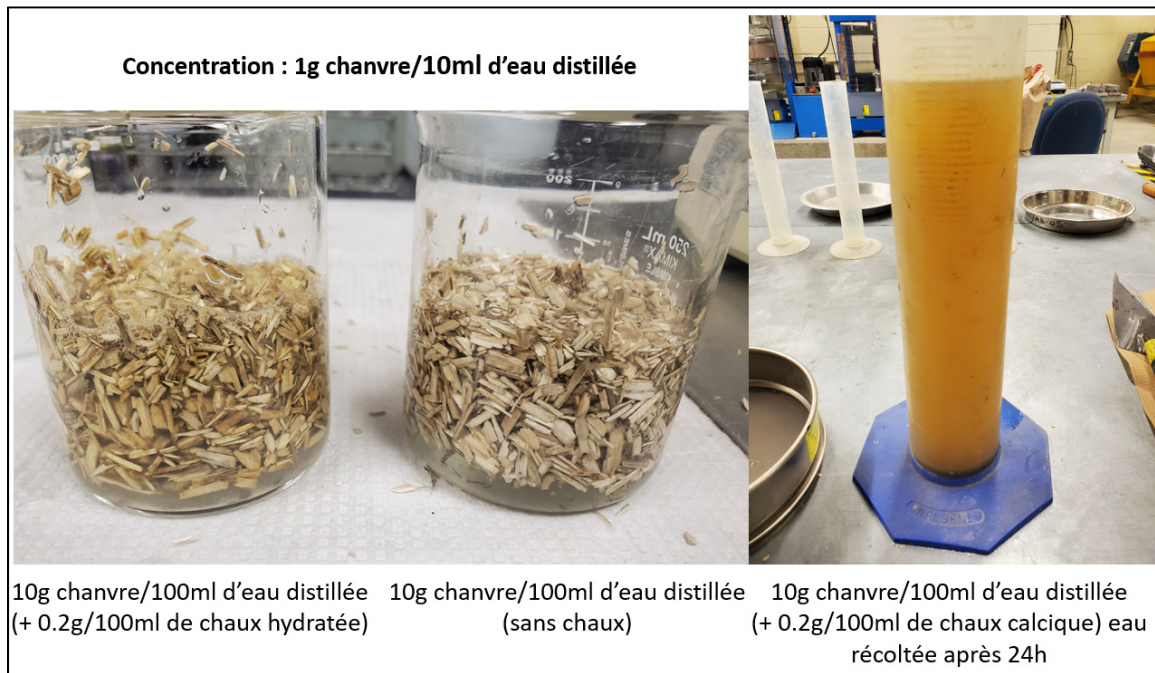


Figure 4.20 Récolte de l'eau de chanvre saturée de chaux hydratée calcique pendant 24h de trempage comme eau de gâchage pour la confection des pâtes pouzzolaniques MW-HW et MG-HW

La Figure 4.21 présente la résistance mécanique à la compression à 28 jours des pâtes durcies des mélanges ternaires avec et sans remplacement de l'eau de gâchage par l'eau de chanvre. Sur le graphique de la Figure 4.21, le résultat de la résistance à la compression est reporté au-dessus de l'histogramme respectif. Le pourcentage inscrit à droite de chaque résultat représente l'augmentation de la résistance notée des pâtes confectionnées avec l'eau de chanvre en comparaison avec leur pâte témoin respective confectionnée avec l'eau potable du laboratoire. D'après les résultats obtenus, les deux mélanges ternaires ayant comme pouzzolane principale le métakaolin (MK) présentent des résistances à la compression supérieures à leur référence respective, lorsque confectionnés avec l'eau de chanvre. Ces résultats corroborent avec les résultats obtenus au calorimètre isotherme pour une pâte contenant du métakaolin (MK) avec l'eau de chanvre. En effet, le dégagement de chaleur additionnel observé au calorimètre en présence de l'eau de chanvre lors du mélange binaire chaux-métakaolin s'associe probablement à la formation accentuée d'hydrates aux liens chimiques plus forts et renforçant

ainsi la matrice liante lors de la compression mécanique de la pâte durcie. Ainsi, une augmentation de la résistance mécanique à la compression a été soulevée pour les deux types de pâtes investiguées avec de l'eau de chanvre saturée en chaux comparativement à leur témoin avec l'eau potable du laboratoire.

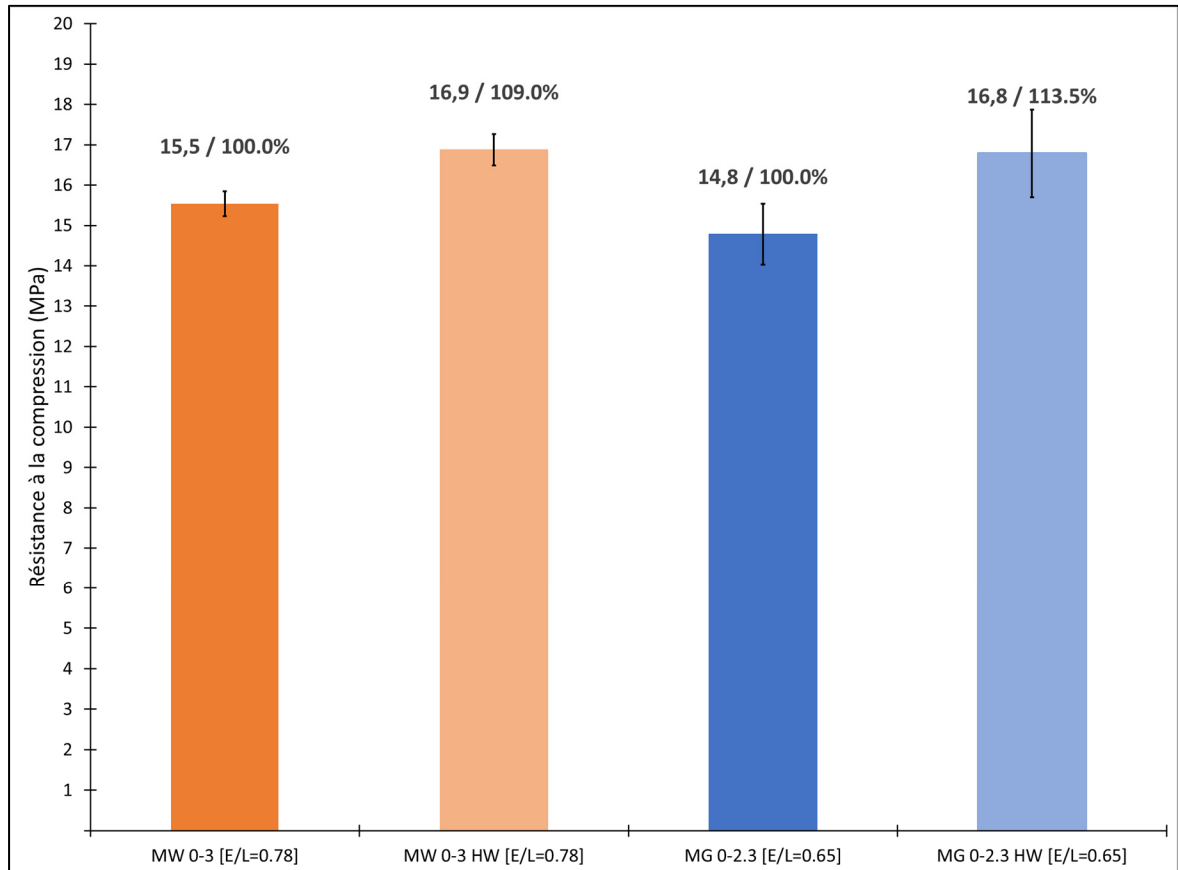


Figure 4.21 Résistance à la compression à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR des deux formulations optimisés MW/MW-HW et MG/MG-HW incluant les formulations optimisées avec le remplacement de l'eau de gâchage par l'eau de chanvre saturée de chaux (Hemp Water ou HW) pendant 24h

4.3.2.4 Analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) des mélanges avec l'eau de trempage (MW et MG)

La Figure 4.22 et la Figure 4.23 présentent les courbes TGA/DTG des mélanges ternaires MW 0-3 et MW 0-3 HW respectivement, il est possible de remarquer une légère modification dans les hydrates présents. Tout d'abord, on observe une légère augmentation en température du premier pic de déshydroxylation des CSH / C_2ASH_8 de l'ordre de $6^\circ C$ nous renseignant d'une plus grande formation de C_2ASH_8 que dans la pâte témoin : les hydrates de type C_2ASH_8 ayant une température plus élevée de décomposition, soit près de $160^\circ C$ plutôt que $110-120^\circ C$ pour les CSH (Morsy, 2005). Ensuite, on remarque entre la Figure 4.22 et la Figure 4.23 une plus grande présence d'hydrates de type C_2ASH_8 , C_4AH_{13} et des carboaluminates (Hc ou Mc) pour la pâte MW 0-3 HW que pour la pâte MW 0-3 observable par une augmentation du pic de décomposition près de $210^\circ C$ et entre $550^\circ C$ et $800^\circ C$, soit la température de décomposition typique pour ces hydrates (A. Gameiro et al., 2012). Enfin, la quantité de chaux libre restante calculée entre $400^\circ C$ et $500^\circ C$ se trouve quant à elle réduite dans le mélange ternaire MW 0-3 HW comparativement au témoin MW 0-3 nous indiquant une plus grande consommation de la chaux libre entre les deux mélanges.

Dans la même perspective, la Figure 4.24 et la Figure 4.25 présentent les courbes TGA/DTG pour les mélanges MG 0-2,3 et MG 0-2,3 HW respectivement. Les différences soulevées entre les mélanges ternaires MG 0-2,3 et MG 0-2,3 HW se trouvent sensiblement similaires aux différences enregistrées entre les mélanges ternaires précédentes, soit MW 0-3 et MW 0-3 HW. En effet, il est possible de remarquer l'apparition d'un nouveau pic sur la courbe DTG près de $210-220^\circ C$ dans le mélange ternaire MG 0-2,3 HW qui était absent originalement dans le mélange ternaire témoin MG 0-2,3 sans eau de chanvre. De plus, un plus grand pic entre $550^\circ C$ et $800^\circ C$ pour le mélange MG 0-2,3 HW par rapport au mélange témoin MG 0-2,3 nous renseigne sur une plus grande présence de carboaluminates (Hc ou Mc) dans la pâte MG 0-2,3 HW. Finalement, il semblerait que l'eau de chanvre impacte de la même nature les deux pâtes des mélanges ternaires de type MW et MG investigués précédemment lorsque le métakaolin (MK) est en grande proportion dans le mélange.

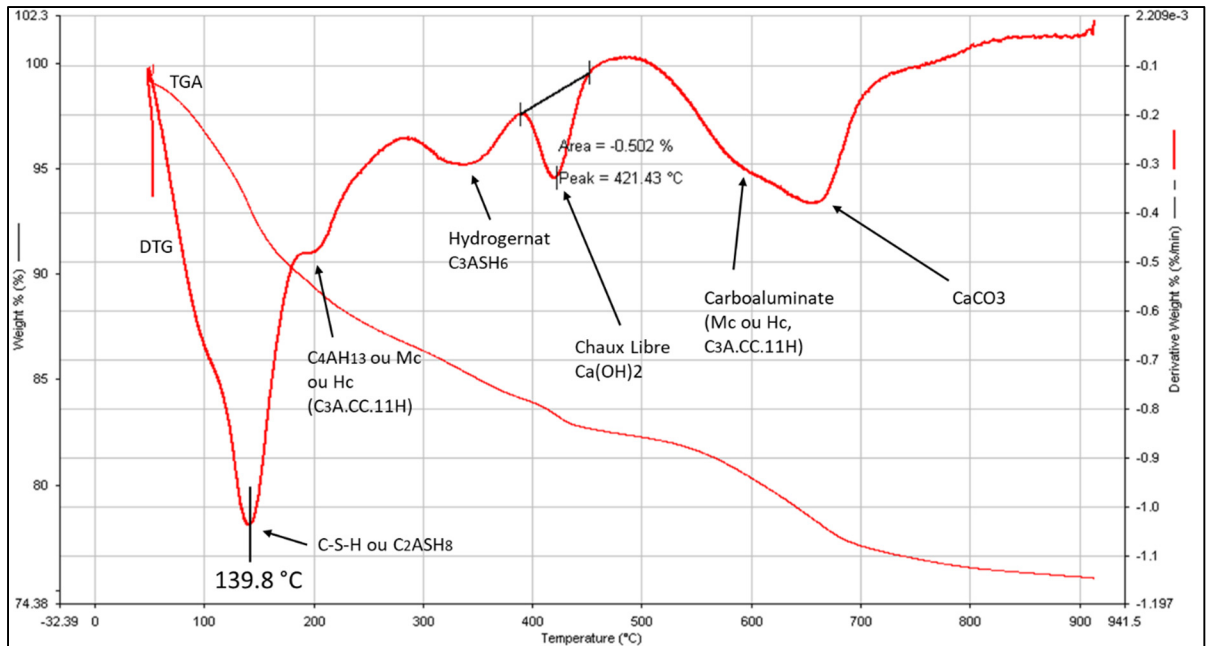


Figure 4.22 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

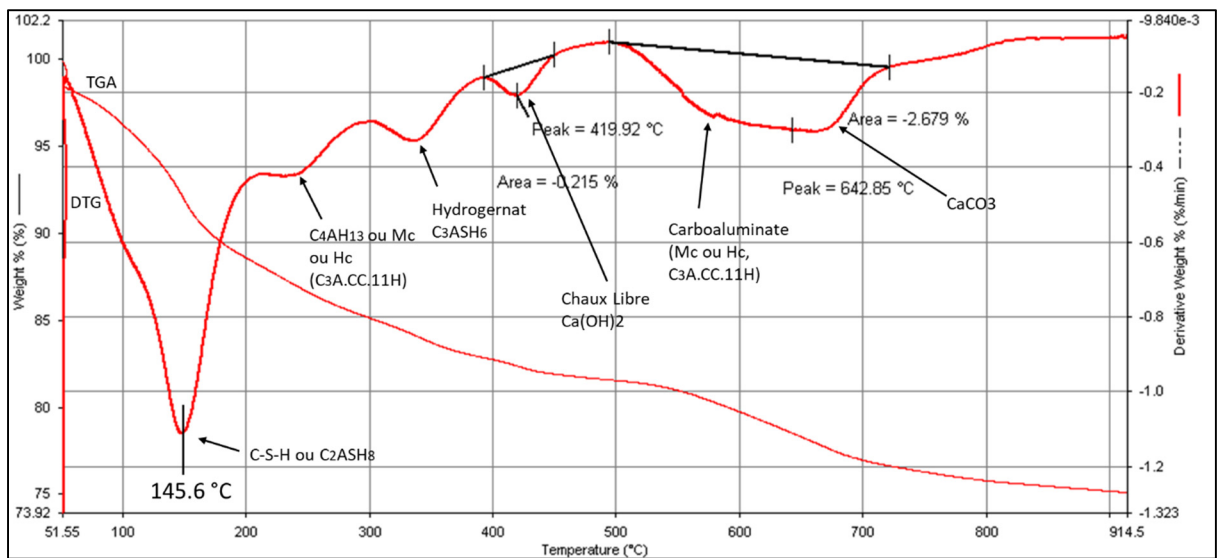


Figure 4.23 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 HW à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

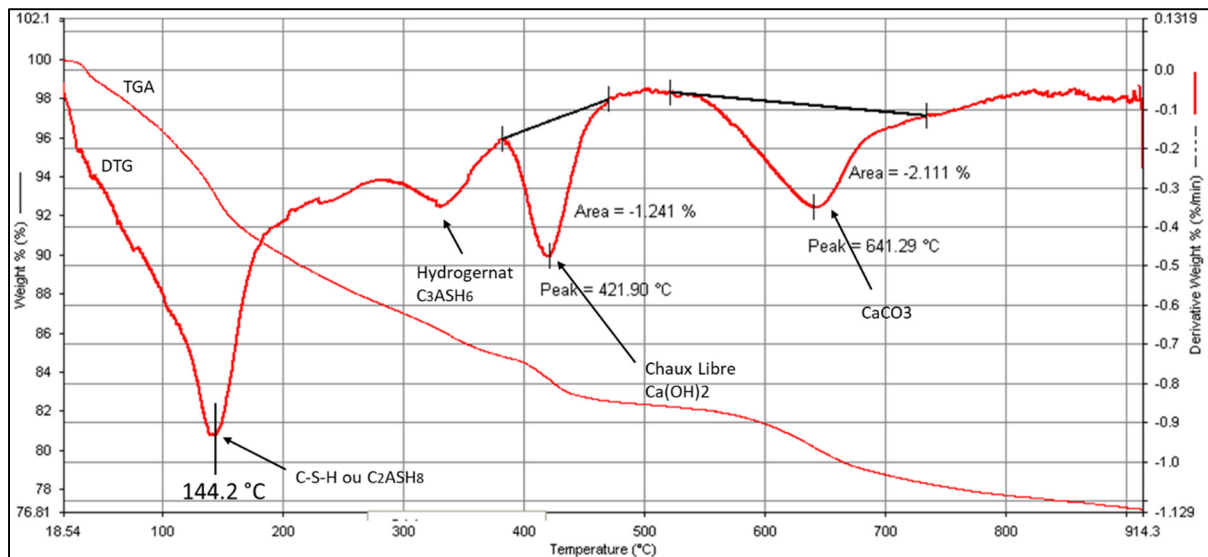


Figure 4.24 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MG 0-2,3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

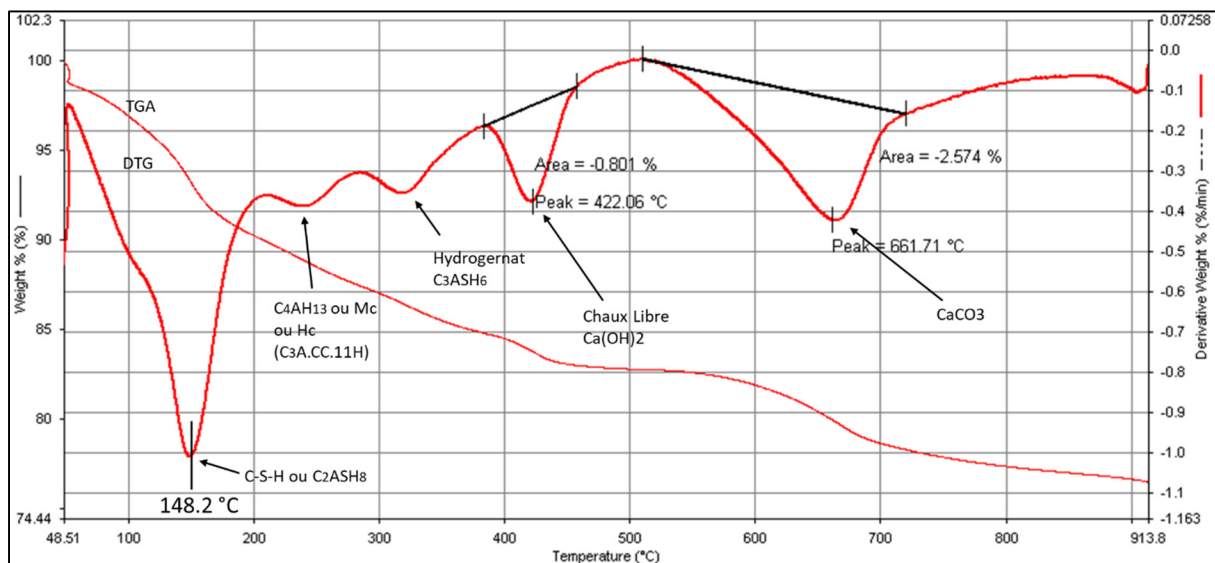


Figure 4.25 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MG 0-2,3 HW à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

4.3.2.5 Analyse de la consommation de la chaux libre pour les mélanges MW

Les Figure 4.26 à Figure 4.30 présentent les courbes TGA/DTG des cinq (5) mélanges de la série MW 0 – b consommant théoriquement toute la chaux libre présente en variant le rapport Si/Al entre 2,0 et 4,0. L'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) des pâtes durcies de la série des mélanges pouzzolaniques MW ont permis de valider l'hypothèse de la consommation complète ou partielle de la chaux libre par un mélange optimisé lorsque le rapport molaire massique AS_2/CH est fixe (équation (2.2)). De cette façon, un seul paramètre certain variait entre les mélanges et ce, pour le même rapport molaire massique AS_2/CH , soit le rapport Si/Al.

D'après la Figure 4.26 à la Figure 4.30, il est possible d'apercevoir une présence réduite de chaux libre non réagit décroissante lorsque le rapport Si/Al initial augmente de 2,0 à 4,0. L'explication du gain de résistance à la compression des mélanges MW 0-2,5 à MW 0-3,5 par rapport au mélange MW 0-2,0 peut s'expliquer l'apparition d'hydrates de type C_4AH_{13} se décomposant tout près de 210°C. Aucun pic de décomposition tout près de 210°C n'est présent pour les mélanges MW 0-2 et MW 0-4 laissant comprendre la possibilité que ces hydrates de type C_4AH_{13} présents dans la pâte MW 0-2,5; MW 0-3 et MW 0-3,5 favorisent donc une plus grande résistance mécanique à la compression de ces pâtes. Parmi l'ensemble des mélanges de la série MW 0 - b, l'hydrate de type hydrogarnet s'y retrouve. Cet hydrate le plus dense se décomposant à une température tout près de 310-330°C. Ces deux types d'hydrates (C_4AH_{13} et l'hydrogarnet) étaient particulièrement anticipés lorsque le rapport molaire massique AS_2/CH dans le mélange chaux-métakaolin se rapproche de 0,5 à 0,6 selon Murat (1983) (équations (2.2) et (2.3)).

La Figure 4.31 présente les positions approximatives des mélanges ternaires de la série MW 0 - b sur le diagramme des phases projetées par DeSilva (1992). On remarque que la série complète MW 0 – b se transite de façon linéaire pour un même rapport fixe $AS_2/CH = 0,5$. La seule variable de la série, soit le rapport initial Si/Al, provoque un déplacement linéaire des mélanges vers le haut lorsque le rapport Si/Al augmente. Ainsi, il est alors possible d'observer sur le diagramme de la Figure 4.31 un changement progressif de la zone de phases projetées entre les mélanges résultant à une formation différente d'hydrates entre ceux-ci. Cette différente projection d'hydrates entre les mélanges corrobore avec les courbes DTG étudiées.

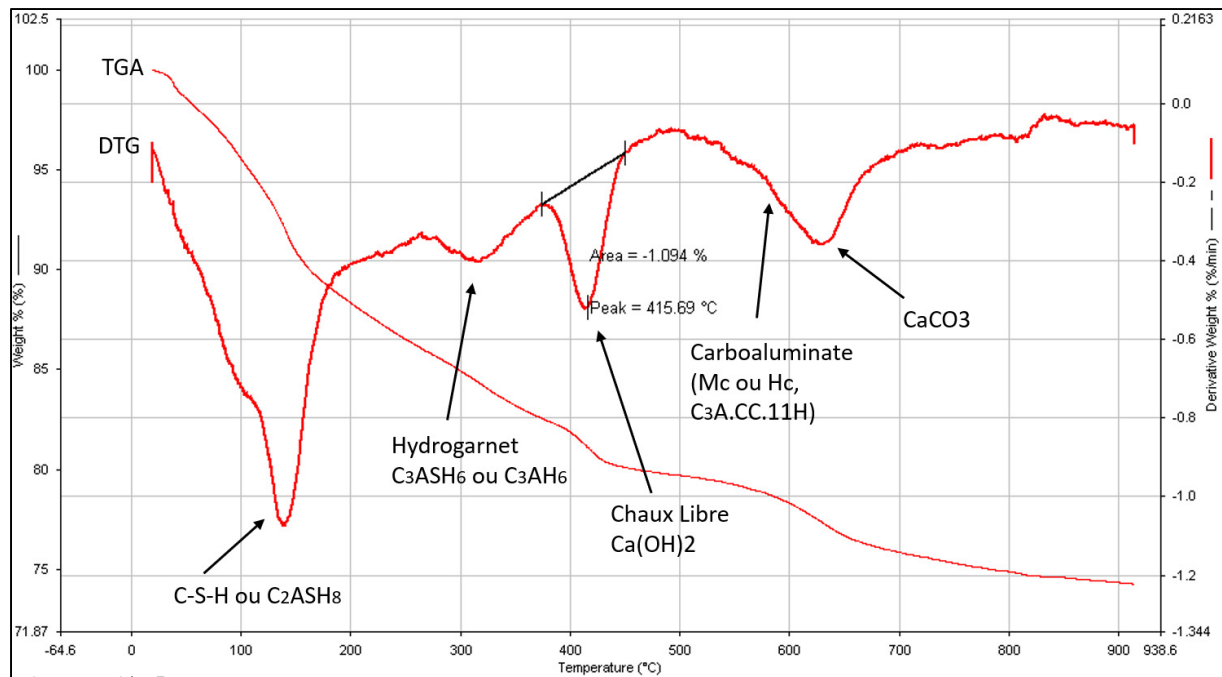


Figure 4.26 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-2,0 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

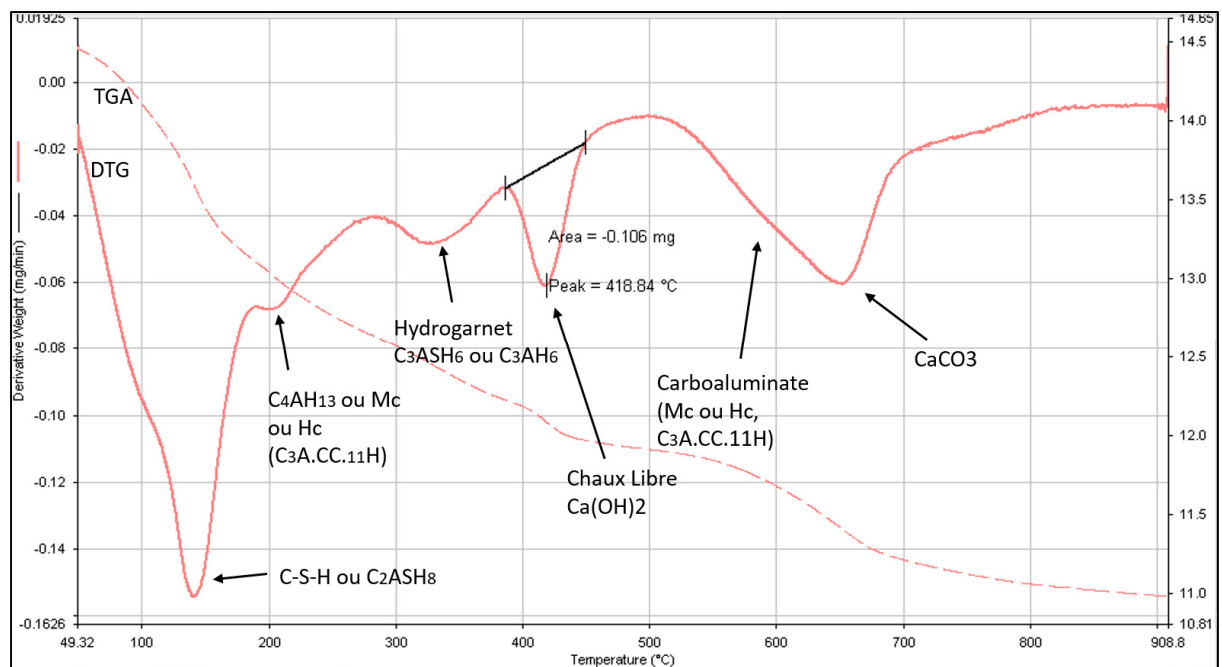


Figure 4.27 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-2,5 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

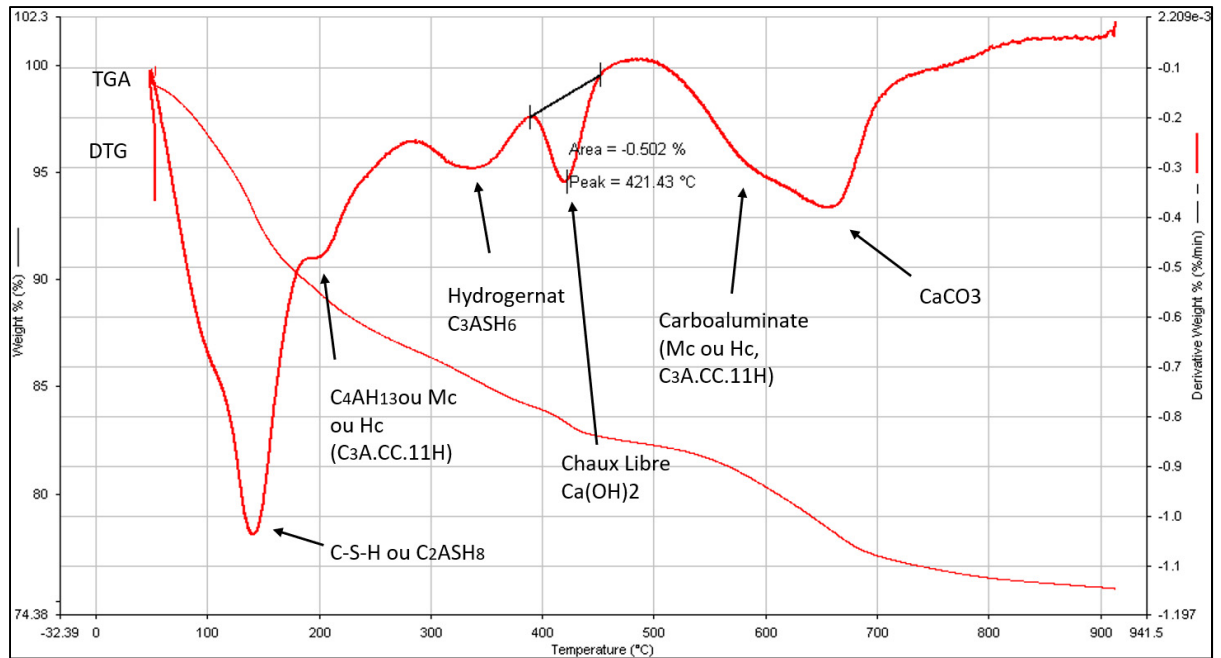


Figure 4.28 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

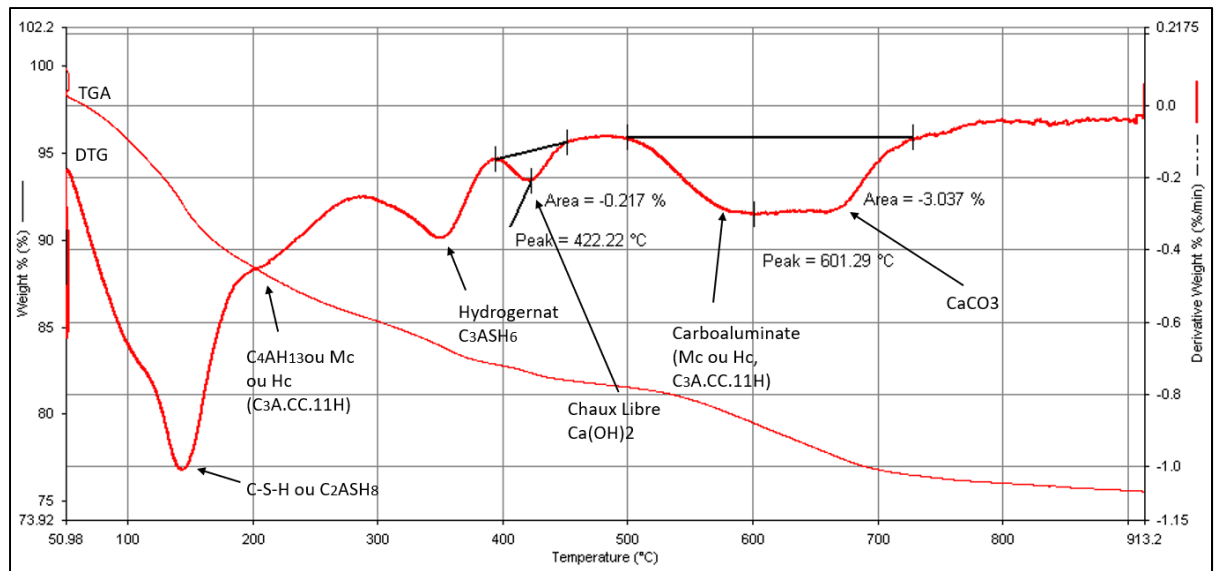


Figure 4.29 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-3,5 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

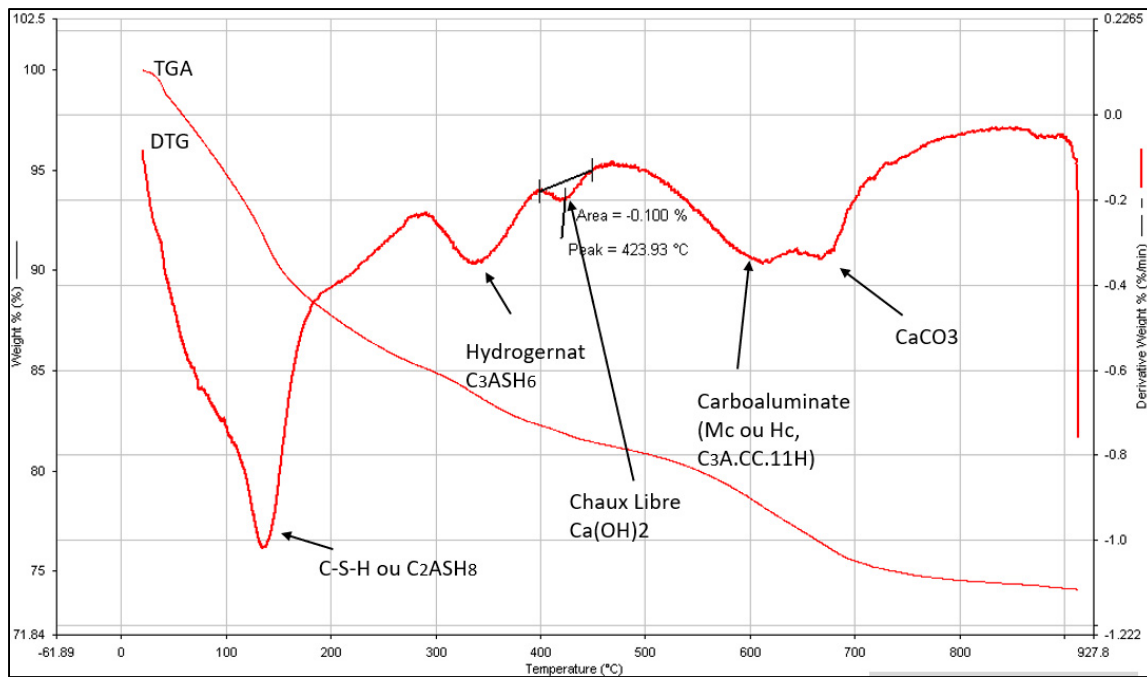


Figure 4.30 Analyse thermogravimétrique (TGA); de sa dérivée (DTG) et des hydrates présents du mélange pouzzolanique ternaire MW 0-4 à 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

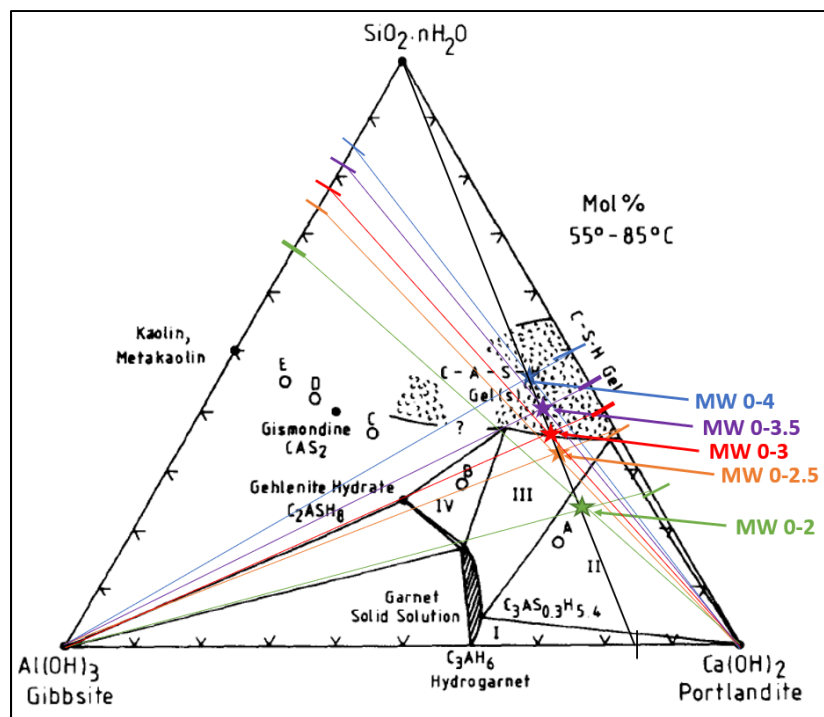


Figure 4.31 Positionnement des mélanges MW 0 – {2,0; 2,5; 3,0; 3,5 et 4,0} dans le diagramme ternaire massique CaO-Al₂O₃-SiO₂ de la projection des phases hydratées solides possible dans un mélange chaux-métakaolin à 55°C d'après DeSilva (1992)

Le Tableau 4.12 et le graphique de la Figure 4.32 présentent le pourcentage de la consommation de la chaux libre réelle (CH) par rapport à la quantité de chaux libre disponible. La détermination du pourcentage de la consommation de la chaux libre s'est réalisée par la méthode graphique en analysant les courbes DTG d'après l'aire sous le pic entre 400°C et 500°C représentant la quantité d'eau de la chaux libre restante dans la pâte au moment de l'essai. En déduisant la masse molaire totale de chaux libre encore présente dans la pâte par cette perte en eau, nous sommes en mesure de déduire la quantité de chaux libre consommée d'après la quantité initiale de chaux connue incorporée au mélange.

D'après les résultats de la série MW 0 – b présentés au Tableau 4.12, une erreur de prédiction pouvant atteindre 5% et moins est notée supportant donc les équations théoriques (2.2) et (2.3) présentées par Murat (1983) pour évaluer la consommation de la chaux libre (CH) par la métakaolinite présente (AS_2). Cette notion de comparaison satisfaisante entre les formules théoriques et les résultats pratiques obtenus supporte donc la poursuite de l'analyse des mélanges de la série MW 0 - b pour la confection de bétons végétaux de chanvre afin de limiter le taux de chaux libre non réagit au centre du matériau.

En guise de comparaison, nous avons inclus les mélanges des séries MW T – b et MW 2 – b prévoyant une consommation partielle de la chaux libre présente. Dû au fait que ces deux séries de mélange présente une consommation partielle de la chaux libre par AS_2 , un plus grand écart peut survenir à cause de la formation supplémentaire d'hydrate de type CSH qui n'était pas compris initialement dans le calcul théorique des équations (2.2) et (2.3).

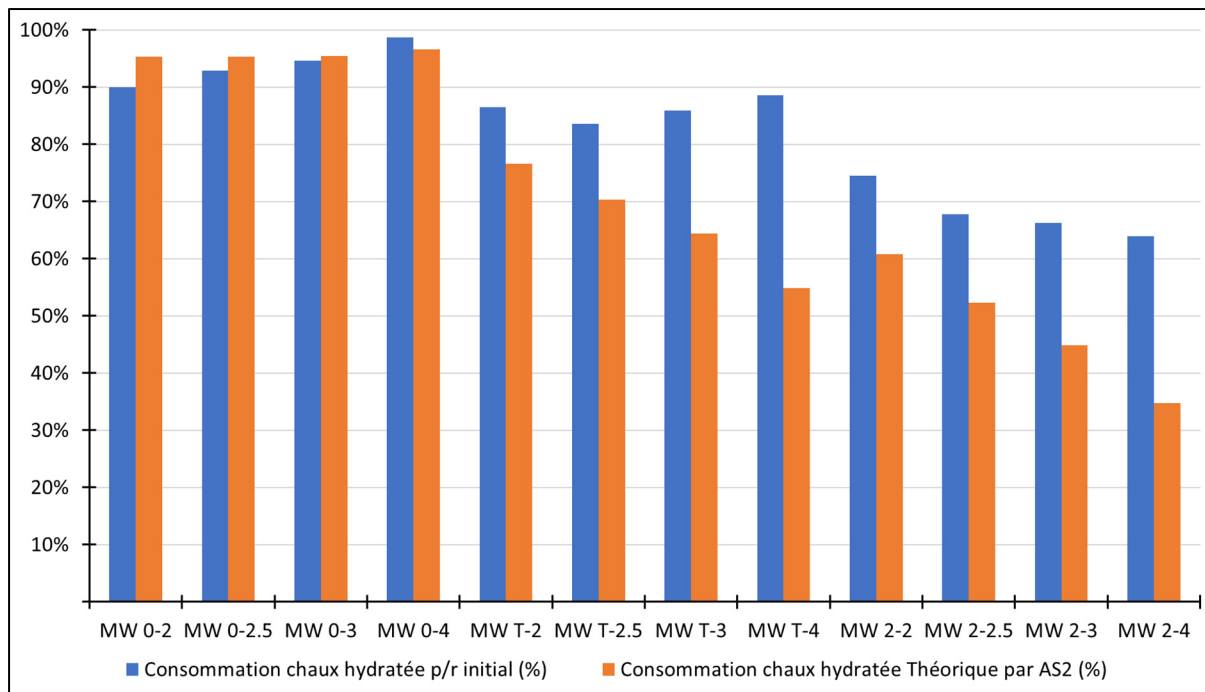


Figure 4.32 Validation graphique de la prédiction de la consommation de la chaux libre par la métakaolinite (AS_2) entre le calcul théorique (colonnes oranges) et les résultats expérimentaux (colonnes bleues) pour les mélanges MW 0 - b en comparaison aux mélanges MW T - b et MW 2 - b conservant une proportion résiduelle de chaux libre après 28 jours de cure à 21°C – 95%HR

Tableau 4.12 Validation de la consommation de la chaux libre dans les mélanges pouzzolaniques ternaires MW à 28 jours de cure à 21°C - 95%HR

Étiquette échantillon	Masse de l'échantillon (mg)	Aire perte de masse chaux hydratée (%)	Consommation chaux hydratée p/r initial (%)	Consommation chaux hydratée Théorique par AS2 (%)	Différence Consommation chaux (%)
MW 0-2 Témoin	14,41	10,97%	-		
MW 0-2	14,42	1,09%	90,03%	95,27%	5,24%
MW 0-2,5 Témoin	16,25	10,20%	-		
MW 0-2,5	14,59	0,73%	92,88%	95,28%	2,41%
MW 0-3 Témoin	14,49	9,37%	-		
MW 0-3	14,63	0,50%	94,64%	95,49%	0,85%
MW 0-4 Témoin	14,74	7,74%	-		
MW 0-4	11,90	0,10%	98,71%	96,56%	2,14%
MW T-2 Témoin	17,82	11,62%	-		
MW T-2	13,85	1,57%	86,50%	76,61%	9,89%
MW T-2,5 Témoin	15,32	11,84%	-		
MW T-2,5	13,19	1,95%	83,57%	70,34%	13,23%
MW T-3 Témoin	14,30	11,65%	-		
MW T-3	12,98	1,65%	85,86%	64,38%	21,48%
MW T-4 Témoin	11,93	11,79%	-		
MW T-4	12,96	1,35%	88,54%	54,80%	33,74%
MW 2-2 Témoin	17,60	12,32%	-		
MW 2-2	15,33	3,15%	74,46%	60,83%	13,64%
MW 2-2,5 Témoin	20,62	13,02%	-		
MW 2-2,5	15,42	4,19%	67,78%	52,35%	15,42%
MW 2-3 Témoin	16,30	13,78%	-		
MW 2-3	14,08	4,65%	66,28%	44,82%	21,47%
MW 2-4 Témoin	12,65	13,61%	-		
MW 2-4	15,57	4,92%	63,87%	34,74%	29,13%
MW 4-2 Témoin	14,63	14,78%	-		
MW 4-2	15,53	6,30%	57,42%	44,44%	12,98%
MW 4-2,5 Témoin	15,24	15,03%	-		
MW 4-2,5	17,09	8,09%	46,20%	36,39%	9,81%
MW 4-3 Témoin	16,17	15,44%	-		
MW 4-3	14,71	8,73%	43,45%	29,44%	14,01%
MW 4-4 Témoin	16,19	16,17%	-		
MW 4-4	12,62	9,13%	43,55%	21,33%	22,21%

4.3.2.6 Analyse du taux de carbonates présents pour les mélanges MW

Le Tableau 4.13 présente la synthèse des résultats du taux de carbonates présents dans les pâtes des mélanges MW au moment de l'essai suivant l'analyse des courbes DTG obtenues. Une teinte de couleur arbitraire pour faciliter la lecture des résultats du tableau synthèse a été attribuée pour chaque série de mélange. Les pâtes de chaque série qui présentent le plus haut taux de carbonates (mg/mg total) ont été attribuées la couleur plus foncée et les pâtes avec le plus bas taux de carbonates ont été attribuées la couleur la plus pâle. Le tout suivant l'ordre de teinte couleur selon le taux décroissant de carbonates présents : teinte foncée vers teinte pâle.

D'après les résultats présentés au Tableau 4.13, la présence de carbonates de type carboaluminate (hémicarboaluminate « Hc » ou moncarboaluminate « Mc ») se décomposant possiblement à 210°C ou entre 550°C et 800°C s'aperçoit grandissante pour l'ensemble des séries MW 0 – b; MW T – b et MW 2 – b dès lors que le ratio Si/Al initial augmente dans le mélange pour un rapport AS₂/CH fixe. En prenant en considération que la teneur en chaux hydratée incorporée dans les mélanges diminue en partant du mélange MW 0-2 (54% CHX) vers le mélange MW 0-4 (43% CHX) et qu'inversement une plus grande proportion de carbonates sont présents en augmentant le rapport Si/Al initial d'après le Tableau 4.13, un plus grand rapport Si/Al semble donc favoriser la fixation du CO₂ à l'intérieur de la matrice liante. Rappelons que la fixation du CO₂ se fait principalement par la chaux hydratée réagissant avec le CO₂ atmosphérique. Cette même tendance semble survenir pour toutes les séries de mélanges ternaires MW 0 - b, MW T - b et MW 2 - b. Cependant, la série de mélange MW 4 - b ne suit pas la même tendance que les trois autres séries. La série MW 4 – b qui possède une grande proportion de chaux hydratée incorporée initialement ne présente probablement pas une structure de pâte assez développée dans un environnement saturé d'humidité à plus de 95% HR pour permettre de fixer convenablement le CO₂ à l'intérieur de la matrice liante.

Cette observation supporte partiellement l'affirmation de notre hypothèse d'un volume capillaire des pores connectés plus grand lors des mélanges de pâtes de chaux ternaires à deux pouzzolanes. Ce constat soutient donc le choix de poursuivre selon cette approche la confection de bétons végétaux de chanvre selon ces formulations ternaires pour ainsi tester si ces observations se traduisent par une amélioration du caractère hygroscopique des bétons.

Tableau 4.13 Calcul de la masse de carbonates formée dans les mélanges pouzzolaniques ternaires MW à 28 jours de cure à 21°C - 95%HR

Étiquette échantillon	Pourcentage massique de chaux hydratée (CHX)	Masse de l'échantillon (mg)	Aire perte de masse carbonate (%)	Masse approx. carbonate présent (mg)	Masse carbonate présent (mg/mg tot)
MW 0-2	54%	14,42	1,92%	0,642	0,0445
MW 0-2,5	52%	14,59	2,86%	0,972	0,0666
MW 0-3	49%	14,63	3,37%	1,147	0,0784
MW 0-4	43%	11,90	3,32%	0,918	0,0771
MW T-2	60%	13,85	1,19%	0,383	0,0276
MW T-2,5	59%	13,19	1,48%	0,454	0,0344
MW T-3	58%	12,98	1,95%	0,590	0,0454
MW T-4	57%	12,96	2,64%	0,795	0,0613
MW 2-2	66%	15,33	0,52%	0,187	0,0122
MW 2-2,5	67%	15,42	0,61%	0,217	0,0141
MW 2-3	67%	14,08	0,81%	0,264	0,0187
MW 2-4	68%	15,57	1,32%	0,477	0,0306
MW 4-2	73%	15,53	0,51%	0,184	0,0118
MW 4-2,5	75%	17,09	0,19%	0,076	0,0044
MW 4-3	76%	14,71	0,28%	0,096	0,0065
MW 4-4	79%	12,62	0,87%	0,256	0,0203

4.3.3 Bilan suivant la SÉRIE 3

Cette série 3 avait pour objectif de présenter la validation expérimentale d'une formulation théorique optimisée ternaire composée d'une pouzzolane réactive et moins réactive. Pour ce faire, plusieurs séries de mélanges ternaires composés de deux pouzzolanes et de chaux hydratée calcique ont été réalisées. La première série MW composée de chaux hydratée calcique (CHX)-Métakaolin (MK)-Terre diatomée WL a été étudiée de façon approfondie. La seconde série MG composée de chaux hydratée calcique (CHX)-Métakaolin (MK)-Laitier de haut fourneau (GB) a été étudiée sommairement pour compléter aux analyses des bétons végétaux de chanvre. L'essai de compression et l'analyse thermogravimétrique (TGA/DTG) d'un mélange ternaire de chacune des séries MW et MG au pourcentage massique similaire en métakaolin (MK) avec de l'eau de chanvre saturée de chaux comme eau de gâchage ont permis de valider les explications proposées au bilan de la série 1 et 2 en ce qui concerne la plus grande chaleur dégagée totale par gramme de liant mesuré au calorimètre isotherme lors d'un mélange pouzzolanique binaire chaux-métakaolin (MK) confectionnée avec l'eau de trempage biologique.

Les résultats présentés dans cette présente série confirment les hypothèses formulées en vue de faire la confection des bétons végétaux de chanvre. En effet, le développement de la formulation de la série des mélanges ternaires optimisés MW 0 - b s'inspirait de la stœchiométrie chimique pouzzolanique tirée de la littérature pour optimiser la consommation de la chaux libre (CH) par la métakaolinite (AS_2). L'ensemble des formulations de la série MW 0 - b s'approchait au 28^e jour de cure de la consommation théorique établie de la chaux libre avec un écart d'environ 5% ou moins entre l'équation théorique et les données réelles.

La seconde hypothèse concernant l'augmentation du volume capillaire des pores connectés par l'ajout d'une pouzzolane secondaire moins réactive que la pouzzolane primaire, soit le métakaolin (MK), en variant le rapport Si/Al initial dans le mélange, a permis de confirmer partiellement l'hypothèse proposée. En effet, l'analyse thermogravimétrique des pâtes purement pouzzolaniques des séries MW-0; MW-T et MW-2 a permis d'apercevoir une plus grande proportion de carbonates présents lorsque le rapport Si/Al initial augmentait de 2,0 à 4,0. Rappelons que la proportion de chaux hydratée calcique incorporée dans le mélange est

inversement proportionnelle au rapport Si/Al pour une même consommation de chaux libre théorique par la métakaolinite (AS₂). En considérant un environnement saturé en humidité dans une salle humide à plus de 95%HR où les conditions sont défavorables au phénomène de carbonatation des hydrates par le CO₂ atmosphérique, une pâte pouzzolanique structurée avec un rapport molaire massique Si/Al initial plus élevé semble accommoder une captation du CO₂ atmosphérique légèrement plus importante pour les mélanges pouzzolaniques ternaires testés composés notamment d'une pouzzolane réactive et moins réactive. Ces résultats corroborent donc avec l'hypothèse de Bharadwaj et al. (2021) proposant une augmentation des volumes capillaires des pores connectés lorsqu'un matériau réactif est remplacé en partie par un matériau moins réactif dans une pâte hydraulique ou dans ce cas-ci pouzzolanique.

Finalement, les mélanges ternaires optimisés de la série métakaolin-terre diatomée-chaux hydratée calcique (MW), soit la série MW 0 - b ont été retenus pour la confection des éprouvettes de bétons végétaux de chanvre, ainsi que plusieurs autres mélanges comparatifs, notamment quelques mélanges de la série MW 4 – b, les mélanges ternaires optimisés de la série métakaolin-laitier de haut fourneau-chaux hydratée calcique (MG) : MG 0 - b, MG 2 - b, MG 4 – b, et le dernier étant un mélange composé d'un liant de chaux hydraulique naturelle pure (NHL), soit de 100% de NHL comme témoin aux résultats.

CHAPITRE 5

Caractérisation des bétons végétaux de chanvre

Ce chapitre présente les résultats de caractérisation des bétons végétaux de chanvre formulés avec les liants pouzzolaniques à deux pouzzolanes (ternaire) et d'autres à une pouzzolane (binaire) tirés de la série 3 du chapitre 4. Les résultats présentés comprennent la caractérisation physique de la matière végétale ainsi que la caractérisation des différentes formulations de bétons végétaux de chanvre sélectionnées au niveau mécanique, hydrique (liquide et vapeur d'eau), thermique et acoustique. Les résultats au niveau mécanique et hydrique (liquide et vapeur d'eau) sont comparés à la formulation témoin, soit un béton végétal de chanvre dont le liant est composé uniquement par la chaux hydraulique naturelle (NHL).

5.0 Caractérisation de la matière première végétale

La caractérisation des matières végétales est primordiale pour la confection des bétons végétaux. La faible masse volumique apparente tassée des particules de chanvre sera à l'origine de la légèreté du matériau composite final. Le Tableau 5.1 présente quelques caractéristiques intrinsèques de la chènevotte utilisée pour la confection des bétons végétaux. La masse volumique absolue obtenue au pycnomètre à l'hélium de la chènevotte permet de déduire le pourcentage de vide total inoccupé par la matière brute de la chènevotte tassée dans un volume donné, soit dans notre cas de 90,63%. Cette valeur diminuera inévitablement lors de l'incorporation du liant minéral et après la compaction. La matière végétale reçue possède une teneur en eau initiale de l'ordre de 8,24% avant le séchage des particules à 80°C pendant 48h.

Tableau 5.1 Caractéristiques intrinsèques de la chènevotte reçue mesurées au laboratoire

	Valeur mesurée	Écart-type
Masse volumique apparente tassée	125,2 kg/m ³ (0,125 g/cm ³)	± 2,9 kg/m ³
Masse volumique absolue	1,336 g/cm ³ (Volume moyen de 7,03 cm ³)	± 0,206%
Pourcentage de vide total pour un volume de chènevotte tassé donné	$\frac{(1,336 - 0,125)}{1,336} = 90,63\%$	-
Teneur en eau initiale (%massique)	8,24% (48h – 80°C)	-

La Figure 5.1 présente la courbe granulométrique de la chènevotte reçue après séchage à l'étuve à 80°C pendant 48h. La forme parallélépipède des particules de chènevotte ne permet pas de mesurer la longueur des particules à l'aide du tamisage mécanique. Il est cependant possible de caractériser la distribution de la largeur des particules par l'entremise de cette méthode. D'après l'analyse granulométrique par tamisage mécanique réalisée, la dimension de la largeur des particules de chanvre s'échelonne majoritairement entre 1,0 mm et 5,0 mm de largeur.

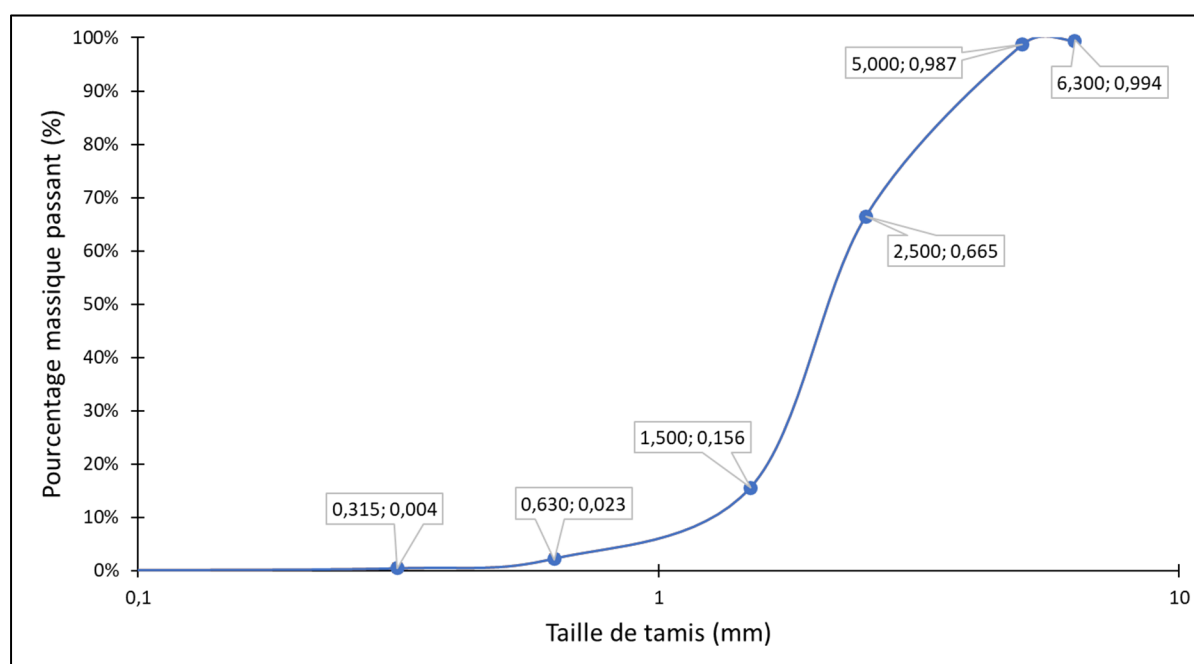


Figure 5.1 Courbe granulométrique par tamisage mécanique de la chènevotte (distribution massique selon la largeur des particules)

La Figure 5.2 présente le taux d'absorption d'eau en pourcentage massique sur 48 heures de la chènevotte pour des échantillons de 50 grammes. Il est possible d'observer une importante absorption d'eau dès les premières minutes suivant l'immersion des particules. Selon les données recueillies, l'absorption d'eau de la chènevotte atteint un niveau d'environ 300% de son poids sec suivant la première minute d'immersion. La variation massique notée se stabilise à partir d'environ 5 min d'immersion à environ 350% de son poids en eau jusqu'à atteindre progressivement et lentement 520% de son poids en eau après 48 heures d'immersion. Ces valeurs d'absorption sont plus élevées que lors des travaux de recherche réalisés par Cérézo (2005), Nguyen (2010) et Nozahic (2012) où leur valeur d'absorption s'étalait plutôt de 200%

dans la première minute jusqu'à 400% suivant 48 heures d'immersion. Cette différence notable apporte quelque questionnement sur la nature de la méthode d'essai de trempage des particules de chènevotte. Il est possible que l'agglomérat de chènevotte entre les tamis suivant le trempage trappe l'eau entre les particules même après leur égouttement augmentant la notion d'absorption d'eau. Néanmoins, la grande absorption d'eau des particules se stabilise à partir des 5 premières minutes d'immersion. Cette valeur est cohérente avec les autres travaux de recherche réalisés par Cérézo (2005), Nguyen (2010) et Nozahic (2012). Ce temps d'immersion critique de 5 min nous renseigne sur le délai à favoriser lors de l'étape de prémouillage des particules. Suivant les 5 premières minutes d'immersion, les particules atteindront la majeure partie de leur absorption d'eau. À l'étape suivante, lors de l'incorporation du liant sec, la chènevotte mouillée agira tel un réservoir d'eau au liant diminuant également l'absorption du liant à l'intérieur des capillaires de la chènevotte (Nozahic, 2012). À l'inverse, dans le cas que la chènevotte sèche soit incorporée à un liant saturé d'eau, une migration importante des particules de liant vers les capillaires de la chènevotte par l'entremise de l'eau absorbée entraînera une diminution de la porosité capillaire. Cela augmentera donc en partie la masse volumique finale du matériau ainsi que sa conductivité thermique à l'état sec. Enfin, pour cette raison, l'étape de prémouillage de la chènevotte est estimée à 5 min.

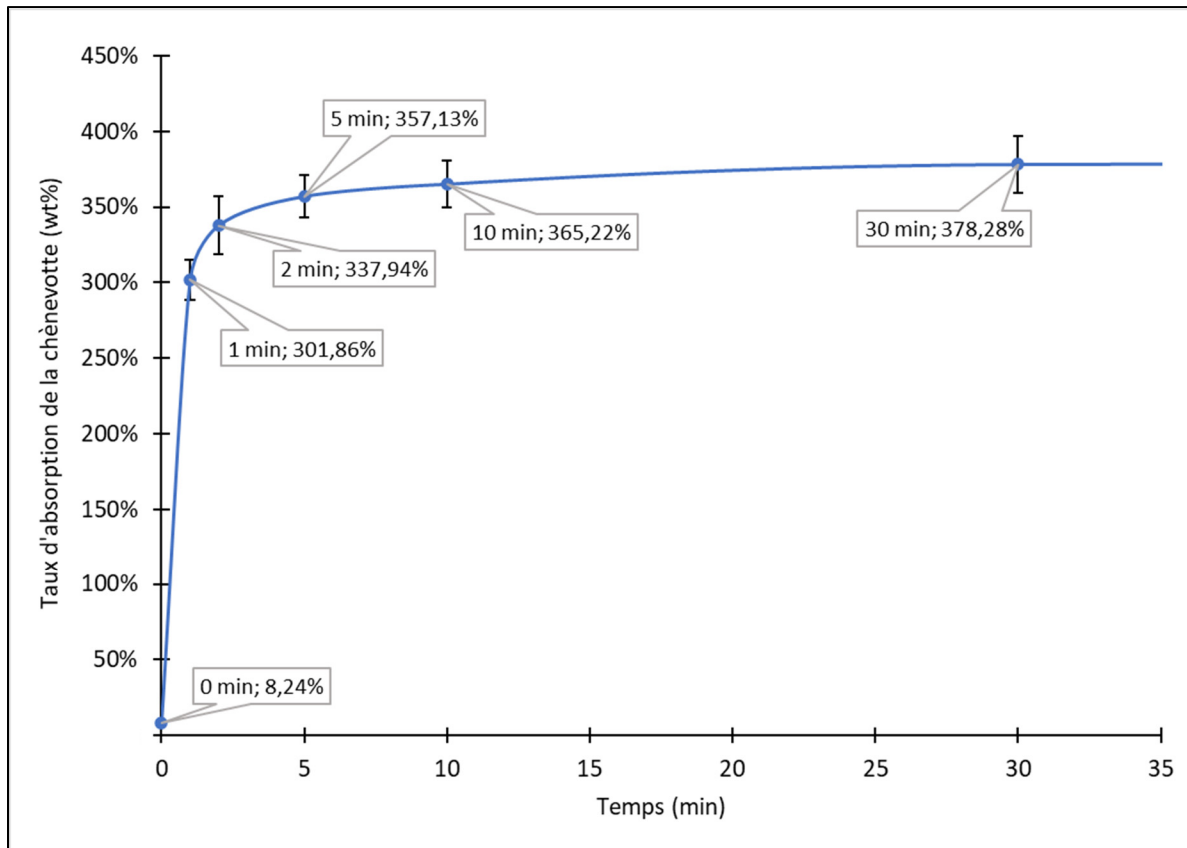


Figure 5.2 Taux d'absorption d'eau (masse %) sur une période submergée de 48h de la chènevotte reçue (50g)

5.1 Module d'élasticité dynamique et résistance mécanique à la compression des prismes rectangulaires

L'eau liquide dans le mélange est une composante principale de la cohésion physique des bétons végétaux à l'état frais. Après saturation des particules végétales dans le mélange, l'eau en excès sature le liant initialement en poudre où sa viscosité dépendra grandement de la quantité d'eau présente. La chaux hydratée, une fois saturée, peut prendre l'apparence d'une pâte très visqueuse jusqu'à un état davantage liquide s'il y a excès d'eau. La cohésion des particules végétales en dépendra fortement. Une quantité suffisante d'eau pour dissoudre la chaux et saturer les particules végétales est alors à privilégier. Cette quantité d'eau varie généralement selon la masse de chènevotte sèche introduite selon la quantité de liant. La quantité d'eau dans les prismes rectangulaires confectionnés varie entre 2,5 à 3,0 fois la masse de chènevotte dépendamment de la formulation et l'absorption en eau du liant sec. Les mélanges contenant davantage de métakaolin et de terre diatomée par exemple devaient

recevoir une plus grande quantité d'eau pour obtenir une même cohésion initiale des particules végétales. Cette quantité d'eau a été ajustée lors du malaxage selon une appréciation générale des mélanges. La masse de liant sec a toutefois demeurée constante pour toutes les formulations de prismes rectangulaires, soit de 2 fois la masse de chènevotte sèche introduite.

La Figure 5.3 et Figure 5.4 présentent les courbes de séchage des formulations. Ces courbes de séchage suivent relativement la même variation massique au travers du temps de l'ordre de 19 à 25% de perte de masse sur les 7 premiers jours suivant le démoulage sauf pour le mélange de référence composé de chaux hydraulique naturelle. Cérézo (2005) a soulevé par exemple que le ciment Portland utilisé comme liant avec des particules de chènevotte ralentissait grandement la phase de séchage. L'auteure mentionne que la quantité d'eau en excès dans le mélange nécessaire pour hydrater le liant demeure en surplus par rapport à la demande en eau du ciment Portland. La chènevotte n'agit donc plus comme des réservoirs d'eau pour le liant et le séchage se trouve fortement ralenti. La prise du liant a donc été lente et l'intérieur des éprouvettes est resté humide même après 1 an et demi de conservation à 20°C et 50% HR. La chaux hydraulique naturelle se comporte également comme un ciment de faible résistance, il a été remarqué que le séchage s'est avéré ralenti par rapport aux autres mélanges composés de chaux hydratée et de pouzzolanes avec une variation massique sur les 7 premiers jours de l'ordre de 13% seulement.

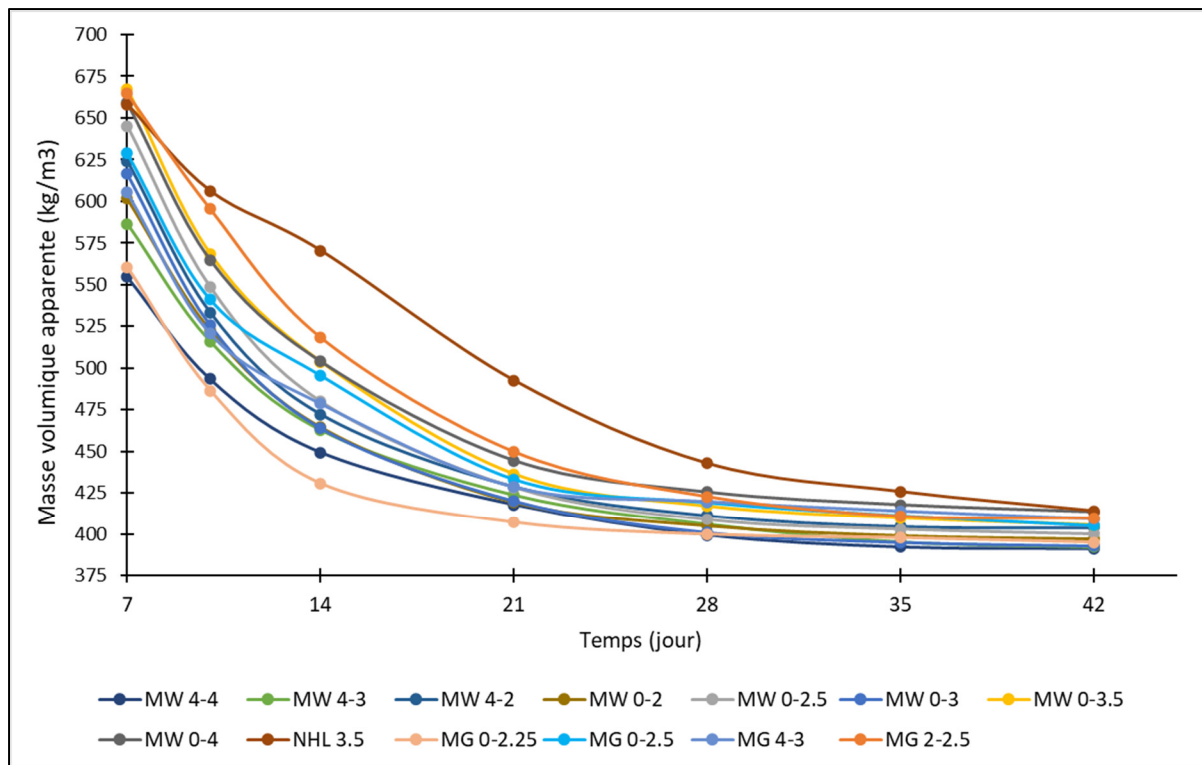


Figure 5.3 Courbe de du changement de la masse volumique durant le séchage après démoulage à 7 jours de cure jusqu'au 42^e jour par formulation

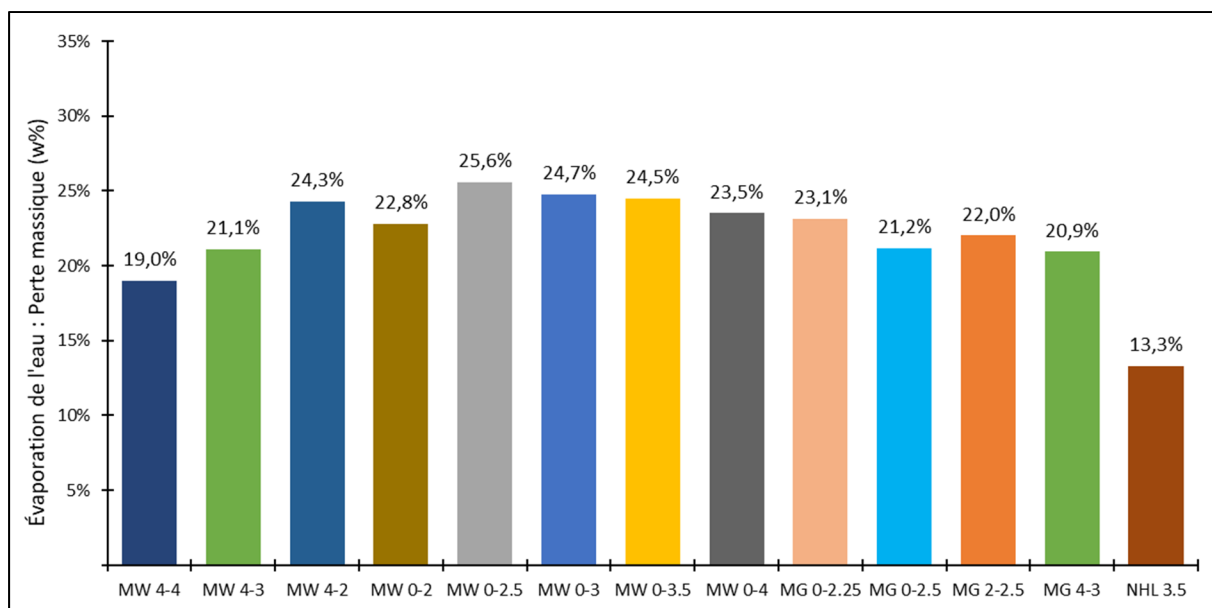


Figure 5.4 Pourcentage relatif de perte en eau massique suivant le démoulage entre le 7^e et le 14^e jour de cure par formulation à 20°C – 60%HR ± 10%

La Figure 5.5 et la Figure 5.6 présentent la montée en module élastique dynamique (E) des formulations jusqu'à 42 jours de cure. On remarque que certaines formulations augmentent en module dynamique élastique plus rapidement au cours du temps que d'autres. Cela est vrai pour le mélange MG 2-2,5 et MW 4-2 qui possèdent une forte montée du module dynamique élastique en peu de temps, soit sur les 21 premiers jours. Toutes les formulations ont connu une diminution notable de leur hausse en module dynamique élastique suivant le 28^e jour de cure ainsi que le 35^e jour de cure pour la chaux hydraulique naturelle (NHL). En relation avec la perte en eau massique présentée précédemment, la montée en module dynamique élastique s'avère suivre étroitement la courbe de séchage. Il est donc possible de confirmer que la montée du module dynamique élastique (E) des bétons végétaux est étroitement liée au départ de l'eau en excès dans le matériau.

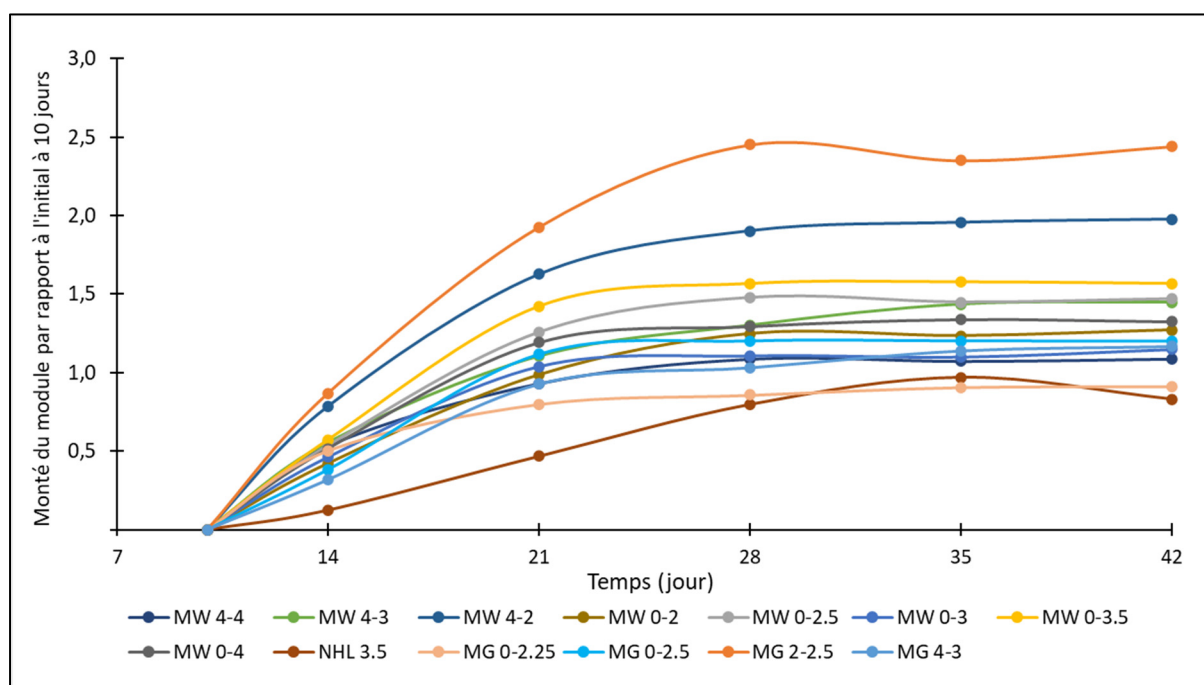


Figure 5.5 Montée du module dynamique élastique E (MPa) par rapport à l'initial au 10^e jour jusqu'au 42^e jour de cure par formulation

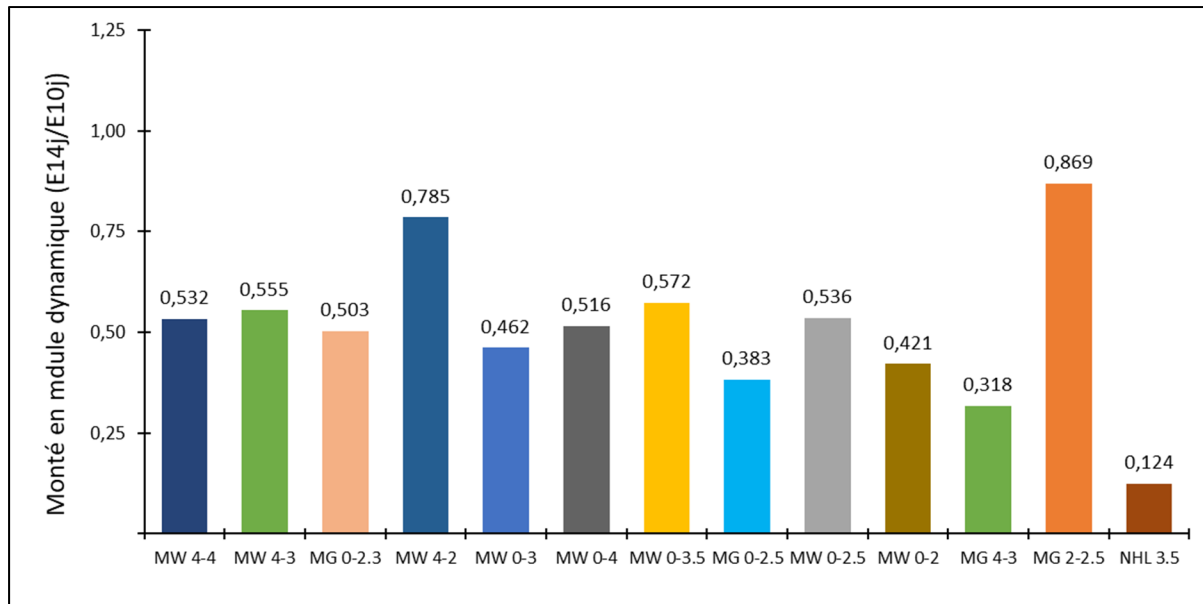


Figure 5.6 Montée du module dynamique élastique E (MPa) par rapport à l'initial au 10^e jour et le 14^e jour de cure par formulation

La Figure 5.7 présente le différentiel du module dynamique élastique (E) des formulations entre le 10^e jour et le 42^e jour de cure. L'ensemble des formulations accuse une augmentation d'approximativement 2,0 à 2,5 fois leur module dynamique élastique (E) initial relatif sur une période de 42 jours de cure. La composition du liant joue un rôle significatif sur le module dynamique élastique (E) initial. Un dosage du liant avec une composante présentant une forte masse volumique absolue tel que de la chaux hydraulique naturelle ($2,7 \text{ g/cm}^3$) ou encore du laitier de haut fourneau ($2,88 \text{ g/cm}^3$) tend rapidement à une densification du matériau pour le même volumique occupé par la matière. Cet aspect engendre donc un plus grand module dynamique élastique (E) mesuré du matériau dès les premiers jours de la cure.

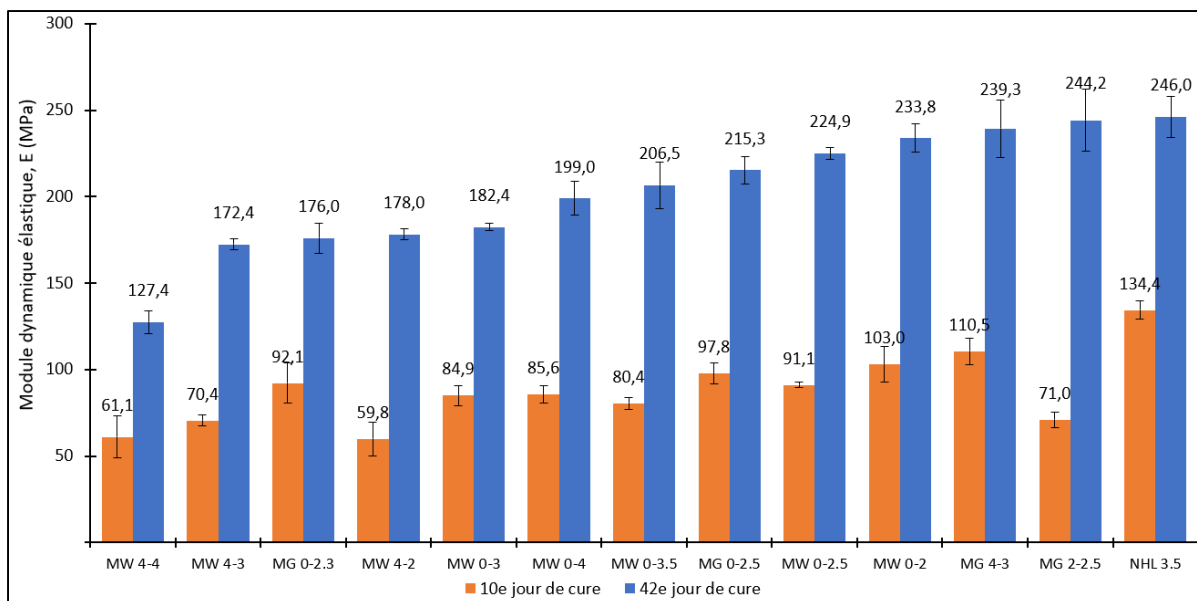


Figure 5.7 Module dynamique élastique E (MPa) initial et finale au 10^e et au 42^e jour de cure par formulation

Afin de concilier les résultats obtenus lors de l'essai de résonance mécanique non destructif présentés précédemment, des essais de compression mécanique parallèle et perpendiculaire au sens de la compaction ont été réalisés sur les mêmes échantillons après 60 jours de cure lorsque la masse volumique apparente s'est stabilisée. Particulièrement lors de la compression parallèle au sens de la compaction, l'orientation préférentielle des particules végétales à l'horizontale permet un fort écrasement de l'échantillon avant d'atteindre la rupture. Dans l'optique de comparer les différentes formulations entre elles, la résistance à la compression des bétons végétaux est notée à 5% de déformation axiale ou jusqu'à la rupture de l'échantillon.

La Figure 5.8 et la Figure 5.9 présentent les résultats obtenus de la résistance à la compression des échantillons perpendiculaires et parallèles au sens de la compaction respectivement. Lors de la compression perpendiculairement au sens de la compaction, les particules végétales sont principalement orientées verticalement et la résistance du liant est davantage sollicitée. Les bétons végétaux de chanvre sont des matériaux anisotropes, ce sens de compression perpendiculaire au sens de la compaction mène principalement à une rupture fragile du matériau. La résistance à la compression est également plus faible que celle parallèle au sens de la compaction où les particules de chanvre sont davantage sollicitées. Une différence de

l'ordre de grandeur équivalant à près de 2 fois la résistance mécanique est notée entre la résistance à la compression perpendiculaire et celle parallèle au sens de la compaction. La relation entre l'essai de résonance mécanique non destructive longitudinale et la résistance mécanique à la compression semble connaître une plus forte corrélation lors de la compression parallèle au sens de la compaction que la compression perpendiculaire au sens de la compaction.

En effet, la Figure 5.10 et la Figure 5.11 présentent la corrélation entre l'essai de résonance mécanique non destructive longitudinale et la résistance à la compression mécanique, dont le coefficient de détermination (R^2) atteint 0,4275 pour la compression parallèle au sens de la compaction, tandis que la Figure 5.11 présente plutôt un coefficient de détermination (R^2) de 0,0052 pour la compression perpendiculaire au sens de la compaction. Il est donc établi selon les résultats obtenus et les coefficients de détermination (R^2) calculés que l'essai de résonance mécanique non destructif ne semble pas être un bon indicateur de performance mécanique global pour les bétons végétaux de chanvre. L'anisotropie du matériau pourrait être en cause de cette différence notoire entre les deux coefficients de détermination mesurés.

Toutefois, l'essai de résonance mécanique s'est réalisé de façon longitudinale au prisme rectangulaire perpendiculairement au sens de la compaction. Cet aspect important peut favoriser une corrélation plus forte dans un sens précis de compression. Néanmoins, la meilleure technique de mesure de la cohésion particulaire demeure la méthode d'essai destructive qui consiste à réaliser un essai de compression mécanique parallèle ou perpendiculaire au sens de la compaction. Pareillement, la compression perpendiculaire au sens de la compaction demeurera toujours à privilégier pour mieux évaluer la capacité du liant à lier les particules végétales ensemble plutôt que la compression parallèle au sens de la compaction où les particules végétales y sont davantage sollicitées.

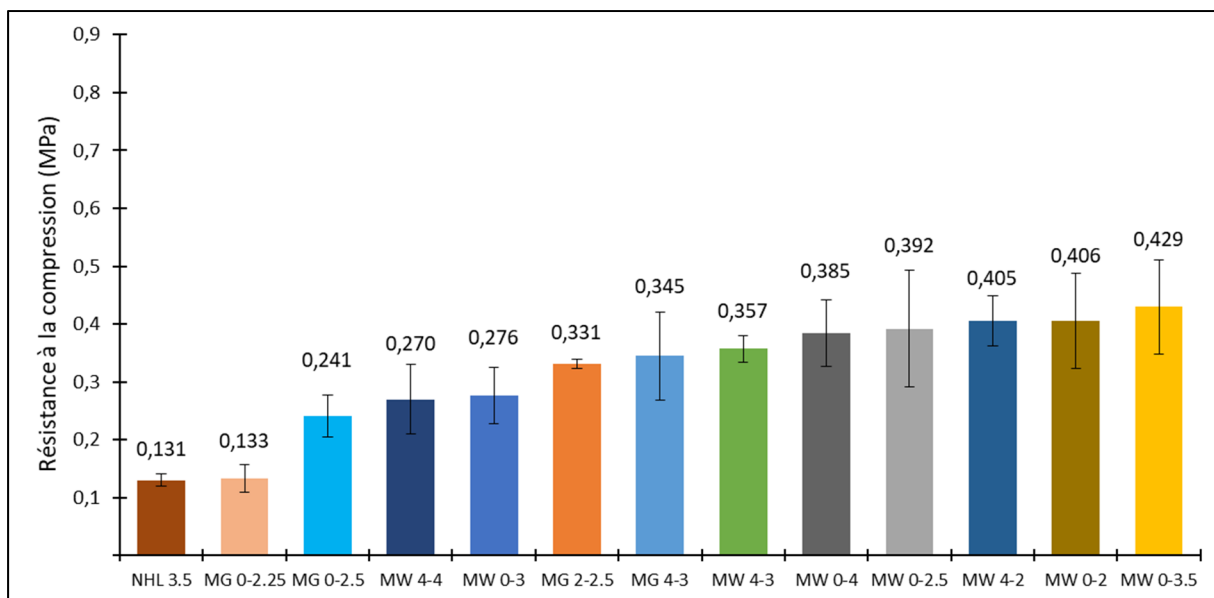


Figure 5.8 Résistances à la compression après 60 jours de cure perpendiculaire ($\perp$) au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%

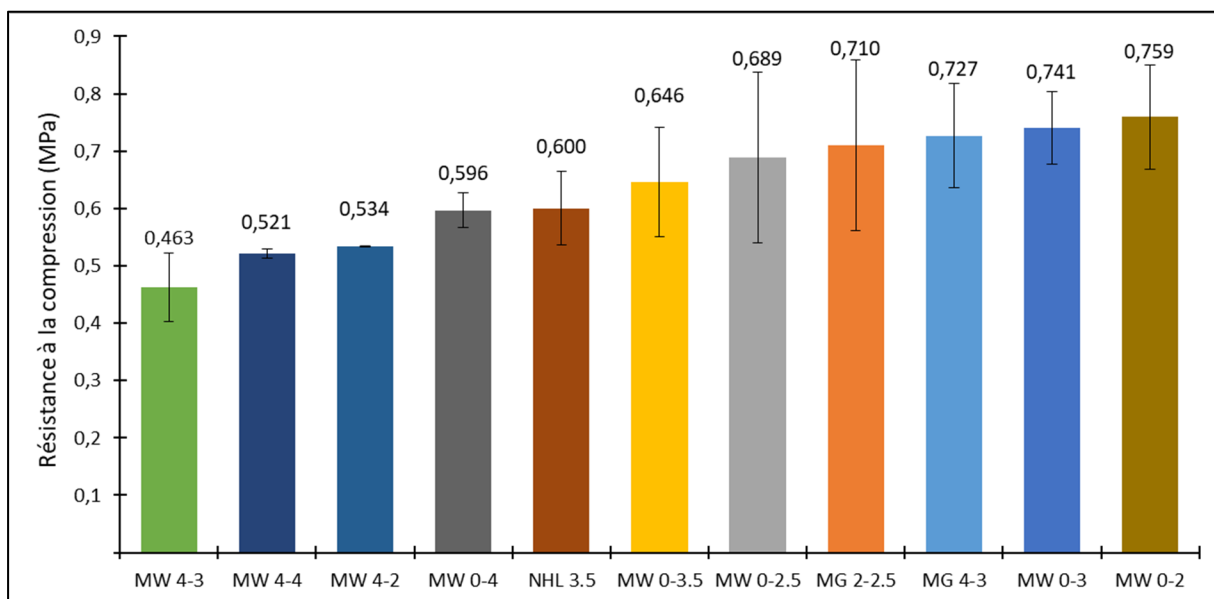


Figure 5.9 Résistances à la compression après 60 jours de cure parallèle ($\parallel$) au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%

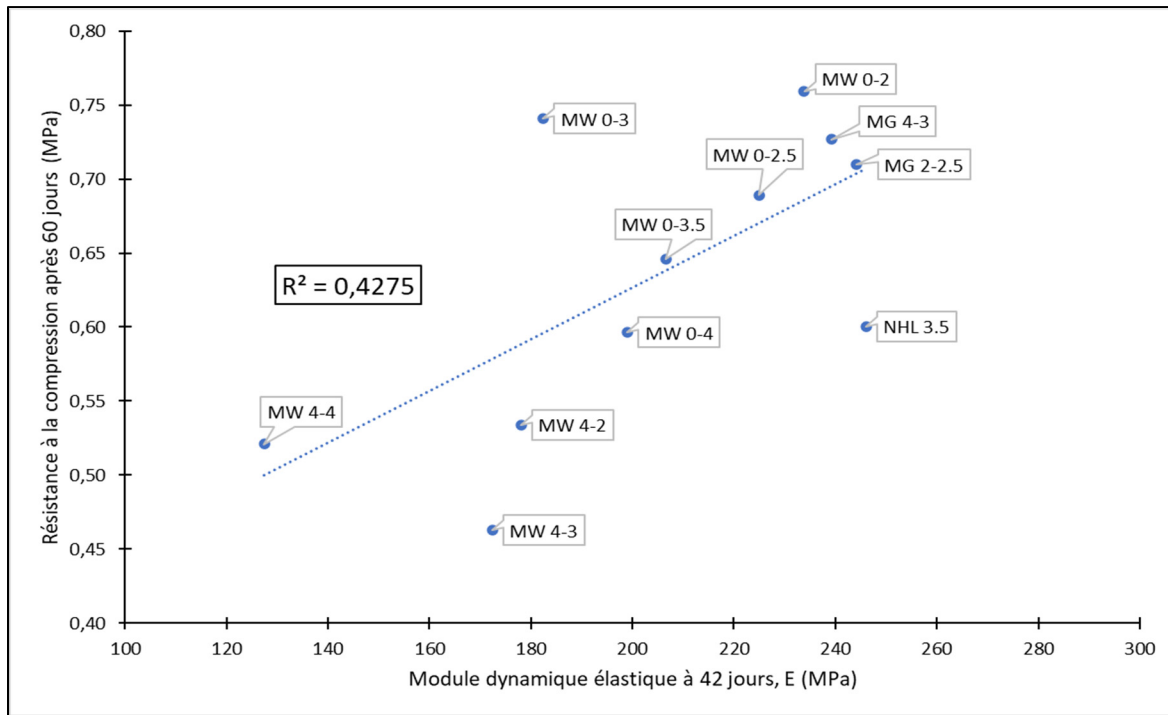


Figure 5.10 Coefficient de détermination (R^2) entre la résistance à la compression parallèle au sens de la compaction après 60 jours et le module dynamique élastique (E) à 42 jours

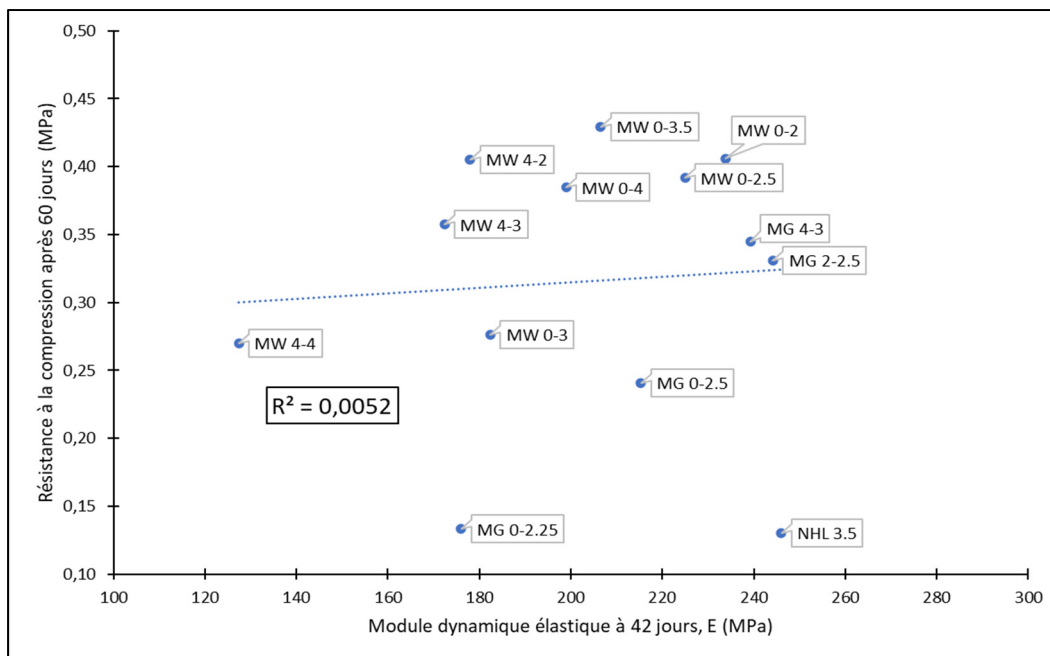


Figure 5.11 Coefficient de détermination (R^2) entre la résistance à la compression perpendiculaire au sens de la compaction après 60 jours et le module dynamique élastique (E) à 42 jours

5.2 Caractérisation hydrique des bétons végétaux

Le comportement des bétons végétaux face à l'eau liquide et en phase vapeur est important en vue de leur intégration dans le milieu bâti. Les formulations sélectionnées des prismes rectangulaires ont subi un essai de capillarité à l'eau afin de mesurer leur sensibilité à l'absorption d'eau. Cette notion importe dans un milieu bâti en ce qui concerne des événements pouvant survenir lors de la vie utile du bâtiment, soit à savoir une montée d'eau soudaine à l'intérieur ou l'absorption d'eau par capillarité du sol avoisinant la construction qui risquerait d'affecter la durabilité du matériau. Il est donc privilégié d'employer les formulations présentant la moindre absorption d'eau par capillarité afin de réduire leur détérioration possible au cours du temps, peu importe les circonstances ou les événements pouvant survenir.

La Figure 5.12 et la Figure 5.13 présentent le gain par capillarité de chaque formulation d'après la racine du temps ainsi que leur coefficient d'absorption capillaire (Ca) respectif. On remarque que certaines formulations telles que MW 0-3,5 et MW 0-4 connaissent une montée d'eau par capillarité significativement plus élevée par rapport aux autres formulations. Ces deux formulations sont composées d'une grande proportion de terre diatomée, un matériau très poreux et hydrophile. Cet aspect est confirmé en calculant le coefficient d'absorption capillaire (Ca) des formulations d'après la Figure 5.13. Ce coefficient nous indique la quantité d'eau absorbée dans le temps pour une superficie mouillée donnée. L'échantillon composé de chaux hydraulique naturelle (NHL) se trouve près de la médiane observée dans les résultats. Une partie équivalente d'échantillons se trouve en dessous du NHL et la seconde moitié s'y trouve plus au-dessus. Il importe de se concentrer pour la suite de cette recherche sur les échantillons près ou sous la valeur du coefficient d'absorption capillaire (Ca) du spécimen témoin, soit la NHL afin d'apprécier des comportements similaires en phase d'utilisation d'une telle formulation.

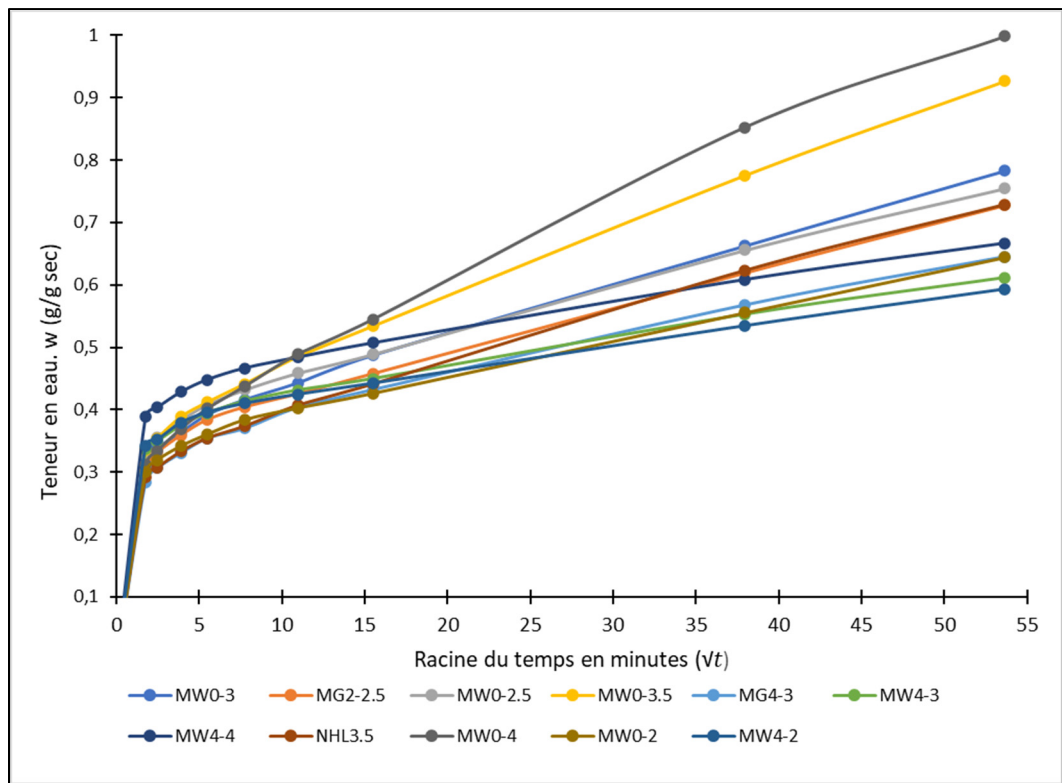


Figure 5.12 Gain d'eau par capillarité sur la racine du temps pour des échantillons partiellement immergés dans 5 mm d'eau pour différentes formulations

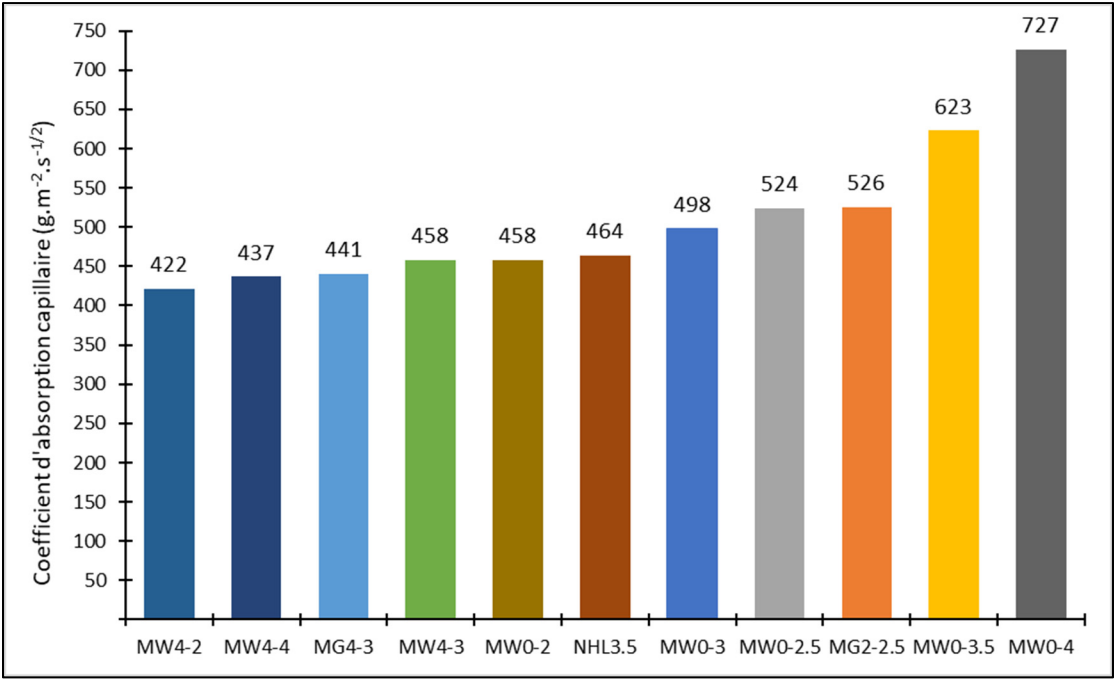


Figure 5.13 Coefficient d'absorption capillaire (Ca) d'après la racine du temps pour des échantillons partiellement immergés dans 5 mm d'eau pour différentes formulations

Dans une enceinte à température et à humidité relative (%HR) contrôlées, les échantillons sont pesés périodiquement pour établir leur gain de masse lors d'une fluctuation d'humidité, soit depuis un environnement humide à un environnement sec. Lorsque la stabilisation des différences massiques entre chaque période journalière pour la même température est atteinte, la valeur de la capacité de tampon hydrique (VCTH) ou «Moisture Buffering Value (MBV)» est ainsi mesurée par le protocole *Nordtest*. Cette dernière est reconnue pour évaluer la capacité d'un matériau à réguler l'humidité environnant. Les valeurs MBV mesurées par formulation sont présentées à la Figure 5.14. Celles-ci représentent la moyenne obtenue lors des trois derniers cycles d'humidité à température constante sur un total de dix cycles subséquents. Les mesures se sont exécutées parallèlement au sens de la compaction pour des raisons de géométrie et de surface minimale exposée à atteindre. La valeur critique étant fixée à 2,00 g/(m².%HR) afin de qualifier le matériau tel un « excellent » régulateur hydrique selon le protocole *Nordtest* (Rode et al., 2005). D'après les résultats obtenus, toutes les formulations se qualifient à être d'excellent régulateur hydrique. Ceux qui performe le mieux dans ce sens sont la formulation détenant la plus grande proportion de chaux hydratée, soit la MW 4-4 ainsi que la formulation témoin, soit la chaux hydraulique naturelle (NHL). Cela nous laisse présager une meilleure capacité de régulation hydrique de ces formulations. L'ensemble des autres formulations mesurées sont légèrement en dessous de celles mesurées du MW 4-4 et du NHL. Ces valeurs nous indiqueraient une possible diminution du pouvoir régulateur hydrique des formulations composées d'un liant de nature pouzzolanique par rapport à des formulations faiblement dosées en pouzzolanes ou composées de chaux hydraulique naturelle. Ces résultats corroborent avec Latif et al. (2015) qui a tenté l'essai également sur un béton végétal de chanvre riche en chaux hydratée.

D'après les résultats obtenus présentés à la même Figure 5.14, aucune augmentation des propriétés de régulation hydrique a été soulevée se rapportant à un dosage plus important en pouzzolane secondaire moins réactive que le métakaolin, soit en augmentant le rapport Si/Al initial dans le mélange du liant sec. Cette notion nous indique que la composition pouzzolanique du liant ne semble donc avoir peu d'influence sur les propriétés de régulation hydrique du matériau. Dans cette perspective et comparant les résultats obtenus pour un mélange binaire tel que la formulation MW 0-2 et des mélanges ternaires (MW 0-2,5; MW 0-

3; MW 0-3,5 et MW 0-4), aucune amélioration notable des propriétés de régulation hydrique par la mesure du MBV n'indique de façon évidente qu'il importe de prolonger l'analyse de ce paramètre intrinsèque (Si/Al) de ce matériau par une approche basée sur une formulation ternaire à deux pouzzolanes de réactivités différentes. En d'autres mots, en se basant uniquement sur ces valeurs obtenues, une formulation binaire pouzzolanique semble être suffisante pour l'atteinte du comportement hydrique désiré.

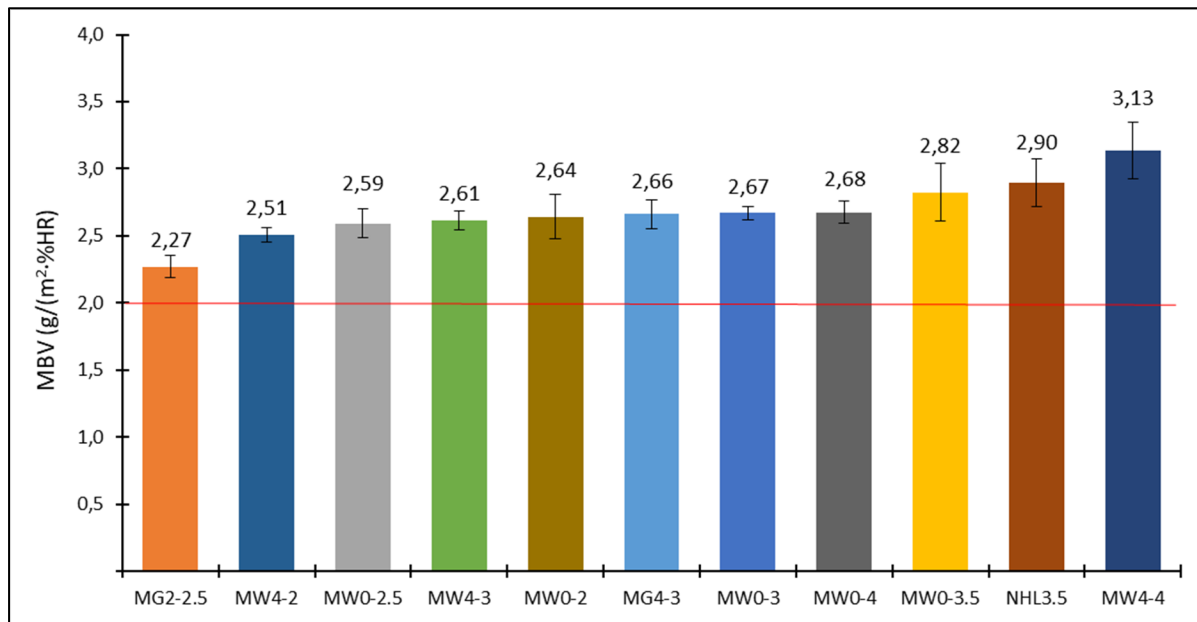


Figure 5.14 Valeur de la capacité de tampon hydrique (VCTH) ou « Moisture Buffering Value (MBV) » par formulation équivalant à la moyenne des 3 derniers cycles d'humidité mesurés; la ligne rouge représente la valeur MBV évaluée comme « Excellente »

5.3 Caractérisations des blocs rectangulaires

Dans une perspective plus large d'accroître l'intégration d'une formulation pouzzolanique optimisée dans la construction de mur plein en béton végétal de chanvre, il a été décidé de confectionner des blocs rectangulaires de grand format de certaines formulations dosées plus faiblement en liant, soit 1,5 fois la masse de chènevotte au lieu de 2,0 fois la masse de chènevotte pour les prismes rectangulaires. Ce dosage plus faible en liant coïncide davantage avec la composition normale d'un mur plein de ce matériau selon les règles professionnelles de *Construire en Chanvre* en France (Fédération Française du Bâtiment, 2009).

D'après les multiples résultats de résistance mécanique et comportement hydrique obtenus précédemment pour les prismes rectangulaires, deux formulations ont été sélectionnées (MW

0-3,5 et MW 0-2) selon les meilleurs résultats de résistances à la compression perpendiculaires au sens de la compaction obtenue. La Figure 5.15 présente les résultats de la résistance à la compression de ces deux formulations lors d'une mise en grande échelle par la confection des grands blocs rectangulaires afin d'apprécier une reproductibilité suffisante des résultats obtenus. Ces deux formulations ont été comparées aléatoirement à une autre formulation du lot ayant connu une performance moindre en guise de comparaison, soit le MW 4-3. Rappelons que les blocs rectangulaires ont été légèrement moins dosés en liant (1,5 fois la masse de chanvre sec au lieu de 2,0 fois) pour se rapprocher d'un dosage en liant courant en béton végétal de chanvre retrouvé dans l'industrie pour la réalisation de mur extérieur.

D'après les résultats obtenus présentés à la Figure 5.15, la formulation qui semble conserver davantage sa reproductibilité parmi les trois demeure la formulation MW 0-2 qui représente une formulation binaire chaux-métakaolin sans l'ajout d'une seconde pouzzolane. La formulation MW 0-3,5 n'a pas présenté une résistance équivalente aux résultats précédemment obtenus lors de l'essai sur les prismes rectangulaires à plus fort dosage en liant. Cette dernière étant largement moins résistante que la formulation MW 0-2. Ceci nous indique une faible reproductibilité de la formulation MW 0-3,5 pour bétons végétaux à plus faible dosage.

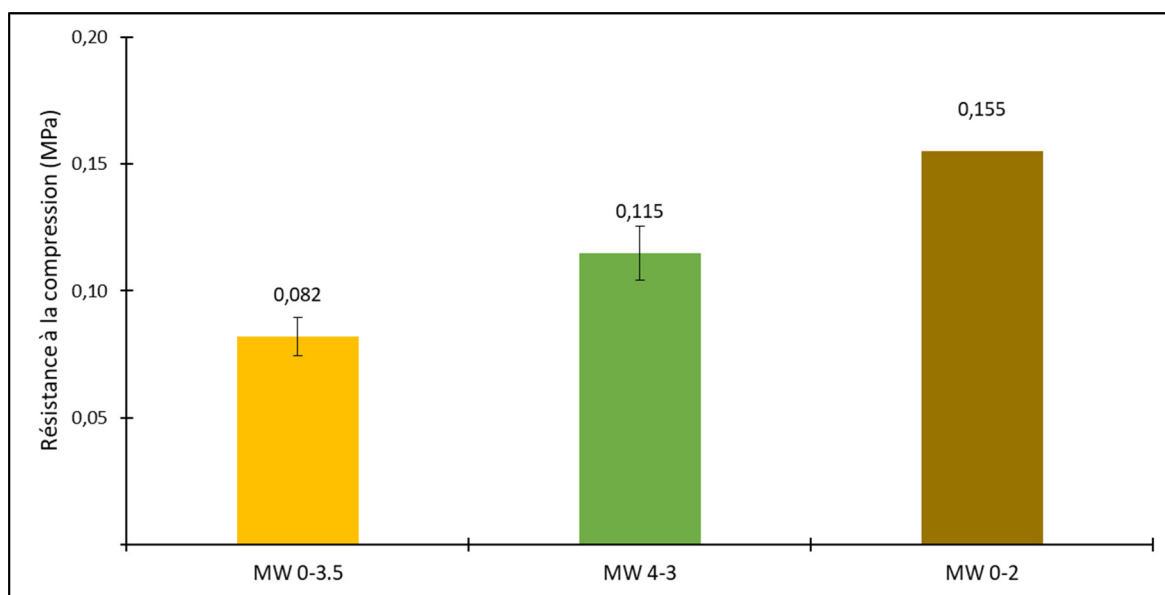


Figure 5.15 Résistance à la compression des blocs après 60 jours de cure perpendiculaire au sens de la compaction pour l'atteinte d'une déformation axiale équivalente à 5%

En se référant aux travaux de synthèse des connaissances sur les bétons végétaux de chanvre réalisés par Hustache (2008), une grande variabilité dans les résultats des résistances mécaniques à la compression est soulevée d'après les diverses études répertoriées. Le paramètre qui semble le plus influencer la résistance mécanique semble être la masse volumique apparente du matériau sec qui suit la teneur en liant qui le compose de façon presque proportionnelle. Plus le matériau est dosé fortement en liant, plus la résistance mécanique augmente. D'après les résultats présentés par Hustache (2008) concernant des bétons végétaux de masse volumique similaire à ceux confectionnés dans ce mémoire, soit près de 330 kg/m^3 . Les résultats obtenus ont un ordre de grandeur similaire à ceux obtenus, soit entre 0,08 à 0,24 MPa après 30 jours de cure.

Le résultat de l'essai de porosité ouverte accessible à l'eau de la formulation dévoilant la meilleure résistance à la compression perpendiculaire au sens de la compaction, soit la formulation MW 0-2, est présenté au Tableau 5.2. Cérézo (2005) avait un ordre de grandeur entre 67 et 80% de porosité pour les formulations des bétons végétaux de chanvre testés lors de ses travaux de thèse. La valeur obtenue de 72,27% pour la formulation du bloc MW 0-2 semble donc s'arrimer avec les résultats de cette chercheuse. Cependant, aucune dépressurisation du matériau n'a été exécutée avant l'immersion comparativement aux travaux de Nozahic (2012). Dans le cas contraire, la valeur obtenue de porosité aurait probablement connu une légère augmentation. Enfin, cet essai de porosité ouverte accessible à l'eau ne nous informe aucunement de la distribution porale dans le matériau ainsi que leur proportion respective.

Tableau 5.2 Porosité ouverte à l'eau de la formulation du bloc MW 0-2 après 60 jours de cure

	Porosité ouverte à l'eau (n_{ouv} %)
MW 0-2	72,3 % $\pm$ 0,6 %

5.4 Caractérisation thermique et acoustique

Thermique - Dans le cadre de mesure d'application à grande échelle d'une telle formulation pouzzolanique pour la confection d'un béton végétal de chanvre, une évaluation de la

conductivité thermique à température et humidité ambiante a été exécutée sur la formulation du bloc MW 0-2 après 60 jours de cure où la masse volumique s'est stabilisée. Le résultat obtenu est présenté au Tableau 5.3. Rappelons que la valeur moyenne obtenue de 0,102 W/mK (RSI = 0,249 mK/W pour 1 po ou 25,4 mm d'épaisseur) présentée dans ce tableau est très près de la limite inférieure de l'appareil utilisé au cours de l'essai, soit 0,100 W/mK. Néanmoins, la valeur de conductivité thermique mesurée pour une masse volumique apparente d'environ 326 kg/m³ s'approche significativement des valeurs attendues reportées dans la littérature. En effet, la Figure 5.16 présente les résultats de la conductivité thermique obtenus par Cérézo (2005) qui varie linéairement avec la masse volumique apparente des formulations des bétons végétaux de chanvre à température ambiante pour des humidités relatives de 50% et moins.

Tableau 5.3 Évaluation de la conductivité thermique (k) du bloc de formule MW 0-2 après 60 jours de cure

Formulation	Masse volumique apparente kg/m ³	Conductivité thermique, k W/mK
MW 0-2	326 ± 4	0.102 ± 0.004

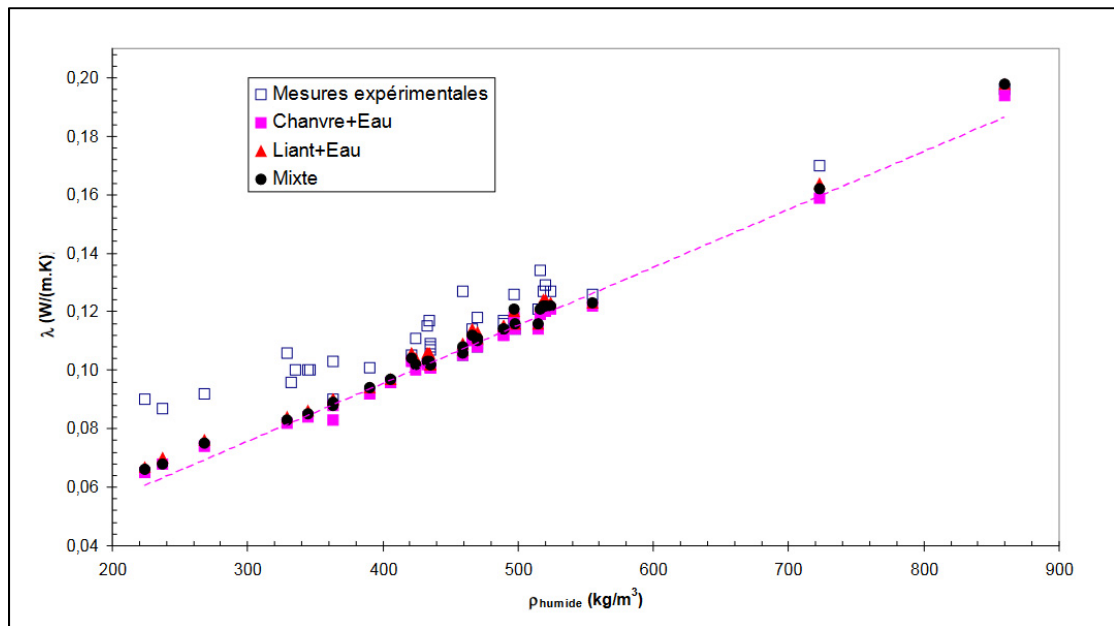


Figure 5.16 Conductivité thermique expérimentale et théorique des formulations des bétons végétaux de chanvre à température ambiante pour des humidités relatives de 50% et moins de Cérézo (2005)

Acoustique - Dans un cadre plus étendu de mesures portant sur la performance d'un tel matériau formulé dans le milieu bâti, des essais acoustiques de perte par transmission et par absorption ont été réalisés sur la formulation du bloc MW 0-2 (environ 330 kg/m³) pour différentes épaisseurs, soient 38 mm; 25 mm et 16 mm. Ces épaisseurs ont été sélectionnées afin de concilier une approche réaliste d'application dans le marché nord-américain d'utiliser un tel matériau comme correction thermique et acoustique. Les études européennes portent davantage sur une gamme d'épaisseur plus importante de l'ordre du 10 cm à 30 cm répondant à la méthode de construction par blocs maçonnés typique des traditions de construire en Europe. En Amérique du Nord, la formule « cloison sèche avec montants » est davantage appréciée des constructeurs et l'utilisation d'un tel matériau en forme de panneau s'intégrerait plus facilement suivant cette approche.

La Figure 5.17 et la Figure 5.18 présentent respectivement la perte sonore par transmission (dB) et le coefficient d'absorption sonore (α) en fonction d'une plage de fréquence déterminée (100 à 1900 Hz) d'un béton végétal de chanvre de formulation MW 0-2 (dosage en liant sec à 1,5 fois la masse de chanvre sec) pour différentes épaisseurs. D'après les résultats obtenus, une légère augmentation de l'épaisseur du matériau semble avoir effectivement un impact notable sur la grandeur de la perte sonore par transmission (dB) ainsi que la perte sonore par absorption (α). Dans un cas d'application en bâtiment, il est courant de s'intéresser aux sons perceptibles pour l'oreille humaine entre 100 Hz et 5000 Hz. Le domaine des sons graves débutant à 100 Hz jusqu'à 350 Hz se trouve à être par exemple des sons de voiture qui passe à l'extérieur jusqu'à la conversation humaine généralement masculine. Le domaine des sons « médium » entre 350 Hz et 1500 Hz se caractérise davantage comme un mélange de sons graves et aigus généralement caractérisé par des conversations humaines normales (Vaisberg et al., 2017). Au-dessus de 1500 Hz, la fréquence est aiguë et le son se caractérise davantage tel celui d'un cri d'un jeune enfant ou d'une femme. Le domaine de fréquence qui a été analysé lors de ces essais acoustiques correspond donc à la plage courante de fréquence dans un environnement normal d'utilisation dans le milieu bâti résidentiel ou commercial, soient les voitures qui circulent à l'extérieur et les conversations humaines normales. Le niveau d'intensité de chaque fréquence est caractérisé par l'amplitude que l'onde sonore possède, celle-ci est exprimée en décibel (dB).

À la Figure 5.17, portant sur la perte sonore par transmission, il est remarqué qu'une faible épaisseur de 16 mm perd une grande partie de son pouvoir atténuant de l'onde sonore transmissible entre 400 et 600 Hz comparativement à des épaisseurs de 25 mm et 38 mm qui semble mieux se comporter dans cette plage de fréquence. D'après l'analyse des résultats obtenus, une épaisseur de 25 mm et moins présenterait une disruption acoustique à une fréquence de 700 Hz où le son semble mieux traverser le matériau (Figure 5.17). Cette disruption acoustique disparaît à 38 mm d'épaisseur. À la Figure 5.18 portant sur la proportion du son absorbé par le matériau défini par le coefficient d'absorption sonore (α), une transition significative sur l'axe des fréquences du pic d'absorption est soulevée lors du changement d'épaisseur. Un échantillon d'épaisseur plus important sera nécessairement plus massif. Le pic d'absorption se transitera donc davantage dans le domaine des graves fréquences tel que nous observons avec l'échantillon d'épaisseur 38 mm en comparaison à celui de 16 mm d'épaisseur.

En effet, cette observation corrobore avec les travaux de Cérézo (2005). Selon cette auteure, le décalage des pics d'absorption acoustique vers les basses fréquences est un des effets de l'augmentation d'épaisseur des échantillons. L'auteure conclut également que les bétons végétaux de chanvre possèdent des valeurs d'absorption généralement plus élevées que d'autres matériaux de construction conventionnels grâce à leur forte perméabilité ainsi qu'une forte porosité ouverte du matériau. La perméabilité représente la caractéristique qu'a un matériau de permettre l'écoulement d'un fluide en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Un matériau peut donc être très poreux sans être perméable. Par exemple, les produits comme la brique, le contre-plaqué et le plâtre possèdent des propriétés acoustiques absorbantes quasi inexistantes ($\alpha < 0,1$) par le fait qu'ils sont peu perméables et ne laissent donc pas pénétrer l'onde acoustique (Cérézo, 2005; Aygün, 2017). Dans la même perspective, toujours selon cette même auteure, un autre matériau tel que le béton cellulaire très poreux de l'ordre de 80% présente un coefficient d'absorption acoustique (α) limité généralement à 0,4 dû au fait que les pores qui le composent sont non connectés entre eux. Donc, en comparaison avec les autres matériaux de construction conventionnels, le béton végétal de chanvre propose une alternative distincte et attrayante en ce qui concerne la capacité d'absorption acoustique lorsqu'utilisé dans une composition de paroi, ce qui le place bien au-delà de certains autres matériaux de finition couramment utilisés sur le marché.

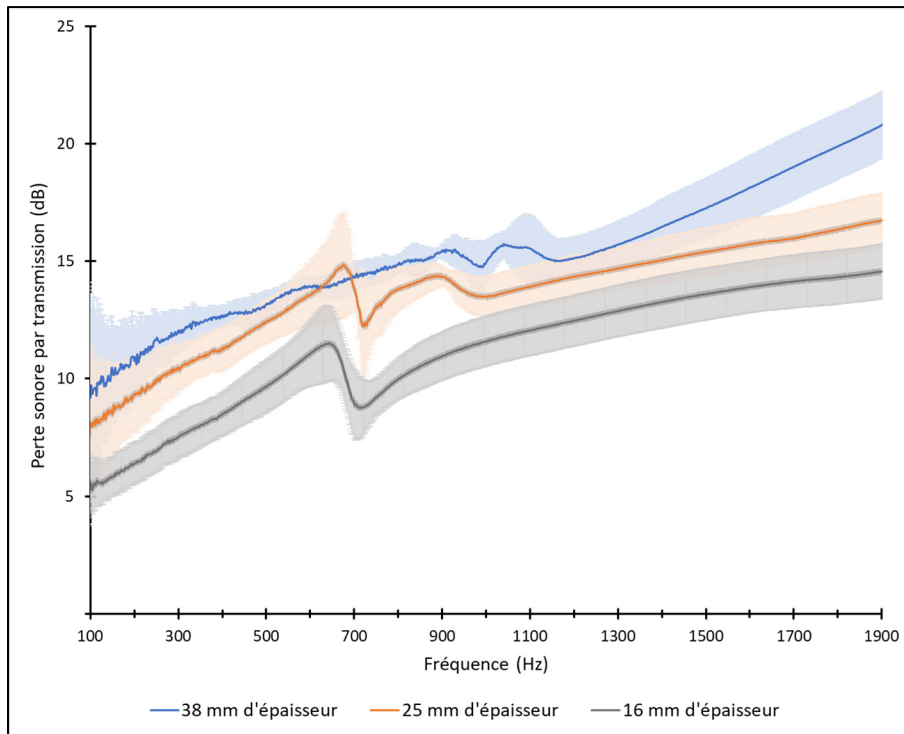


Figure 5.17 Perte sonore par transmission (dB) en fonction de la fréquence (Hz) pour différentes épaisseurs (38 mm, 25 mm et 16 mm) de la formulation du bloc MW 0-2

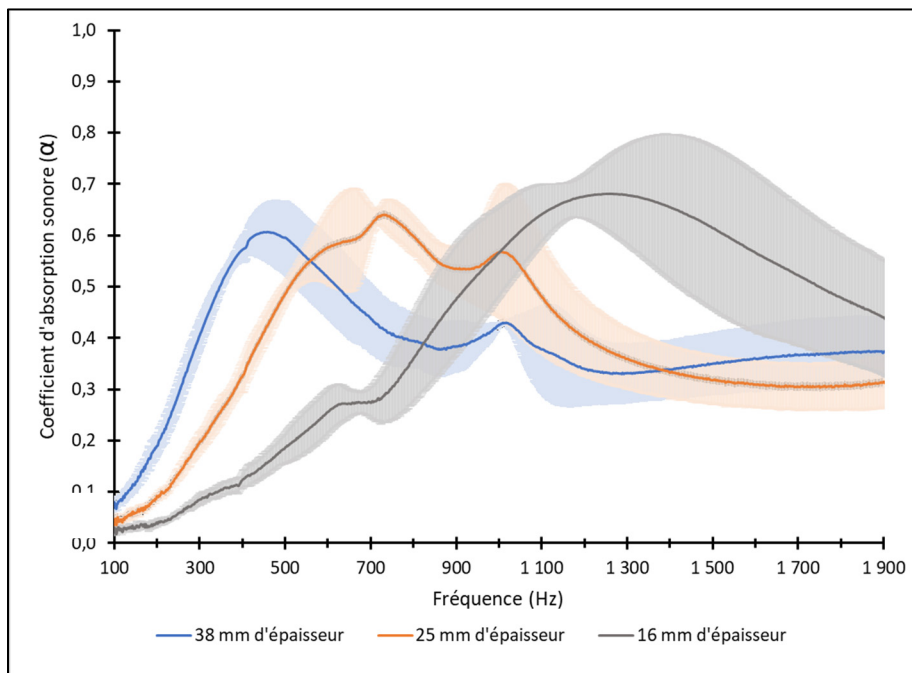


Figure 5.18 Coefficient d'absorption sonore (α) en fonction de la fréquence (Hz) pour différentes épaisseurs (38 mm, 25 mm et 16 mm) de la formulation du bloc MW 0-2

5.5 Bilan du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif de réaliser la continuité des essais expérimentaux du chapitre précédent qui portait essentiellement sur la compréhension des réactions pouzzolaniques à l'intérieur de la pâte liante en y incorporant la dernière composante du matériau, soit les particules végétales, les particules de chènevottes. Suivant la caractérisation physique sommaire des particules végétales reçues, la première étape était de mesurer la montée du module dynamique élastique (E) des multiples formulations et de suivre le temps de séchage pour chacune d'entre elles. D'après l'analyse réalisée, la montée en module dynamique élastique (E) mesuré longitudinalement sur les prismes rectangulaires confectionnés suit étroitement de façon inversement proportionnelle la masse volumique apparente au cours du temps des échantillons. Cette masse volumique apparente diminue rapidement dans les premières semaines suivant le départ de l'eau lors de la phase de séchage jusqu'à se stabiliser progressivement au même titre que le module dynamique élastique mesuré, soit entre le 28^e et le 35^e jour de cure. Une faible corrélation linéaire a été soulevée entre la résistance à la compression parallèle au sens de la compaction et le module dynamique élastique longitudinal déterminée lors de l'essai de résonance réalisé dans le sens perpendiculaire au sens de la compaction. Ce matériau étant anisotrope, aucune corrélation claire a été remarquée dans le sens contraire, soit le sens de compression perpendiculaire au sens de la compaction.

La seconde étape était de mesurer le comportement à l'eau liquide et à l'eau en phase gazeuse des différentes formulations retenues. L'immersion des échantillons s'est réalisée dans 5 mm d'eau et le gain en eau par formulation a été suivi entre 1 min et 48h. Le coefficient d'absorption capillaire (Ca) a été mesuré pour chaque formulation. Les formulations possédant le moins d'ajout pouzzolanique et davantage de chaux hydratée (MW 4-4; MW 4-3; MW 4-2; MG 4-3) présentent toutes un coefficient de remontée capillaire moindre que celui du témoin, soit la chaux hydraulique naturelle (NHL). Les autres formulations possédant davantage d'ajouts pouzzolanique surpassent le coefficient d'absorption capillaire du témoin (NHL), sauf pour le MW 0-2 qui y est légèrement en dessous. Un coefficient d'absorption capillaire moindre est à privilégier pour prolonger le matériau contre la dégradation possible à l'eau liquide au courant de sa vie utile dans le milieu bâti.

Ensuite, le comportement à l'eau en phase vapeur pour les mêmes formulations a été mesuré à l'aide du protocole *Nordtest* pour déterminer leur valeur de capacité de tampon hydrique (VCTH) ou « Moisture Buffering Value (MBV) » respective. Toutes les formulations se situent au-dessus du seuil « d'excellent » régulateur hydrique établi à $2,00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ par le protocole d'essai. Les formulations présentant la meilleure valeur MBV parmi les échantillons sont le témoin NHL et la formulation MW 4-4, soit la plus faiblement dosée en ajout pouzzolanique. Les autres formulations plus fortement dosées en ajout pouzzolanique présentent une valeur MBV légèrement plus faible nous laissant présager une réduction possible du pouvoir régulateur de ces formulations tout en demeurant « d'excellent » régulateur au-dessus du seuil établi. Enfin, aucune augmentation significative de la valeur MBV n'a été remarquée pour la série MW-0 en augmentant le rapport molaire massique Si/Al dans la formulation ternaire optimisée entre 2,0 et 4,0 (MW 0-2; MW 0-2,5; MW 0-3; MW 0-3,5 et MW 0-4). Ceci nous permet d'exclure le paramètre intrinsèque du ratio molaire massique Si/Al dans la composition du liant comme un paramètre pouvant impacter positivement le pouvoir régulateur des bétons végétaux de chanvre pour un même dosage massique de liant sec. Ces résultats nous informent donc qu'une formulation binaire chaux-pouzzolane ou plus précisément une formulation binaire chaux hydratée-métakaolin semble être suffisante pour atteindre les performances hydriques désirées.

Finalement, dans une approche basée sur l'appréciation globale des multiples résultats mécaniques et hydriques obtenus, la formulation au plus grand potentiel d'intégration à grande échelle s'avère à être la formulation MW 0-2 de formule binaire chaux hydratée calcique (54%) et de métakaolin (46%). Afin de supporter ce constat, des essais de conductivité thermique et acoustique ont été réalisés sur des bétons végétaux confectionnés à l'aide d'un liant de formulation MW 0-2 à dosage massique de liant sec de 1,5 fois la masse de chènevotte sèche introduite pour une masse volumique apparente stabilisée de l'ordre d'environ $330 \text{ kg}/\text{m}^3$. Les résultats obtenus reflètent les données de la littérature reportées et soutiens donc une meilleure acceptation de ce nouveau liant formulé optimisé pour la confection de bétons végétaux de chanvre pour son utilisation dans le milieu bâti.

CONCLUSION

Dans le contexte mondial actuel concernant les changements climatiques et l'impact néfaste sur l'environnement que peuvent avoir les matériaux de construction, l'introduction de matériaux alternatifs biosourcés dans le milieu bâti va permettre de réduire l'empreinte carbone des bâtiments. Ces nouveaux matériaux doivent s'intégrer dans un marché mondial compétitif déjà établi où les matériaux pétrochimiques et minéraux sont fortement répandus. Dès lors, l'approche bénéfique de leur intégration doit être vue de façon globale. L'intérêt d'intégrer ses matériaux biosourcés dans le milieu bâti surpasse notamment les raisons environnementales en apportant un milieu de vie sain et confortable pour l'occupant. Dans cette perspective, un matériau au fort potentiel est le béton végétal de chanvre à base de chaux hydratée qui permet d'apprécier ses propriétés uniques avantageuses au sein de l'enveloppe du bâtiment. Les ressources actuellement utilisées pour la confection de ces bétons végétaux sont principalement géosourcées en Europe et importées en Amérique du Nord augmentant ainsi les coûts d'un tel matériau et le rendant peu viable ainsi que moins compétitif sur le marché. Cette recherche vise donc à répondre à cette problématique en établissant les ressources disponibles en Amérique du Nord pouvant permettre de formuler un liant adapté au béton végétal de chanvre.

L'objectif principal de ce travail de recherche fut présenté sous les objectifs spécifiques suivants :

1. Analyser le caractère réactif des différents matériaux pouzzolaniques sélectionnés.

Une approche basée sur la compréhension des réactions chimiques pouzzolaniques survenant à l'intérieur d'une pâte liante est proposée. Parmi toutes les pouzzolanes testées, soit la poudre de verre, la perlite expansée, les terres diatomées et la zéolithe, la terre diatomée de l'Oregon est ainsi évaluée comme une pouzzolane possible. Ensuite, l'impact de l'eau de chanvre sur la prise du liant est investigué. Le métakaolin est ainsi la pouzzolane se comportant le mieux en présence de l'eau biologique.

2. Améliorer la cure du biomatériau suivant la compréhension de la prise pouzzolanique par l'optimisation des dosages des constituants du liant minéral.

Une optimisation massive des paramètres entrants dans la formulation du liant basé sur le ratio massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Si/Al) pour atteindre une consommation totale de la chaux libre (CH) par la métakaolinite (AS_2) est retenue comme hypothèse et proposition expérimentale. Une formulation ternaire composée de chaux hydratée et de deux pouzzolanes de réactivité différente est investiguée afin d'étendre l'analyse de l'impact du ratio massique (Si/Al) sur la possibilité d'augmenter le volume capillaire des pores connectés des pâtes formulées à l'état durci ainsi que le comportement hydrique final des bétons végétaux de chanvre formulés. Plus précisément, des formulations ternaires en formule pâte et en formule béton (voir objectif spécifique 4) composées de chaux hydratée-métakaolin-terre diatomée (MW) ainsi que d'autres formulations ternaires composées de chaux hydratée-métakaolin-laitier de haut fourneau (MG) ont été sélectionnées afin de répondre à cette hypothèse. Le tout est comparé à une formulation témoin, soit la chaux hydraulique naturelle (NHL). Les formules de pâtes testées ont connu une augmentation notable de leur taux de carbonates présents à l'essai TGA/DTG en fixant mieux le CO_2 atmosphérique lorsque le ratio massique (Si/Al) augmentait nous indiquant ainsi une possible augmentation des volumes capillaires des pores connectés.

3. Évaluer la montée en cohésion au fil du temps du biomatériau par des essais non destructifs et par des essais destructifs de convenance.

L'essai de résonance non destructif pour évaluer la montée du module élastique dynamique (E) des bétons semble peu corrélérer avec la résistance en compression des bétons testés. Les résultats obtenus nous indiquent que la meilleure méthode pour évaluer la cohésion des particules végétales par un liant formulé demeure la compression du béton perpendiculairement au sens de la compaction appliquée lors de la confection du béton. L'ajout de pouzzolane dans un mélange permet une montée en cohésion plus rapide qu'un mélange faiblement dosé en pouzzolane. Aucune amélioration significative des propriétés mécaniques du matériau final a été observée lorsque le liant pouzzolanique était de nature ternaire comparativement à un liant pouzzolanique de nature binaire.

4. Déterminer, d'après les formulations concluantes du biomatériau, l'impact de la formulation d'un liant pouzzolanique optimisé sur les propriétés physiques hygroscopiques et de capillarité à l'eau du biomatériau formulé.

Les essais de capillarité à l'eau ont montré qu'une trop grande proportion en terre diatomée augmentait significativement le taux d'absorption d'eau liquide des bétons. Cependant, une proportion élevée en métakaolin jusqu'à 45% influence peu la remontée capillaire des bétons qui le composent supportant donc mieux son utilisation pour la formulation d'un tel matériau. Par ailleurs, pour les mêmes formules que les pâtes testées, soit métakaolin-terre diatomée-chaux hydratée (MW) et métakaolin-laitier de haut fourneau-chaux hydratée (MG), les bétons avec les particules de chanvre ne présentaient aucune amélioration notable observée lors de l'essai hygroscopique (MBV) en augmentant le ratio (Si/Al) nous laissant présager un plus grand pouvoir régulateur d'humidité des bétons en jouant sur ce paramètre du liant qui le compose.

Plus particulièrement, le mémoire portait sur deux questions qui ont été répondues par l'aboutissement de cette recherche, soit :

1- Est-ce que la réduction de la dimension des pores des pâtes pouzzolaniques par le métakaolin ainsi que par les hydrates formés dans la pâte a un impact réducteur sur la qualité hygroscopique de régulation d'humidité des futurs bétons végétaux qui le compose?

Les résultats finaux du comportement à l'eau en phase vapeur soutiennent une légère réduction du caractère régulateur des formulations contenant des ajouts pouzzolaniques par rapport à la formulation faiblement dosée en ajout pouzzolanique (MW 4-4) ainsi que la formulation témoin de chaux hydraulique naturelle pure (NHL). Les valeurs de la capacité de tampon hydrique (VCTH) ou « Moisture Buffering Value (MBV) » de toutes les formulations demeurent toutefois supérieures au seuil à atteindre de 2,00 g/(m².%HR) pour être considérées «d'excellent» régulateur hydrique par le protocole d'essai, soit le protocole *Nordtest*.

2- En se référant aux récents travaux réalisés par Bharadwaj et al. (2021), est-il possible d'augmenter les volumes capillaires des pores connectés des pâtes liantes pouzzolaniques en substituant une pouzzolane moins réactive au métakaolin améliorant ainsi l'hygroscopicité des bétons végétaux formulés?

D'après les valeurs de MBV obtenues, aucune augmentation significative des propriétés de régulation d'humidité pour un dosage plus élevé en pouzzolane secondaire moins réactive que le métakaolin a été soulevée, soit en augmentant le rapport Si/Al initial du liant. Ceci nous indique que la composition pouzzolanique du liant ne semble avoir que peu d'influence sur les propriétés de régulation d'humidité du matériau final. En comparant les résultats obtenus pour un mélange binaire tel que la formulation MW 0-2 et des mélanges ternaires (MW 0-2,5; MW 0-3; MW 0-3,5 et MW 0-4), aucune amélioration notable des propriétés de régulation hydrique par la mesure du MBV n'indique de façon évidente qu'il importe de prolonger l'analyse de ce paramètre intrinsèque (Si/Al) du liant par une approche basée sur une formulation ternaire à deux pouzzolanes de réactivités pouzzolaniques différentes. En d'autres mots, en se basant uniquement sur ces valeurs obtenues, une formulation binaire pouzzolanique semble être suffisante pour l'atteinte du comportement hydrique désiré face à l'eau en phase vapeur.

La contribution de cette recherche portait essentiellement sur une meilleure compréhension d'une formulation d'un liant pour la confection d'un béton végétal de chanvre avec les ressources disponibles en Amérique du Nord. L'étude de cette formulation du liant permettra ainsi de trouver une composition optimale et locale du liant minéral pour la confection d'un béton végétal de chanvre pouvant permettre une utilisation dans la construction de bâtiment durable de façon efficace et économique.

Les retombées de cette recherche permettront enfin de promouvoir l'emploi et la demande de ce matériau écoresponsable dans l'enveloppe du bâtiment. Maintenant la formulation du liant de ce biomatériau établie, le béton végétal de chanvre permettra une alternative efficace d'isolation à faible impact sur l'environnement pour les propriétaires et les entrepreneurs en bâtiment durable au Canada.

RECOMMANDATIONS

L'enjeu premier derrière le développement des bétons végétaux demeure l'accessibilité des ressources, soit en liant sec ou en matière brute végétale. L'Europe, en particulier la France, a grandement fait avancer les connaissances en ce qui concerne les bétons végétaux de chanvre. La conception des liants formulés pour ces fins sont notamment composés de chaux hydraulique naturelle, une ressource inaccessible géologiquement en Amérique du Nord. Ce mémoire voulait répondre à cette problématique en apportant davantage de connaissances dans l'élaboration de liant purement pouzzolanique pour la confection des bétons végétaux. L'approche expérimentale s'est basée sur les connaissances théoriques des réactions pouzzolaniques à l'aide des ressources disponibles sur le continent américain. Il a été remarqué lors de l'aboutissement de cette recherche que l'optimisation uniquement des composantes chimiques massiques du liant s'est avéré être incomplet pour améliorer la cohésion et le caractère hygroscopique des bétons végétaux de chanvre finalement confectionnés.

Les perspectives de recherche pour progresser les connaissances dans le domaine des bétons végétaux de chanvre à base de chaux hydratée sont :

- 1) Investiguer une approche d'adhésion non uniquement du point de vue chimique, mais également d'une perception physique. C'est-à-dire, une approche hybride d'adhésion, soit chimique et physique, consisterait d'une part à privilégier une réaction chimique pouzzolanique en cœur du matériau tel qu'il est proposé dans ce mémoire et d'autre part à s'intéresser à un plus grand étalement granulométrique (SPAN) des particules qui compose le liant afin d'optimiser la compacité particulière de la matrice liante.
- 2) Intégration des agents de viscosité ainsi que d'autres additifs de type biopolymère agissant tels des agents de liaison physique entre les grains du liant et les particules végétales amèneraient probablement une meilleure cohésion mécanique du matériau. Toutefois, une analyse de l'impact d'un tel ajout sur l'hygroscopicité du matériau final doit être considérée afin de limiter la réduction du pouvoir de régulation de l'humidité du futur béton végétal de chanvre.

- 3) Prolonger l'étude économique du béton végétal de chanvre d'après la formulation du liant avec les ressources accessibles en Amérique de Nord. L'étude de marché permettra de mieux positionner ce matériau comparativement aux autres matériaux de construction pour l'enveloppe du bâtiment présentement sur le marché.
- 4) Approfondir l'étude de captation des GES par le chanvre au Canada pour mieux situer le béton végétal de chanvre sur le plan environnemental. Cette étude permettra également de mieux promouvoir l'acceptation d'un tel matériau dans la société et encourager davantage d'agriculteur d'initier la culture du chanvre pour des fins de construction de bâtiment.

ANNEXE I

Exemples de calculs des formulations optimisées

1. Exemple de la formulation d'un mélange pouzzolanique à un taux Ca/(Si+Al) fixe :

Tableau-A I-1 Rappel des compositions chimiques des matériaux
composant le mélange de l'exemple

Composant chimique	Étiquette	Chaux hydratée calcique	Terre diatomée White Lake
CaO	Ca	75,70%	1,27%
SiO ₂	Si	1,40%	80,00%
Al ₂ O ₃	Al	0,30%	7,86%

Détermination du pourcentage massique de chaux hydratée dans le mélange selon un rapport massique fixe $\text{Ca}/(\text{Si}+\text{Al}) = 2$ choisi aléatoirement pour déduire la proportion des constituants du mélange et tiré du Tableau du rappel des compositions chimiques des composants :

$$\frac{\text{Ca}}{(\text{Si} + \text{Al})} = \frac{\text{CaO (wt\%)}}{\text{SiO}_2 \text{ (wt\%)} + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (wt\%)}} = 2 \quad (5.1)$$

Celle-ci développée,

$$\frac{X * (\text{Ca}) + (1 - X) * (\text{Ca})}{X * (\text{Si} + \text{Al}) + (1 - X) * (\text{Si} + \text{Al})} = 2$$

$$\frac{X * (\text{CaO}) + (1 - X) * (\text{CaO})}{X * (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) + (1 - X) * (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)} = 2$$

X : Proportion en Chaux hydratée calcique

(1-X) : Proportion en Terre Diatomée White Lake

$$\frac{X * (0.757) + (1 - X) * (0.0127)}{X * (0.014 + 0.003) + (1 - X) * (0.80 + 0.0786)} = 2$$

Détermination du $X = 0,707$

Choix des proportions massiques arrondies au 5% le plus près : 70% CHX et 30% WL

Tableau-A I-2 Choix des proportions du mélange de l'exemple

	CHX	WL	Ca/(Si+Al)	Étiquette du mélange
% massique dans le mélange	70%	30%	2,0	WL-2

2. Exemple de calcul des proportions d'un mélange pouzzolanique binaire optimisé selon la consommation de la chaux libre hydratée

L'exemple suivant présente le calcul théorique de la proportion massique en métakaolin (MK) et de la chaux calcique hydratée (CHX) pour qu'une consommation totale théorique de la chaux libre hydratée survienne au cours de la cure à température ambiante selon la première équation (2.2) choisie présentée précédemment.

Calcul de la proportion des constituants de la métakaolinite (AS_2) d'après leur masse molaire:

$$\begin{aligned}
 Si &= 28,09 \text{ g} & Al &= 26,98 \text{ g} & O &= 16,0 \text{ g} \\
 Ca &= 40,08 \text{ g} & H &= 1,008 \text{ g} \\
 Al_2O_3 &= 2 \cdot Al + 3 \cdot O = 101,96 \text{ g} & SiO_2 &= Si + 2 \cdot O = 60,09 \text{ g} \\
 AS_2 &= Al_2O_3 + 2 \cdot SiO_2 = 222,14 \text{ g} \\
 \frac{Al_2O_3}{AS_2} &= 0,45899 & \frac{2 \cdot SiO_2}{AS_2} &= 0,54101
 \end{aligned}$$

On note également que $CH = Ca(OH)_2 = Ca + 2 \cdot (O + H) = 74,096 \text{ g}$

Dont la proportion en CaO se note comme $\%CaO = \frac{Ca+O}{Ca(OH)_2} = 0,757$

Tableau-A I-3 Rappel des compositions chimiques des constituants

	Metakaolin (Metapor) (Brylewska, 2018) (Ontario, CAN) %	Chaux hydratée High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN) %
SiO ₂	54,3	1,4
Al ₂ O ₃	26,7	0,3
Fe ₂ O ₃	0,4	0,2
CaO	3,1	75,7
MgO	0,6	1,0
K ₂ O	1,4	-
Na ₂ O	12,6	-
TiO ₂	-	-
Autres oxydes	-	-
LOI	-	24,1
Hydroxyde disp.	-	93,80

Calcul des proportions optimisées des constituants de chaux (CHX) et de métakaolin (MK) :

$$CH_{\text{disponible}} = CHX \cdot \text{Hydroxyde dispo} + MK \cdot \frac{\%CaO_{MK}}{\%CaO_{Ca(OH)_2}}$$

$$Al_2O_{3(\text{total})} = CHX \cdot \text{Hydroxyde dispo} \cdot \%Al_2O_{3(CHX)} + MK \cdot \%Al_2O_{3(MK)}$$

$$AS_2 = \frac{Al_2O_{2(\text{total})}}{0,45899}$$

$$CH_{\text{consommée}} = \frac{AS_2}{0,5}$$

Si $CH_{\text{consommée}} = CH_{\text{disponible}}$

Soit la résolution des deux équations qui suivent,

$$CHX \cdot \text{Hydroxyde dispo} + MK \cdot \frac{\%CaO_{MK}}{\%CaO_{Ca(OH)_2}} = \quad (5.2)$$

$$CHX \cdot \text{Hydroxyde dispo} \cdot \%Al_2O_{3(CHX)} + MK \cdot \%Al_2O_{3(MK)} \Big/ 0,45899 \Big/ 0,5$$

Ou encore celle-ci développée,

$$\text{CHX} \cdot 0,938 + \text{MK} \cdot \frac{0,031}{0,757} = \frac{\text{CHX} \cdot 0,938 \cdot 0,003 + \text{MK} \cdot 0,267}{0,45899 / 0,5}$$

$$\text{CHX} + \text{MK} = 100 \quad (5.3)$$

Résultat : CHX = 54,8% et MK = 45,2%

D'après le résultat obtenu, la proportion optimisée pour consommer la totalité de la chaux libre hydratée selon la première équation de Murat (1983) présentée précédemment est proche d'une formulation massique 50%/50% en chaux calcique-métakaolin, soit précisément 54,8% de chaux hydratée calcique (CHX) et 45,2% de métakaolin (MK).

Dans cette présente recherche, il a été décidé d'employer un métakaolin également impur (Si/Al = 2,07) qui semble être similaire à celui utilisé par Magniont (2010) lors de sa thèse nous laissant donc anticiper un comportement également similaire lors d'un dosage massique formulée optimisée avoisinant 50%/50% ou plus précisément 54,8% de chaux hydratée calcique (CHX) et 45,2% de métakaolin (MK).

3. Exemple de calcul des proportions d'un mélange pouzzolanique ternaire optimisé selon la consommation de la chaux libre hydratée et d'un ratio Si/Al variable

Mélange pouzzolanique ternaire composé de chaux hydratée calcique (CHX), de métakaolin (MK) et de terre diatomée WL. Les proportions optimisées calculées des constituants du mélange ternaire sont réalisées par exemple pour :

i) une consommation totale de la chaux libre hydratée (CH) par la métakaolinite (AS₂) selon un rapport massique Si/Al = 3,0 dans le mélange ainsi qu'un rapport massique théorique restant Ca/Si = 0 favorisant aucune formation de CSH supplémentaire;

ii) une consommation partielle de la chaux libre hydratée (CH) par la métakaolinite (AS₂) selon un rapport massique Si/Al = 3,0 initial dans le mélange ainsi qu'un rapport massique théorique restant Ca/Si = 0,83 ou 5/6 suivant la consommation totale de la métakaolinite (AS₂) favorisant la formation des CSH plus évoluée de type tobermorite;

iii) une consommation partielle de la chaux libre hydratée (CH) par la métakaolinite (AS₂) selon un rapport massique Si/Al = 3,0 initial dans le mélange ainsi qu'un rapport massique théorique restant Ca/Si = 2,0 suivant la consommation totale de la métakaolinite (AS₂) favorisant la formation des CSH moins évoluée de type jennite.

Détails de calcul pour l'optimisation des mélanges ternaires :

$$CH_{\text{disponible}} = CHX \cdot \text{Hydroxyde dispo} + MK * \frac{\%CaO_{MK}}{\%CaO_{Ca(OH)_2}} + WL * \frac{\%CaO_{WL}}{\%CaO_{Ca(OH)_2}}$$

$$Al_2O_{3(\text{total})} = CHX \cdot \text{Hydrox dispo} \cdot \%Al_2O_{3(CHX)} + MK \cdot \%Al_2O_{3(MK)} + WL \cdot \%Al_2O_{3(WL)}$$

$$AS_2 = \frac{Al_2O_{2(\text{total})}}{0,45899} \quad AS_2 = \frac{2 \cdot SiO_2}{0,54101}$$

$$CH_{\text{consommée}} = \frac{AS_2}{0,5}$$

Tableau-A I-4 Rappel des compositions chimiques des constituants

	Metakaolin (metapor) (Brylewska, 2018) (Ontario, CAN)	Terre diatomée WHITE LAKE (Oregon, US)	GGBS (Newcem, Lafarge Avril 2021) (Québec, CAN)	Chaux hydratée High Calcium Type N (Graymont - Québec, CAN)
SiO ₂	54,3	80,0	36,3	1,4
Al ₂ O ₃	26,7	7,9	10,3	0,3
Fe ₂ O ₃	0,4	2,4	0,9	0,2
CaO	3,1	1,3	43,4	75,7
MgO	0,6	0,6	6,6	1,0
K ₂ O	1,4	0,7	-	-
Na ₂ O	12,6	0,4	0,5	-
TiO ₂	-	0,4	-	-
Autres oxydes	-	-	-	-
LOI	-	-	-	24,1
Hydroxyde disp.	-	-	-	93,80%

Soit la résolution des trois équations qui suivent,

$$\frac{\text{Ca}}{\text{Si}}(\text{restant}) \quad (5.4)$$

$$= \frac{\left(\text{CHX} \cdot \text{Hydrox disp} - \frac{\left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{total})}{0,45899} \right)}{0,5} \right) \cdot \frac{\text{CaO}}{\text{Ca}(\text{OH})_2} + \text{MK} \cdot \% \text{CaO}_{\text{MK}} + \text{WL} \cdot \% \text{CaO}_{\text{WL}}}{(\text{CHX} \cdot \text{Hydrox disp} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{CHX})} + \text{MK} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{MK})} + \text{WL} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{WL})}) - \left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{total})}{0,45899} \right) \cdot 0,54101}$$

$$\frac{\text{Si}}{\text{Al}}(\text{initial}) = \frac{\text{CHX} \cdot \text{Hydrox disp} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{CHX})} + \text{MK} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{MK})} + \text{WL} \cdot \% \text{SiO}_{2(\text{WL})}}{\text{CHX} \cdot \text{Hydrox dispo} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3(\text{CHX}) + \text{MK} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3(\text{MK}) + \text{WL} \cdot \% \text{Al}_2\text{O}_3(\text{WL})} \quad (5.5)$$

$$\text{CHX} + \text{MK} + \text{WL} = 100 \quad (5.6)$$

Le détail de calcul a été présenté en employant la terre diatomée comme pouzzolane secondaire. Cette dernière peut toutefois être remplacée par une autre pouzzolane secondaire au besoin moins réactive que le métakaolin comme le laitier de haut fourneau par exemple.

ANNEXE II

Méthode et résultats de la calcination de la boue de désencrage reçue

1. Calcination de la boue de désencrage reçue

Avant la calcination des boues de désencrage reçues, un essai TGA/DTG a permis de valider les températures critiques de perte de masse ainsi que la quantité d'eau liée. La déshydroxylation de l'eau liée dans les feuillets de kaolin présent dans le matériau amorphise le matériau suivant un refroidissement rapide tel qu'une trempe à l'air le rendant ainsi potentiellement réactif de façon pouzzolanique en présence de chaux en solution pour former des CSH (Jang et al., 2018). Ces informations sont primordiales afin de bien cadrer la méthode de calcination (Tableau II.1). Suivant la figure II.1 représentant la dérivée par rapport à la température de la perte de masse des échantillons reçus, deux pertes de masse significatives ont été retrouvées à 340°C et 720°C. Ces pertes de masse sont originaires de la perte massique du carbone en CO₂ et probablement de la décarbonatation de la calcite (CaCO₃). D'après l'analyse thermogravimétrique réalisée, la perte de masse totale de la boue de désencrage est d'approximativement 75% composée essentiellement de CO₂ et d'eau interfeuillait. Un arrêt de la température de chauffe à 500°C pendant 3 h est choisi pour éliminer toute trace de matière organique. La température de chauffe finale du matériau a été fixée à 750°C pendant 2 heures afin d'être supérieure à 720°C, soit la dernière température de perte de masse soulevée.

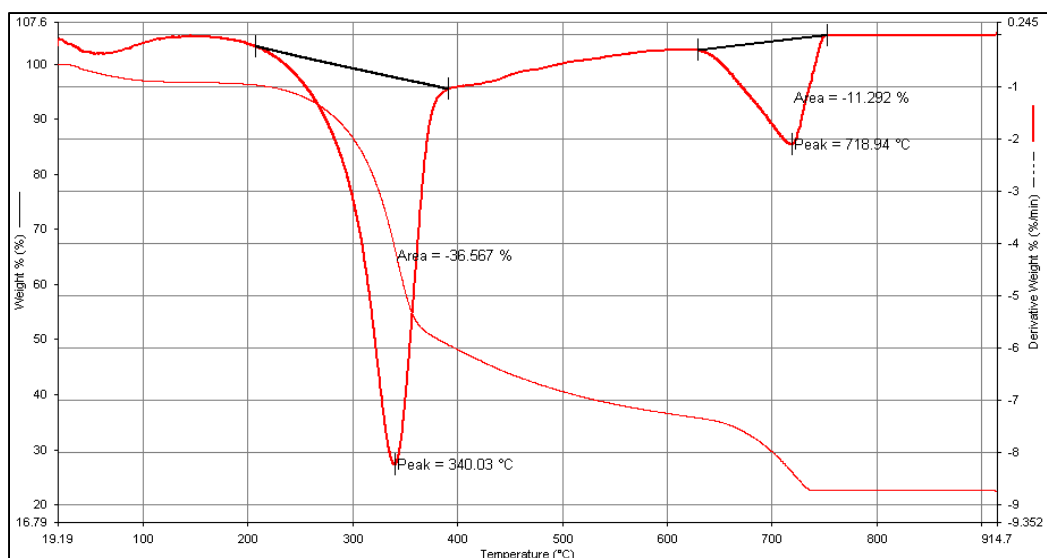


Figure-A II-1 Analyse thermogravimétrique de la boue de désencrage reçue : la perte de masse et sa dérivée de la masse en fonction de la température (TGA/DTG)



Figure-A II-2 Échantillons de boue de désencrage prêt pour l'essai de calcination; à gauche matière non broyée; à droite matière broyée

Tableau-A II-1 Méthode de calcination
de la boue de désencrage non broyée
(PS1)/broyée (PS2)

Étape de l'essai de calcination
1) 40°C-500°C (5°C/min)
2) 500°C (3h)
3) 500°C-750°C (5°C/min)
4) 750°C (2h)
5) trempe à l'air (refroidissement en 1 à 2 min)



Figure-A II-3 Échantillons suivant l'essai de calcination avant l'essai
thermogravimétrique (TGA) post-calcination

Tableau-A II-2 Perte de masse suivant la calcination (750°C - 2h) de la boue de désencrage
non broyée et broyée

	Masse initiale nette	Masse finale nette	Perte massique au feu (%)
Échantillon PS1 Non broyé	80,0g	29,1g	63,6%
Échantillon PS2 Broyé	82,7g	28,7g	65,3%

La méthode de calcination n'a pas atteint la même perte de masse qu'enregistrée initialement à l'essai TGA, soit d'approximativement 75% d'après les résultats de perte de masse du Tableau B. La présence de morceau noir carbonisé suivant l'essai de calcination renseigne sur une calcination incomplète du matériau. Afin de confirmer cette analyse, un second essai TGA/DTG a été réalisé avec les résidus des cendres de boue de désencrage (Figure II.4). Il a été soulevé une perte de masse résiduelle à 754°C d'environ 25% qui est plus élevée que la température finale de calcination. Cette perte de masse résiduelle représente approximativement 10% de la masse initialement introduite. Donc, la calcination ayant été incomplète, le matériau n'était pas à son plein potentiel de réactivité.

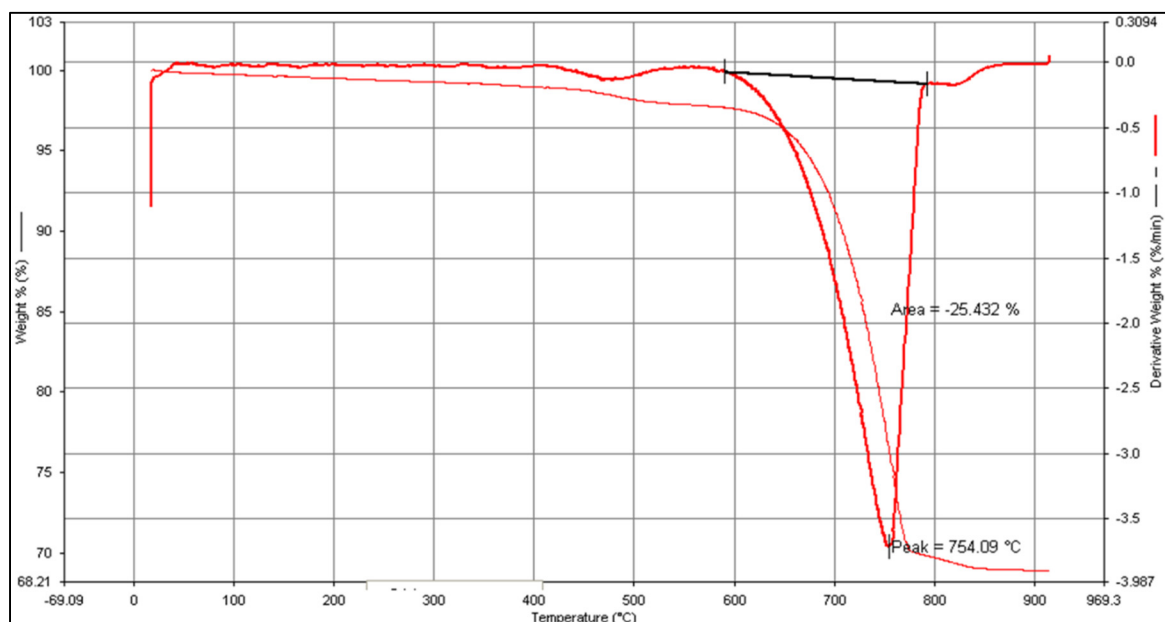


Figure-A II-4 Analyse thermogravimétrique de la boue de désencrage calcinée : la perte de masse et sa dérivée de la masse en fonction de la température (TGA/DTG)

Afin de réévaluer la réactivité pouzzolanique de la cendre de boue de désencrage, il est recommandé de refaire un essai de calcination. Ce nouvel essai suivrait la même méthode de calcination que présentée au Tableau, mais cette fois-ci d'augmenter la température finale à 800°C ou à 850°C pendant 2h au lieu de 750°C afin de s'assurer que toute la perte de masse au feu survienne. Une trempe à l'air suivant l'essai de calcination est nécessaire, car cela permettrait d'augmenter les chances de rendre le matériau amorphe et limiter la recristallisation d'avoir lieu dans sa microstructure après l'essai de calcination.

ANNEXE III

Méthodes de caractérisation des bétons végétaux de chanvre

1. Matériaux et méthodes de caractérisation

1.1. Matières premières végétales

Les matières premières végétales employées pour les fins de ce projet de recherche sont des particules de chènevotte de chanvre récoltées au Québec dans la région du Saguenay Lac-Saint-Jean. Le cultivar de chanvre utilisé est le Férimon, une espèce monoïque à double fin similaire au USO31 pour la culture de la paille et de la graine. Les plants s'élèvent entre 180 et 220 cm de hauteur. Les plants ont subi un rouissage au sol avant d'être roulés en balle. La compagnie *Agrofibre* à Lavaltrie, Québec a réalisé le défibrage de la plante avant la mise en sac final de 15 kg chacun de chènevotte tassée. Le tableau III.1 présente la composition chimique de la fibre de chanvre de la variété USO31 similaire au Férimon tiré de la littérature (Mazian, 2018).

Tableau-A III-1 Composition chimique des fibres de chanvre de la variété USO31 similaire au Férimon de Mazian (2018)

	Cellulose (m%)	Hemicelluloses (m%)	Pectine (m%)	Lignine (m%)
USO31	64-71	4-6	6-10	3-8

De façon générale, lorsqu'il est question de matériaux granulaires inorganiques, un séchage à l'étude de 105°C pendant 48h est suffisant pour sécher complètement le matériau. Suivant les travaux de Cérézo (2005) et d'Arnaud & Gourlay (2012) effectuant des essais avec le granulat chanvre, une température excédant le 80°C ferait une dégradation des fibres irréversibles qui pourrait engendrer des modifications dans les essais de caractérisation. Pour cette raison, dans le cadre de ce travail, la chènevotte reçue a été séchée à 80°C pendant 48h avant de faire les essais de caractérisation.

1.2. Masse volumique apparente tassée

La masse volumique apparente des particules de chènevotte est réalisée de la même façon que les matériaux granulaires. L'utilisation d'un récipient cylindrique normalisé de 400 cm³ et un maillet de caoutchouc sont nécessaires. Le chanvre en granule est ainsi versé sur 3 couches dans le réservoir et quelques coups de maillet sont effectués sur le cylindre entre chaque couche (Figure III.1). Le dessus du cylindre est alors arasé à la règle et enfin, une prise de mesure sur la pesée de précision 0,1g est réalisée. Un total de trois pesées est nécessaire pour compléter l'essai. La moyenne des trois pesées est ainsi retenue pour la masse volumique apparente tassée.



Figure-A III-1 Détermination de la masse volumique apparente tassée de la chènevotte dans un cylindre normalisé de 400 ml

1.3. Masse volumique absolue à l'hélium

Les granulats légers de chanvre sont des particules pouvant absorber plus de quatre fois leur poids en eau sur une période de 48h (Hustache, 2008). La chènevotte est également une particule très poreuse et ne se comporte pas comme la plupart des matériaux granulaires. Ces particules flottent sur la surface de l'eau pendant plusieurs jours voire des semaines avant de finalement se remplir d'eau et coulé au fond de l'eau. Le gonflement des particules une fois submergées sous l'eau peut entraîner des biais dans la prise de la masse volumique absolue. Pour cette raison, il a été décidé d'utiliser un pycnomètre à l'hélium commercial *Ultrapyc 5000*

de *Anton Paar* répondant à la norme ASTM D4892-14(2019)e1 pour effectuer la masse volumique absolue de la chènevotte.

L'essai de la masse volumique à l'hélium consiste à introduire dans un creuset de mesure une quantité minimale de quelques grammes de chènevotte séchée initialement à l'étuve. L'appareil procède à une injection d'un gaz inerte d'hélium à pression suffisante pour combler tous les vides d'air accessible (Figure III.2). Le volume inoccupé par le gaz est ainsi mesuré entre un creuset vide de référence et un creuset de mesure. Enfin, ayant une balance intégrée de précision 0,0001 g et un thermomètre de précision 0,001°C, l'appareil fait 10 prises de mesures totales pour afficher la moyenne des données obtenues.

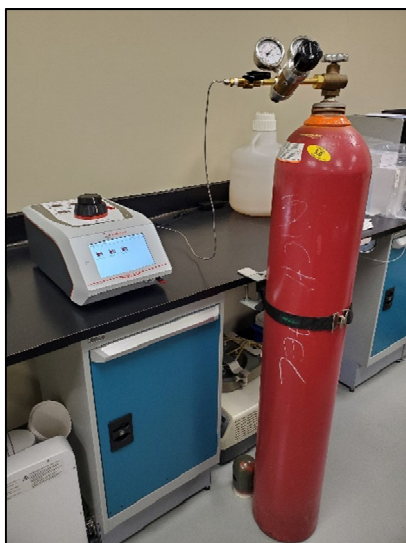


Figure-A III-2 Pycnomètre à l'hélium

1.4. Granulométrie par tamisage mécanique

Les fibres de chanvre sont des particules de forme parallélépipède irrégulier de longueur différente. La taille des particules varie en fonction du processus de défibrage mécanique des plants entiers. Généralement, les tailles des particules sont d'approximativement entre 0 et 25 mm de longueur et 2 à 5 mm de largeur (Figure III.3). Leur forme permet difficilement une caractérisation claire de leur granulométrie. La chènevotte reçue ne dépassait pas 20 mm de longueur et 5 mm de largeur (Figure III.4).

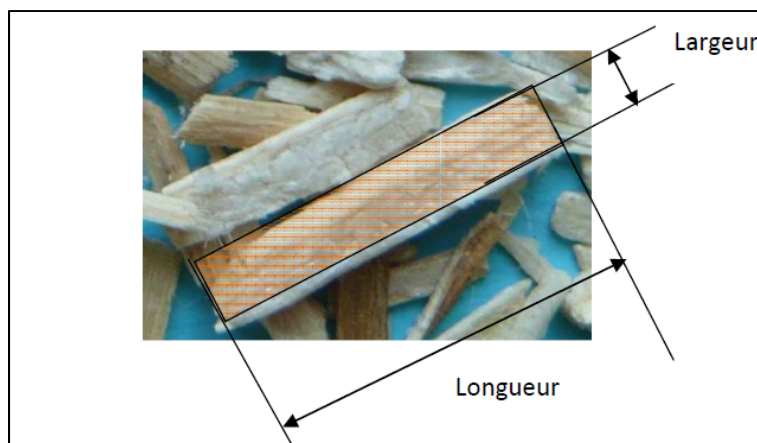


Figure-A III-3 Particule de chènevotte de Hustache (2008)



Figure-A III-4 Dimensions de la chènevotte reçue du Québec, la photo A présente un échantillonnage aléatoire et la photo B présente un échantillonnage sélectif

La façon la plus juste de procéder à la caractérisation granulométrique est d'employer une granulométrie par analyse d'image. Cette méthode permet une meilleure approximation de la géométrie des particules en comparant davantage de paramètres tels que l'aire, le périmètre, l'axe majeur et mineur, le diamètre équivalent, l'élongation de la particule et la circularité. La démarche d'analyse par image s'exécute avec le logiciel Image J ou ImageTool. Une approche par une méthode des moindres carrés permet de tracer des ellipses recouvrant la plus grande surface des objets (Igathinathane et al., 2008). Deux courbes granulométriques peuvent donc

être tracées selon les 2 axes majeurs et mineurs afin de mieux estimer la taille exacte des granulats végétaux tels que présentés dans la thèse de Nguyen (2010).

La façon qui a été préconisée dans ce travail est d'utiliser le tamisage mécanique (Figure III.5). La recherche porte davantage sur la formulation optimisée du liant que sur l'ensemble des paramètres composant le matériau. Une évaluation sommaire des granulats végétaux a donc été retenue. Les tamis retenus pour l'essai sont 10 mm; 6,3 mm; 5 mm; 2,5 mm; 1,5 mm; 0.630 mm; 0,315 mm; 0,080 mm. Deux échantillons de 100g et un échantillon de 200 g de granulats légers sont utilisés. L'essai a été programmé pour une durée de 10 min et 15 min respectivement. Suivant l'essai, chaque tamis a été pesé séparément et de façon cumulative avant de disposer les valeurs moyennes sur un graphique logarithmique.



Figure-A III-5
Granulométries par tamisage
de la chènevotte

1.5. Absorption d'eau

Le caractère hydrophile des particules de chanvre confère au matériau tout son caractère hygroscopique appréciable. L'essai d'absorption d'eau des particules végétales mesure le taux massique et la vitesse d'absorption en eau. Cet essai est principalement intéressant dans la formulation du mélange finale pour estimer la quantité d'eau de prémouillage et de gâchage.

L'essai consiste à immerger 50,0 g de chènevottes préalablement séchées à l'étuve à 80°C pendant 48h dans une chaudière d'eau à température ambiante (Figure III.6). Les fibres de chènevottes sont mises entre deux tamis 0,160 mm et 0,315 mm de laboratoire afin de limiter les pertes de fibres dans l'eau. Les tamis sont préalablement mouillés et une fois le chanvre sec introduit, ceux-ci sont plongés sous l'eau durant une durée de 1, 2, 5, 10, 30 minutes et 48h avant de retirer les tamis. À chaque retrait, suivant l'égouttement complet jusqu'à la dernière goutte et un secouage manuel, l'échantillon est pesé sur une balance de précision 0,1g. L'eau prise interparticules n'est malheureusement pas retirée totalement lors de cet essai et donc celle-ci vient majorer la masse d'eau absorbée. Cet essai est toutefois pertinent pour déterminer le caractère hydrophile appréciable des particules de chènevotte reçues.



Figure-A III-6 Essai d'absorption d'eau de la chènevotte

2. Méthode d'élaboration et de caractérisation des bétons végétaux

Les bétons de végétaux ont fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques et de thèse comme discutée précédemment. Plusieurs auteurs tels que Cérézo (2005) et Nguyen (2010) ont employé des spécimens cylindriques pour faire la caractérisation mécanique de leur béton végétal. Cependant, le béton composé de chènevotte est anisotrope d'après le sens de compactage (Mounanga et al., 2009; Nozahic, 2012). En effet, la compaction des fibres procure une direction préférentielle perpendiculairement au sens de la compaction. Or, il est difficile d'étudier les caractéristiques des éprouvettes cylindriques dans le sens perpendiculaire à la compaction. Il a donc été choisi pour cette raison d'utiliser dans cette recherche deux types d'éprouvettes prismatiques d'échelle différente afin de mieux étudier les caractéristiques dans le sens perpendiculaire au sens de la compaction.

2.1. Poutre rectangulaire

Le premier choix d'éprouvette prismatique à petite échelle s'est arrêté sur la poutre rectangulaire de dimensions normalisées de 406 mm x 76 mm x 102 mm (16 po x 3 po x 4 po) applicable pour l'essai de flexion des poutres de béton de ciment selon la norme ASTM C293-16 ainsi que la norme ASTM C78-21. Des moules en bois ont été confectionnés respectant le plus près possible ces dimensions. Afin de limiter l'adhésion du béton végétal avec le substrat de bois, une pellicule de papier recouverte de silicone est placée entre le matériau et le moule avant de bâcher.

2.1.1. Méthode de mélange et mise en moule

Le mélange des bétons végétaux fait l'objet de plusieurs recherches antérieures à savoir s'il est utile de faire un prémouillage des particules végétales avant de le mélanger avec le liant. Certains auteurs préconisent une hydratation du liant liquide avant d'introduire les granulats végétaux secs (Hirst et al., 2010; Arnaud & Gourlay, 2012). D'autres préfèrent davantage de faire un prémouillage des particules végétales afin de limiter l'absorption locale de l'eau du liant et ainsi interférer sur l'adhésion à l'interface granulat-liant (Cérézo, 2005; Nguyen, 2010; de Bruijn et al., 2009; Monreal et al., 2011). Un prémouillage des particules végétales suivi d'un malaxage à sec en introduisant le liant permet cependant un meilleur enrobage de la particule, car le liant à base de chaux vient s'accrocher à la particule végétale humide pour

réagir avec son eau interstitielle. Cette façon de faire semble celle qui porte le plus d'avantages à ce qui a trait à l'adhésion de la particule végétale et la matrice liante d'après un auteur de thèse sur l'interface granulat lignocellulosique/liant (Nozahic, 2012). Dans cette perspective, il a été choisi de réaliser un prémouillage des particules végétales. Le teneur en eau de prémouillage a été fixé à 75% en masse des particules végétales sèches améliorant ainsi la contrainte maximale de cisaillement à l'interface des particules de chanvre et de tournesol (Nozahic, 2012). Ce dosage se rapproche également de l'indice des vides des particules de chènevotte près de 84% de porosité représentant théoriquement leur capacité d'absorption d'après les recherches de quelques auteurs (Cérézo 2005; Nguyen, 2010).

Le dosage en liant dans le mélange a été fixé à un ratio massique chanvre sec/liant formulé sec égal à 2,0 en se basant sur une formulation de type dalle selon le tome 3 de référence dans le guide des bonnes pratiques de l'organisation *Construire en Chanvre*. Ce choix a été fait dans l'optique de bien percevoir les différences entre plusieurs formulations de liant à dosage optimisé. En effet, un dosage plus important en liant formulé sec dans le mélange pour des spécimens de petite taille nous informera davantage de l'impact de ces dosages et des types de matériaux employés sur les propriétés finales du biocomposite.

Un malaxeur de type robot culinaire a été employé pour le mélange des bétons végétaux. La méthode de mélange des bétons végétaux de poutre rectangulaire suit le Tableau III.2.

Tableau-A III-2 Méthode de mélange des bétons végétaux de poutre rectangulaire

Opération	Durée	Malaxeur
1. Peser des constituants en poudre du liant	-	Arrêt
2. Introduction dans la cuve les constituants en poudre	-	Arrêt
3. Malaxage à sec des constituants	4 min	En marche – Vitesse 1
4. Malaxage à sec des constituants	1 min	En marche – Vitesse 2
5. Retrait provisoire du liant sec mélangé hors de la cuve de mélange dans un grand bol	-	Arrêt
6. Introduction dans la cuve maintenant vide des particules végétales sèches	-	Arrêt

7. Malaxage à sec de foisonnement des particules végétales	15 sec	En marche – Vitesse 1
8. Introduction de l'eau de prémouillage	-	Arrêt
9. Malaxage des particules végétales humides	5 min	En marche – Vitesse 2
10. Introduction dans la cuve du liant formulé sec	-	Arrêt
11. Malaxage du liant formulé sec et des particules végétales humides	2 min	En marche – Vitesse 2
12. Raclage des contours de la cuve du liant collé	-	Arrêt
13. Introduction de l'eau de gâchage restante	-	Arrêt
14. Malaxage final des constituants	3 min	En marche – Vitesse 2
15. Validation visuelle de la consistance finale	-	Arrêt

L'appréciation générale de la consistance du mélange est réalisée à la fin du malaxage en formant une boule avec le béton végétal frais de type «balle de neige». Le mélange doit présenter une cohésion appréciable en boule de sorte qu'il est possible de la lancer dans les airs, mais doit pouvoir également se briser facilement avec un doigt enfoncer en son cœur. Cette approche de la consistance est basée sur l'appréciation générale en chantier (Stanwix et Sparrow, 2014) afin d'avoir un béton végétal se compactant aisément et ayant une tenue suffisante lors du démoulage pour continuer les travaux sans interruption.

La mise en forme des bétons de végétaux s'avère variée dans certaines études. Certains auteurs préfèrent faire un compactage par tassage manuel (Nozahic, 2012; de Bruijn et al., 2009) tandis que d'autres auteurs préfèrent appliquer une contrainte de compactage finale imposée (Cérézo, 2005; Arnaud & Gourlay, 2012). Nous opterons dans notre travail par une compaction dynamique homogène et uniforme de chaque échantillon.

La mise en forme des spécimens doit suivre une méthode fixe afin d'éviter tout biais entre les formulations. Une compaction variable manuelle peut être risquée pour de plus petits spécimens. Cela peut créer une densité hétérogène entre les différentes formulations. Pour cette raison, il a été choisi de procéder à un remplissage sur trois couches égales suivies d'une

compaction dynamique à la plaque vibrante après chaque couche à l'aide d'une masse de béton de ciment et d'acier connue pour une durée de 5 secondes (Figure III.9). Entre chaque couche, la surface de la couche précédente est raclée à l'aide d'un outil denté afin d'optimiser les liaisons entre les couches. Un total de trois (3) échantillons ont été réalisés par formulation.

Pour ce faire, lors de chaque couche de matériau, une masse connue de béton de ciment additionnée à une masse d'acier est déposée sur l'échantillon se situant sur une plaque vibrante de type *Syntron VP-51* (Figure III.8). Les spécifications de la plaque vibrante sont présentées dans le Tableau. Ensuite, une vibration à pleine amplitude sur une durée fixe de 5 secondes à 60 Hz est appliquée sur l'échantillon. Enfin, la quantité d'énergie de compaction est ainsi calculée à l'aide de l'équation adéquate tirée d'un ancien travail de recherche antérieur (Hounkponou, 2020).

$$E_{v,table} = \frac{W \cdot fr \cdot a \cdot l \cdot t}{V \cdot 10^6} \quad (5.7)$$

- ❖ $E_{v,table}$: Énergie volumique de la plaque vibrante (MJ/m³)
- ❖ W : Poids de l'échantillon (N)
- ❖ fr : Fréquence de la plaque (Hz)
- ❖ a : Amplitude de la plaque (m)
- ❖ l : Nombre de couches
- ❖ t : Temps par couche (s)
- ❖ V : Volume de l'échantillon (m³)



Figure-A III-8 Plaque vibrante Syntron VP-51 de Hounkponou (2020)

Tableau-A III-3 Spécification de la plaque vibrante Syntron VP-51 de Hounkponou (2020)

Spécifications	Valeurs
Marque et modèle	Syntron VP-51
Dimensions du plateau, mm	508 x 508
Courant, V et intensité, Amps	115 et 4.5
Fréquence, Hz	60
Coups, BPM	3600
Capacité, kg	136
Amplitude, mm	Rhéostat : 0,00 à 1,85

$$E_{v,table} = \frac{W \cdot fr \cdot a \cdot l \cdot t}{V \cdot 10^6} = \frac{40\text{kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 60\text{Hz} \cdot 0.00185\text{m} \cdot 3 \text{ couches} \cdot 5\text{s}}{(0.406\text{m} \cdot 0.076\text{m} \cdot 0.102\text{m}) \cdot 10^6} = 0.21 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

L'énergie de compaction totale est donc estimée à environ 210 kJ/m³. Il en convient que les moules utilisés étaient faits d'un matériau mou en bois et que ceux-ci n'étaient pas fixés à la plaque vibrante lors de la compaction. Donc, l'énergie réelle de compaction devrait être plus basse vu ces variables ajoutées de dissipation d'énergie. Néanmoins, l'énergie de compaction réelle est sensiblement la même pour chaque échantillon : la même méthode a été suivie par un seul et unique opérateur. Le Tableau III.4 présente la procédure de mise en moule employé pour chaque échantillon.

Tableau-A III-4 Méthode de mise en moule des bétons végétaux de poutre rectangulaire

Opération	Durée
1. Remplissage des moules au 2/3 de la hauteur à l'aide d'une cuillère (1/3 de la hauteur finale après compactage de la couche)	-
2. Mise en place du moule sur la plaque vibrante et des masses connues	-
3. Vibration du moule à l'aide de la plaque vibrante à amplitude maximale	5 sec
4. Raclage de la surface de la couche à l'aide d'un outil denté	-
5. Remplissage des moules à pleine hauteur (3/3) à l'aide d'une cuillère (2/3 de la hauteur finale après compactage de la couche)	-

6. Mise en place du moule sur la plaque vibrante et des masses connues	-
7. Vibration du moule à l'aide de la plaque vibrante à amplitude maximale	5 sec
8. Raclage de la surface de la couche à l'aide d'un outil denté	-
9. Remplissage des moules à pleine hauteur avec excès (4/3) à l'aide d'une cuillère (3/3 de la hauteur finale après compactage de la couche)	-
10. Mise en place du moule sur la plaque vibrante et des masses connues	-
11. Vibration du moule à l'aide de la plaque vibrante à amplitude maximale	5 sec
12. Démoulage des moules immédiatement en laissant le papier silicone	
13. Retrait du papier silicone de l'échantillon après 7 jours de cure	-



Figure-A III-9 Mise en place des bétons de végétaux de poutre rectangulaire

2.1.2. Méthode de conservation

Le mode de conservation des éprouvettes s'est réalisé dans une salle à température et humidité semi-contrôlée à $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $60\%\text{HR} \pm 10\%\text{HR}$ (Figure III.10). Une mesure de concentration en CO_2 de l'atmosphère ambiante dans la pièce a été réalisée afin de s'assurer d'un taux minimal de CO_2 pour favoriser la carbonatation des échantillons (Figure III.11). Il s'est avéré qu'une concentration de 510 ppm en CO_2 a été notée lors de la prise de mesure. Cette

concentration est donc réaliste avec le taux normal réel de CO_2 atmosphérique courant pouvant varier entre 350 et 800 ppm. L'environnement de cure est donc une bonne représentation de ce qu'on pourrait retrouver à l'extérieur du laboratoire.

Aucun consensus clair n'est présentement défini dans la littérature sur le meilleur mode de conservation des éprouvettes (Fédération Française du Bâtiment, 2009). Il est davantage récurrent de voir une conservation des éprouvettes dans un environnement ambiant courant autour de 20°C et 50%HR. Les essais de caractérisation des éprouvettes des bétons végétaux se sont réalisés suivant l'atteinte d'une masse volumique stabilisée, soit après une période de séchage d'au moins 60 jours.



Figure-A III-10 Conservation des éprouvettes de poutre rectangulaire



Figure-A III-11 Sondage de la concentration en CO₂ dans la salle de cure; photo A : localisation de la sonde au centre de la pièce de cure; photo B : lecture de la sonde à CO₂

2.1.3. Essai de résonance non destructif

L'essai de résonance est réalisé selon la norme ASTM C215-19. Celui-ci permet de mesurer la montée en cohésion du matériau en béton de chanvre au fil de sa cure sur plusieurs semaines. Par l'entremise d'une secousse mécanique sur une pièce métallique rigide à l'aide d'un accélérateur en forme de marteau adapté à cet essai non destructif, un détecteur à l'autre extrémité du spécimen note l'onde mécanique sortante dans le temps selon l'impact du marteau entrant. Suivant une analyse par transformée de Fourier, cette onde mécanique est convertie du domaine temporel vers le domaine fréquentiel afin de déterminer la fréquence fondamentale de résonance longitudinale du spécimen. Celui-ci évoluera dans le temps lors de la cure de l'échantillon à température ambiante (21°C) et humidité semi-contrôlée (60%HR ± 10%).

Ensuite, le module Young d'élasticité dynamique est estimé selon la fréquence de résonance, le volume et la masse de l'échantillon. Ce dernier permet ainsi de comparer l'évolution de la cure dans le temps entre les différents spécimens. Cet essai permet également de suivre le temps séchage du matériau au cours du temps par pesée périodique. Une courbe de séchage et une courbe de montée en cohésion dans le temps peuvent donc être tracées pour les fins d'analyse quantitative. L'utilisation du logiciel d'analyse intitulé «GelDegelMauricio»

développé par un stagiaire au postdoctorat Jean-Claude Carret à l'École de technologie supérieure (ÉTS) a permis de faciliter l'entrée des données des fréquences fondamentales longitudinales obtenues et leur interprétation selon la norme pour le calcul du module d'élasticité dynamique (E). La Figure III.12 représente les appareils nécessaires pour exécuter l'essai.

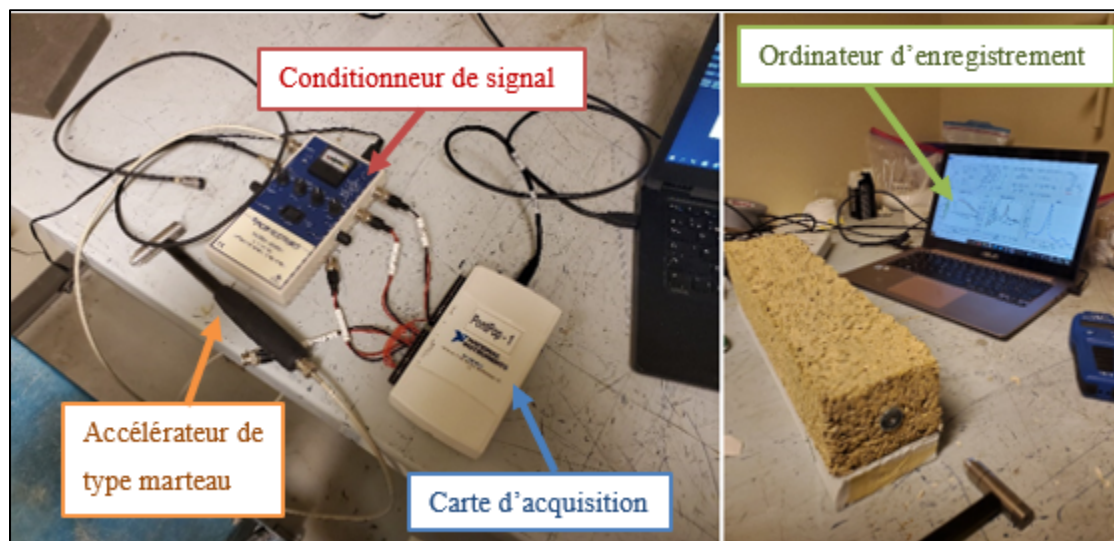


Figure-A III-12 Appareils nécessaires pour l'essai de résonance non destructif

2.1.4. Compression mécanique à la presse hydraulique

Les bétons de végétaux sont habituellement des matériaux de remplissage isolant aux propriétés thermiques et acoustiques distinctives. Leur propriété mécanique est donc nécessaire uniquement pour leur caractère autoportant du matériau. Cependant, la cohésion du matériau en cœur est un aspect très important à prendre en compte lors d'une bonne formulation d'un béton végétal. Lors de réaction cimentaire purement hydraulique sans réaction de carbonatation nécessaire au durcissement durable du matériau, l'eau est un enjeu majeur dans la réaction. Dès lors, en combinant un liant purement hydraulique tel un ciment avec les particules végétales, une compétition pour l'accès à l'eau entre le liant et les particules présente un risque accru d'une mauvaise prise en cœur. Ce phénomène se nomme le farinage (Figure III.13) et constitue un réel défi dans la conception d'un béton végétal.



Figure-A III-13 Phénomène de farinage au cœur d'un béton végétal de Hirst (2013)

L'essai de compression a été réalisé principalement pour valider les mesures de l'essai de résonance du module d'élasticité dynamique. Suivant la fin de la cure des spécimens lorsque la masse volumique commence à se stabiliser, les échantillons de poutre rectangulaire sont alors coupés en différents morceaux à l'aide d'une scie manuelle pour divers autres essais de caractérisation, dont la résistance mécanique. L'essai de compression a été réalisé de chaque côté du matériau, soit dans le sens propre du compactage et dans le sens perpendiculaire au compactage. Le matériau étant anisotrope, le comportement en compression sera également différent dans chacun des sens lors de l'essai.

La méthode d'essai est réalisée avec la même presse hydraulique que les pâtes durcies. Celle-ci diffère légèrement en réalisant une compression plus lente, la résistance en compression anticipée étant très faible. Une fois l'échantillon coupé en morceaux de forme cubique d'approximativement (102 mm x 102 mm x 76 mm) et mis en place dans l'enceinte de la presse hydraulique, une éponge est ensuite placée sur le dessus du spécimen lorsque la surface n'est pas plane afin de réduire l'aspérité de surface et des points de contact critique (Figure III.14). Le départ de force est fixé à 0,5 kN et la vitesse d'application de la force est de l'ordre de 0,1 kN/sec.

Dans le sens de compression parallèle au sens de compactage, la résistance à la compression est limitée à 5% de la déformation afin de mieux comparer les formulations entre elles. La compression dans le sens de la compaction sollicite principalement les fibres de chanvre et moins la matrice liante. En effet, la compaction entraîne une direction préférentielle des fibres et donc, celle-ci sont davantage portés à s'écraser provoquant une plus grande ductilité du matériau dans ce sens avant la rupture complète. À l'inverse, lorsque le matériau est sollicité dans le sens perpendiculaire au sens de la compaction, la reprise de la charge se fait davantage par la matrice liante qui garde les fibres collées l'une sur l'autre (Figure III.15). Ce sens de compression occasionne généralement une rupture plus fragile et moins ductile du matériau. Cela nous intéresse pour faire une meilleure évaluation de la capacité du liant à lier les particules entre elles. Un trop grand farinage au cœur du matériau provoquera une faible résistance mécanique perpendiculaire au sens de la compaction, le liant n'étant pas en mesure de bien lier les particules végétales ensemble.



Figure-A III-14 Mise en place de l'échantillon pour l'essai de compression parallèle au sens de la compaction

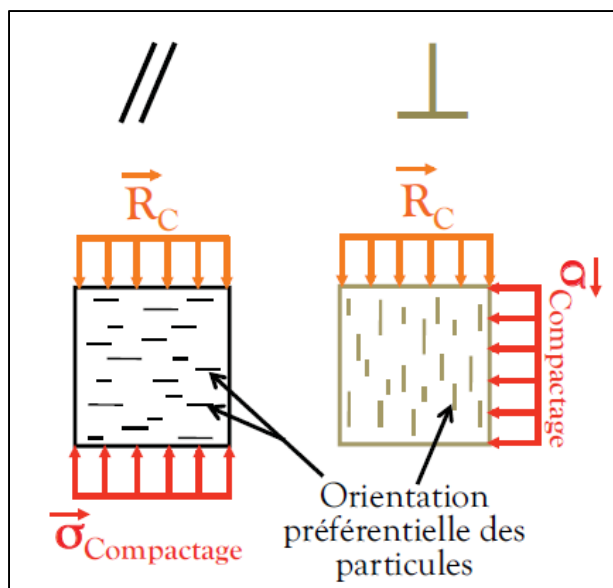


Figure-A III-15 Mode de compression (R_c) lors de l'essai selon l'orientation préférentielle des fibres suivant le sens de la contrainte de compactage (σ) de Nozahic (2012)

2.1.5. Essai de capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de suivre la progression de l'eau au travers du matériau au cours du temps dont la base en est immergée. La propriété d'absorption d'eau par capillarité est directement dépendante de la tension de surface du matériau, du réseau poral et de la dimension de la porosité ouverte. Les granulats végétaux dans le matériau sont recouverts par la matrice liante qui les lie ensemble. L'eau absorbée par capillarité emprunte donc inévitablement le réseau poral des particules végétales ainsi que les pores connectés de la matrice liante. La confection des bétons a été sujette aux mêmes dosages et à la même procédure fixe de mise en moule. Le paramètre variable demeure donc le dosage du liant et les matériaux qui le composent.

La méthode d'essai réalisé consiste à récupérer des morceaux d'approximativement (102mm x 76mm x 102 mm) coupés depuis les poutres rectangulaires en fin de cure et à masse volumique stabilisée. Ceux-ci sont ensuite initialement pesés et déposés la face sciée en dessous sur un grillage immergé dans l'eau à 5 mm de profondeur (Figure III.16) et à température ambiante $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Des pesés successives sont alors exécutés à l'instant de ($t=0$

min; 3 min; 6 min; 15 min; 30 min; 1 heure; 2 heures; 4 heures; 24 heures et 48 heures) des échantillons immergés. Suivant la dernière pesée à 48h, la hauteur de la frange capillaire est notée sur chaque face de l'échantillon à l'aide d'une règle et la moyenne des mesures nous indique la hauteur d'eau approximative dans l'échantillon en fin d'essai. Enfin, les échantillons sont ensuite mis à l'étude à 80°C pendant 72 h pour une pesée sèche finale. Cela nous informe de la teneur en eau initiale stabilisée de l'échantillon dans l'environnement ambiant à $t=0$ min avant le début de l'essai de capillarité.

Les mesures relevées lors de l'essai d'absorption permettent donc de définir le coefficient d'absorption capillaire (Ca) des différentes formulations :

$$\frac{W(t)}{S} = \frac{m(t) - m_0}{S} = Ca \cdot \sqrt{t} \quad (5.8)$$

- ❖ $W(t)$: Quantité d'eau absorbée à un instant t (g)
- ❖ S : Surface de contact avec l'eau (m^2)
- ❖ Ca : Coefficient d'absorption capillaire ($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$)



Figure-A III-16 Essai d'absorption d'eau par capillarité des bétons végétaux immergés

2.2. Bloc grand format rectangulaire

Les bétons de végétaux sont généralement des matériaux de remplissage dans les murs extérieurs. Ceux-ci compactés et décoffré rapidement par la suite offre après une cure suffisante une isolation unique en matière hydrique, phonique et thermique. Ces murs sont majoritairement massifs d'environ 300 mm (12 po) d'épaisseur. Les proportions massiques des constituants changent légèrement en réduisant le ratio de liant minéral dans le mélange comparativement aux poutres rectangulaires précédemment présentées dans ce projet de recherche. Cette dernière phase de caractérisation permet d'évaluer quelques formulations des poutres rectangulaires en affectant un facteur d'échelle plus représentatif d'une réalisation en chantier avec un ratio adapté à la formule de mur selon le tome 3 de référence dans le guide des bonnes pratiques de l'organisation *Construire en Chanvre*, soit le liant minéral évalué à 1,5 fois la masse des particules végétales sèches au lieu de 2 fois lors de la confection des poutres rectangulaires précédemment présentées.

2.2.1. Méthode de mélange et mise en moule

La méthode de mélange est légèrement différente que lors des mélanges des poutres rectangulaires. En effet, la quantité étant plus grande à mélanger, l'opération de malaxage s'est réalisée à l'aide d'une bétonnière de laboratoire à tambour classique (Figure III.17). Celle-ci étant assez grande pour contenir la quantité suffisante pour la confection d'une formulation complète. Le moule réutilisable employé lors de cette étape est fait de cinq planches de contreplaqué d'épaisseur 3/4 po ou 19,05 mm de dimension approximative (300 mm x 225 mm x 250 mm) vissée entre elles à l'aide d'étrier permettant le démoulage efficace en forme de papillon (Figure III.18). Une pellicule de papier silicone est collée du côté intérieur des planches pour limiter toute adhésion du matériau avec le moule en bois. La méthode de mélange employée suit le Tableau III.5.



Figure-A III-17 Bétonnière
de laboratoire à tambour
classique

Tableau-A III-5 Méthode de mélange des bétons végétaux de bloc rectangulaire

Opération	Durée	Malaxeur
1. Peser des constituants en poudre du liant	-	Arrêt
2. Introduction dans la cuve les constituants en poudre (robot culinaire)	-	Arrêt
3. Malaxage à sec des constituants (robot culinaire)	4 min	En marche – Vitesse 1
4. Malaxage à sec des constituants (robot culinaire)	1 min	En marche – Vitesse 2
5. Retrait provisoire du liant sec mélangé hors de la cuve de mélange dans une chaudière	-	Arrêt
6. Introduction dans la bétonnière des particules végétales sèches	-	Arrêt
7. Malaxage à sec de foisonnement des particules végétales (bétonnière)	15 sec	En marche
8. Introduction de l'eau de prémouillage (bétonnière)	-	Arrêt
9. Malaxage des particules végétales humides (bétonnière)	5 min	En marche

10. Introduction dans la bétonnière du liant formulé sec	-	Arrêt
11. Malaxage du liant formulé sec et des particules végétales humides (bétonnière)	2 min	En marche
12. Introduction de l'eau de gâchage restante (bétonnière)	-	Arrêt
13. Malaxage final des constituants	1.5 min	En marche
14. Raclage des parois de la bétonnière à la main	15 sec	Arrêt
15. Malaxage final des constituants	1.5 min	En marche
16. Validation visuelle de la consistance finale	-	Arrêt

Suivant l'étape de malaxage et la validation visuelle de la consistance, la mise en moule s'exécute en 5 couches égales de matériau dans le moule sur une hauteur finale d'approximativement 250 mm. Chaque couche a été compactée manuellement sur 2 passes de 25 à 30 coups chacun à l'aide d'un morceau de bois (38mm x 89mm x 600mm) couramment utilisé en chantier pour la compaction du béton végétal bûché. La force appliquée n'a pas été estimée. Une pression appréciable d'une hauteur d'environ 100 mm a été appliquée à chaque coup de compaction, et ce, par le même opérateur.

La figure III.19 représente schématiquement la méthode de compaction à l'aide du morceau de bois pour chaque couche de deux passes chacune, soit nommée première passe et deuxième passe. Trois échantillons ont été confectionnés par formulation dans le même moule de bois. Le démoulage s'est fait immédiatement suivant la dernière couche compactée. La conservation des éprouvettes s'est réalisée sur une période d'un minimum de 60 jours pour atteindre la stabilité massique, soit la fin du séchage. Les éprouvettes ont été conservées dans un environnement à température ambiante et humidité ambiante d'environ $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et $30\%\text{HR} \pm 10\%\text{HR}$. La grosseur des éprouvettes ne permettait pas un assèchement précoce de celles-ci et donc un environnement sec impacte moins négativement l'efficacité de la cure. L'humidité superficielle sur les éprouvettes dure assez longtemps pour qu'une carbonatation surfacique se produise. En effet, plus les éprouvettes sont de grandes dimensions, moins l'environnement impacte la cure du matériau.



Figure-A III-18 Méthode de compaction et démoulage des blocs rectangulaires

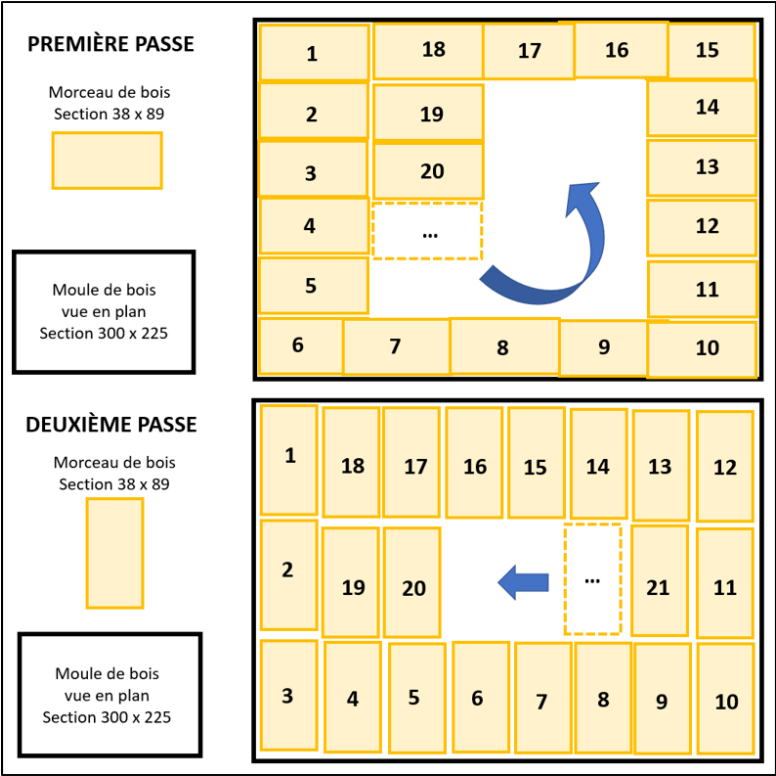


Figure-A III-19 Schéma des deux passes de compaction manuelle des blocs rectangulaire pour chacune des cinq couches

2.2.2. Porosité ouverte à l'eau par immersion

Les bétons végétaux sont des matériaux très poreux. Leur porosité est multiéchelle partant des mésopores/micropores des fibres et de la matrice liante jusqu'à des macropores entre les granulats végétaux (Nozahic, 2012; Hustache, 2008). Dans cette recherche, un essai de porosité ouverte à l'eau par immersion des certaines formulations des blocs rectangulaires a été tenté afin d'estimer le caractère poreux du matériau. Un autre essai aussi pertinent est la tomographie par image 3D. Celui-ci n'a pas été réalisé lors de cette recherche par manque de temps, mais elle constitue une bonne alternative. La méthode par immersion suit sensiblement une procédure similaire que les pâtes durcies. Cependant, les échantillons de béton végétal de forme cylindrique n'ont pas subi une succion sous vide telle que les pâtes durcies. Ils ont fait l'objet d'un trempage sous l'eau totalisant 72 h à l'aide d'une masse de béton de ciment. Ceux-ci étant moins denses que l'eau, une masse est requise pour les conserver sous l'eau (figure III.20). La masse d'acier quelconque est pesée sous l'eau de façon individuelle ($Meau_1$). Ensuite, les échantillons sont pesés successivement sous l'eau (Figure III.20) avec la même masse d'acier quelconque ($Meau_2$); nécessairement, $Meau_1 > Meau_2$ parce que l'échantillon est moins dense que l'eau. Le différentiel des 2 pesées sous l'eau représente l'effet de l'échantillon en grandeur d'eau déplacé. L'échantillon est par la suite retiré de l'eau et pesé directement sur la balance (Mair). Enfin, chaque échantillon est mis dans l'étuve à 105°C pendant 4 jours pour complètement assécher le matériau. L'équation de la porosité ouverte accessible à l'eau s'écrit sensiblement de la même façon que celle des pâtes durcies, seulement la masse d'acier quelconque est ajoutée au calcul.

$$\frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - (Meau_1 - Meau_2)} = n_{ouverte} (\%) \quad (5.9)$$



Figure-A III-20 Essai de la porosité ouverte à l'eau par immersion des bétons végétaux

2.2.3. Compression mécanique à la presse hydraulique

L'essai de compression mécanique des blocs rectangulaires suit sensiblement la même procédure que lorsqu'il est question des sections de poutres rectangulaires. La validation par facteur d'échelle est primordiale en vue d'une intégration plus importante dans un contexte réel. Les blocs rectangulaires ont été introduits dans la presse de sorte que la dimension la plus grande soit verticale augmentant ainsi l'élancement du spécimen le plus possible lors de l'essai. Deux plaques d'acier de 25 mm d'épaisseur ont été placées en dessous et au-dessus du spécimen afin de rendre la surface de contact uniforme : les dimensions des blocs rectangulaires excédaient légèrement les dimensions de la presse (Figure III.21). Une rondelle d'acier a également été déposée au-dessus de la plaque d'acier du haut pour réduire l'espace manquante. La masse d'acier placée au-dessus du matériau a été par la suite ajoutée au calcul de la contrainte finale appliquée jusqu'à la rupture.

Chaque échantillon est testé dans le sens perpendiculaire au sens de la compaction (Figure III.22). Ce choix a été fait afin de mieux caractériser la matrice liante reliant les particules ensemble. En effet, le matériau est plus fragile dans ce sens de compression et la résistance

maximale à la rupture est également réduite comparativement au sens parallèle à la compression où l'écrasement des fibres améliore la résistance ultime en compression ainsi que la ductilité du matériau (Nguyen, 2010). La presse hydraulique *Matest* utilisée lors de l'essai a été configurée sous un profil de 500 kN, un départ de force à 0,5 kN et à une vitesse d'application de la charge de 0,25 kN/sec. La vitesse d'application est un peu plus rapide comparativement à la compression des sections des poutres rectangulaires, car la section des blocs rectangulaires est plus grande.



Figure-A III-21 Mise en place des blocs rectangulaires dans la presse hydraulique



Figure-A III-22 Compression
perpendiculaire au sens de la
compaction des blocs
rectangulaires

2.2.4. Méthode de caractérisation thermique

La méthode de caractérisation thermique choisie d'un béton végétal formulé a été réalisée à l'aide de l'appareil *Trident* de *C-Therm Technologies*. La méthode utilisée suit la norme ASTM D5334-22, soit celle de l'aiguille de pénétration (TLS) émettant une source de chaleur thermique cyclique sur une profondeur de 150mm relevant ainsi, à l'aide d'un thermocouple, la conductivité thermique du matériau ou d'un matériau granulaire dans un temps donné (Figure III.23). L'aiguille est enfoncée dans le matériau préalablement percé. Le logiciel *C-Therm* de *Trident* rapporte ensuite le facteur k (W/mK) de la conductivité thermique du matériau une fois que le différentiel de température noté se stabilise selon le logarithme naturel du temps (Figure III.24). La conductivité thermique minimale mesurable lors de cet essai dans le manuel du fournisseur est de 0,1 W/mK. Or, il est anticipé que les bétons végétaux peuvent avoir une plus basse conductivité thermique que celle mesurable lors de cet essai. Il est donc possible que la valeur de conductivité thermique ne reflète pas exactement celui du matériau et demeure donc une appréciation estimée de sa valeur afin de le comparer grossièrement avec la littérature.

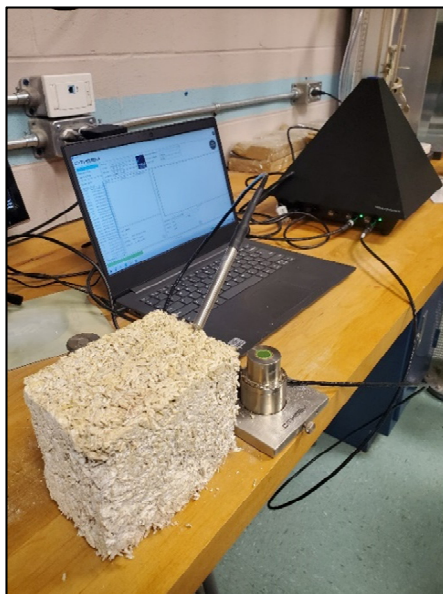


Figure-A III-23 Essai de conductivité thermique par aiguille pénétrante (TLS) sur un échantillon d'approximativement 200 mm x 175 mm x 100 mm

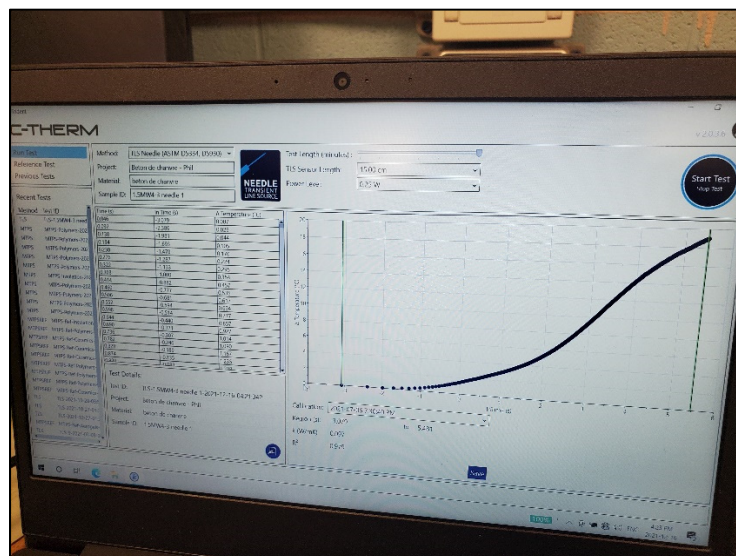


Figure-A III-24 Logiciel C-Therm d'analyse de la conductivité thermique

2.2.5. Méthode de caractérisation acoustique

L'isolation des bâtiments est essentielle pour un confort accru des usagers. Les bâtiments sont conçus pour délimiter une zone protégée de l'environnement immédiat tant au niveau thermique que sonore. Le confort acoustique des usagers est également primordial pour le bien être des occupants (World Health Organisation, 2011; Kinnane et al., 2016). L'architecture moderne accentue davantage l'utilisation d'aire de vie grande et ouverte comprenant une importante superficie de verre et de surfaces de finitions dures ou polies avec des problèmes d'exacerbation et d'inconfort sonore (Leaman & Bordass, 2001). Les matériaux de construction poreux ont la particularité d'absorber efficacement les sons et de les dissiper sous forme de chaleur (Umnova et al., 2003). Les bétons végétaux sont des matériaux fort intéressants pour leur performance acoustique d'après leur grande porosité multiéchelle passant des macropores, micropores (intra-liant), mésopores (intra-particule) et les pores interparticules (Hustache & Gurlay, 2012).

La méthode de caractérisation acoustique par perte de transmission sonore choisie suit la norme ASTM E2611-19 ainsi qu'une modification à cette méthode normalisée présentée dans une lettre expresse (Salissou et al., 2012). La méthode s'exécute à l'aide de l'instrumentation de *Mecanum* et de leur logiciel d'analyse. La méthode consiste à placer dans un tube de dimension connu un échantillon cylindrique de 98 mm de diamètre serré à l'intérieur de celui-ci. Les échantillons sont préalablement confectionnés sur mesure dans un moule Proctor chacun d'eux séparés par un papier film et compacter manuellement sur la plaque vibrante (Figure III.25). Ceux-ci ont été conservés 7 jours dans leur moule avant d'être exposés à une cure à température et à humidité ambiante semi-conditionnée dans le laboratoire jusqu'à l'essai prévu au 28^e jour de la cure où la masse des échantillons s'est stabilisée. La formulation sélectionnée et les proportions des constituants sont les mêmes qu'un des blocs rectangulaires confectionnés.



Figure-A III-25 Mise en moule des échantillons pour l'essai d'acoustique

L'échantillon est préalablement enroulé de téflon pour joindre parfaitement le diamètre exact du tube. Un collet en plastique est finalement ajouté devant l'échantillon pour éviter toute fuite d'air possible entre celui-ci et la paroi du tube (Figure III.26). Trois microphones sont utilisés pour l'essai, soit deux microphones en amont de l'échantillon du côté de la source sonore et un microphone du côté aval de l'échantillon (Figure III.27 et Figure III.28). Une source sonore est émise d'intensité de 100 dB sur une plage de fréquences fixes maximale d'après le diamètre de l'échantillon fixé à 98 mm (68 Hz à 1920 Hz) pendant un temps déterminé où les microphones enregistrent le signal sonore avant et après l'échantillon. Pour des raisons d'analyse mathématique, deux prises de mesures acoustiques sont effectuées selon deux distances différentes entre le microphone à l'aval et l'arrière de l'échantillon. La perte par transmission de l'échantillon est ainsi analysée par le logiciel et rapportée sur un graphique du nombre de décibels en fonction de la fréquence (Hz).

Par la suite, un essai d'absorption acoustique est réalisé selon la norme ASTM E1050-19 où seulement deux microphones du côté amont sont utilisés sur trois. Les mêmes trois échantillons cylindriques de 98 mm de diamètre pour l'essai de perte de transmission sonore ont été utilisés pour réaliser cet essai d'absorption sonore. Ceux-ci ont été coupés à la scie à ruban entre les essais pour voir l'impact d'une épaisseur nominale différente sur les mesures acoustiques des échantillons, soit 38 mm (1,5 po), 25 mm (1,0 po) et 16mm (5/8 po).



Figure-A III-26 Mise en place de l'échantillon dans le tube d'essai acoustique



Figure-A III-27 Tube et microphones de l'essai acoustique

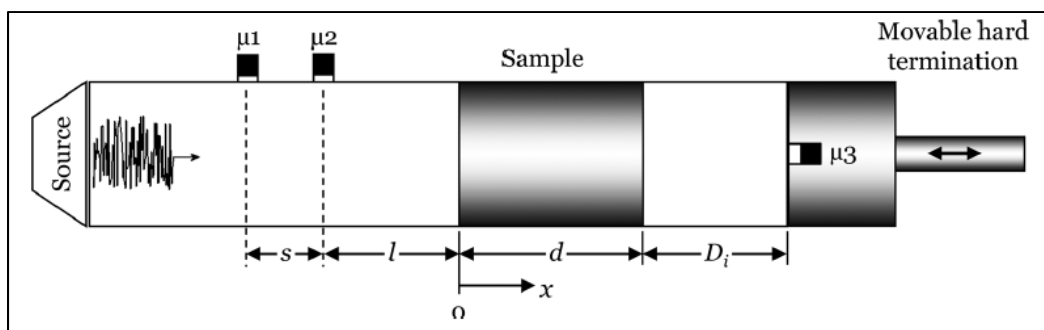


Figure-A III-28 Schéma des dispositifs dans le tube de l'essai acoustique à trois microphones de Salissou et al. (2012)

ANNEXE IV

Fiche technique Chaux calcique éteinte Graymont



Produits de chaux et granulats calcaires/Lime and Limestone products
Bureau de la région de l'est, 25 rue de Lauzon, Suite 206, Boucherville, QC, J4B 1E7, 1 450 449-2262

FICHE TECHNIQUE

CHAUX CALCIQUE ÉTEINTE

Calibre: 0 – 45 µm

Marbleton, Québec

DESCRIPTION DU PRODUIT

Fine poudre blanche obtenue de la réaction de la chaux vive et d'une quantité suffisante d'eau pour transformer l'oxyde de calcium (CaO) en hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂).

PROPRIÉTÉS CHIMIQUES TYPIQUES

(ASTM C25, C1271, C1301)

Hydroxyde de calcium tot. (Ca(OH) ₂) (%)	95.2
Hydroxyde de calcium disp (Ca(OH) ₂) (%)	93.8
Oxyde de magnésium (MgO) (%)	1.0
Silice (SiO ₂) (%)	1.4
Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃) (%)	0.2
Alumine (Al ₂ O ₃) (%)	0.3
Oxyde de manganèse (Mn) (ppm)	95
Soufre total (S) (%)	0.08
Perte au feu (%)	24.1
Carbonate de calcium (CaCO ₃) (%)	1.1
Humidité (H ₂ O) (%)	0.7

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES TYPIQUES

(ASTM C110, C204)

Masse volumique	
▲ Non tassé / tassé (kg/m ³)	352 / 545
▲ Non tassé / tassé (lb/ft ³)	22 / 37
Résidu retenu sur un tamis de 75 µm (%)	5.2
Angle de frottement interne, Φ (°)	52.1
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	25275
Surface BET (m ² /g)	16.6
Taille des pores (Å)	223
Volume des pores (cm ³ /g)	0.093
Diamètre moyen en volume, D[4,3] (µm)	14.0
Médian, D _{v50} (µm)	9.6

DONNÉES DE RÉFÉRENCE

(CRC Handbook of Chemistry and Physics, Boynton)

Densité	2.3 – 2.4
Solubilité dans l'eau (0 °C) (g/l)	1.65
pH à saturation (25 °C)	12.454
Température de décomposition (°C)	580
Dureté (Mohs)	2 – 3
Chaleur spécifique (0 °C) (cal/g·°C)	0.27
Chaleur de dissolution (18 °C) (cal/mole)	2800

GRANULOMÉTRIE-DIFFRACTION LASER

(Mode: Dispersion liquide, Format: Volume)

Diamètre (µm)	% Passant
100	100
75	100
45	95
25	85
20	79
10	52



ANSI / NSF 60
ADDITIF POUR LE TRAITEMENT DE L'EAU POTABLE Répond à la norme ANSI/AWWA B202-19
< 44 Y 4 >
DOSAGE MAXIMUM : 650 mg/l.

AVIS

Les renseignements que contient ce bulletin sont dignes de foi et sont donnés à titre d'information seulement. En conséquence, ces données ne peuvent pas être prises pour établir des spécifications.
Code de produit : 2080 (Vrac)

ANNEXE V

Protocole d'essais pour la mesure des performances seuils des bétons de chanvre



Protocoles d'essais pour la mesure des performances seuils des bétons de chanvre

1 Préambule :

Pour être conforme aux Règles professionnelles de mise en œuvre les bétons de chanvre doivent présenter des performances minimales en conditions standard (20°C – 50% HR).

Ces performances seuils sont définies pour chaque application et sont les suivantes :

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

Elles sont évaluées à **60 et 90 jours** suivant les protocoles d'essais exposés dans ce document.

Ces protocoles concernent :

- La mesure des caractéristiques mécanique
- La mesure des caractéristiques thermique

Par ailleurs, ces mesures des performances devront être réalisées par des laboratoires externes. Ces laboratoires sont identifiés et sélectionnés par Construire en Chanvre sur la base de leurs compétences et du matériel nécessaire à la réalisation des essais. La liste des laboratoires est présentée dans ce document, elle est disponible auprès de l'association Construire en Chanvre. Tout nouveau laboratoire peut faire la demande auprès de Construire en Chanvre, pour être inscrit sur cette liste.

Les couples liants-granulat ayant fait l'objet d'essais et présentant les performances seuils demandées sont présentés § 4.

2 Protocoles d'essais

Caractéristiques mécaniques :

	Fabrication des échantillons	Conservation	Préparation avant essais	Essais
Matériel	- Bétonnière, modèle - Moule 16 cm x 32 cm - Balance (e=10g) - Presse ou matériel de compactage	Enceinte climatique régulée en T et HR	- Enceinte climatique régulée en T et HR - Scie	Presse hydraulique ou électromécanique pour essais de compression conforme à l'EN 12390-4 équipée d'un capteur de force de 50 kN.
Procédure	A. <u>Fabrication du béton</u> Les constituants sont mélangés dans la bétonnière suivant les préconisations des fabricants (ordre d'introduction, dosage et temps de malaxage). B. <u>Fabrication des éprouvettes</u> Le béton de chanvre est déversé dans le moule cylindrique en 6 couches de 5cm environ chacune compactée avec une force de 0,05MPa.	Les éprouvettes filmées sont introduites dans l'enceinte régulée (20°C – 50%HR) immédiatement après leur fabrication et démoulées sur les faces inférieure et supérieure au bout de 7 jours. Elles sont ensuite maintenues dans l'enceinte de manière à assurer une ventilation sur les faces inférieure et supérieure.	A. <u>Séchage</u> Les éprouvettes démoulées sont séchées au moins 96h et au plus 144h dans une enceinte climatique à 50°C±1°C et <4% HR. Le séchage est atteint lorsque la variation de masse entre 2 pesées successives espacées de 24h est inférieure à 1%. B. <u>Surfaçage</u> Après séchage les éprouvettes sont surfacées par sciage perpendiculairement à une génératrice du cylindre	S'assurer de la propreté des plateaux de la machine et des faces d'appui des éprouvettes. Centrer les éprouvettes sur le plateau inférieur avec une précision de +/-5% du diamètre de l'éprouvette. L'essai est conduit en pilotant le déplacement de la traverse à une vitesse de 5 mm/min. A. Résistance à la compression La charge est appliquée sans choc jusqu'à la rupture de l'éprouvette. B. <u>Module d'Young</u> On applique une charge inférieure à 40% de la contrainte maximale enregistrée lors de l'essai de compression simple. Pour chaque échéance, il est conseillé de travailler sur 5 éprouvettes pour avoir 3 mesures au minimum



Valeurs paramètres	- Nom des constituants - Ordre d'introduction - Dosage - Temps de malaxage - Identification des éprouvettes	- Température : 21°C +/- 2°C - HR : 50% +/- 5%HR - Temps de conservation : 60 jours et 90 jours	- Température : 50°C +/- 1°C - HR : <4%	Vitesse de déplacement de la traverse : 5mm/min
Mesures et Calculs	On mesure la masse des échantillons après surfacage et on en déduit la masse volumique à partir du calcul du volume total.	La température et l'HR de l'enceinte est mesurée sur toute la période de conservation	Après le surfacage, les éprouvettes sont pesées et mesurées	- Aire de la section de l'éprouvette : A_c en m^2 - Hauteur nominale de l'éprouvette : h_0 en m - Courbe force en fonction du déplacement de la traverse (fréquence d'échantillonnage > à 1 Hz.) En se référant aux schémas types on détermine : - Charge maximale : F en Newton - Résistance à la compression : $f_{c,t} = F/A_c$ en MPa - Module d'Young (pente de la phase quasi-élastique de la courbe contrainte (MPa) – déformation (%) sur la partie quasi linéaire du comportement.

Contenu du rapport d'essais :

Le rapport d'essais contiendra obligatoirement :

1. L'identification de l'éprouvette
2. La date de fabrication de l'éprouvette
3. La formulation mise en œuvre (identification des matières premières utilisées, dosages)
4. Les paramètres de fabrication du béton (ordre d'introduction dans la bétonnière, temps de malaxage)
5. La masse initiale de chaque éprouvette (après fabrication)
6. La masse volumique apparente initiale de chaque éprouvette (après fabrication)
7. La masse de chaque éprouvette sèche (avant essai)



8. La masse volumique apparente de chaque éprouvette sèche (avant essai)
9. Les dimensions nominales de chaque éprouvette (h_0, A_c)
10. La date de l'essai
11. La charge maximale F en N pour chaque éprouvette
12. La résistance à la compression en MPa pour chaque éprouvette
13. La courbe d'évolution force en fonction du déplacement de la traverse de chaque éprouvette.
14. Le module d'Young en MPa pour chaque éprouvette
15. Une description de la rupture et/ou une photo de chaque éprouvette à la fin de l'essai
16. Une déclaration de la personne techniquement responsable de l'essai qu'il a été réalisé conformément au protocole exposé ci-dessus
17. La conclusion du rapport doit statuer sur la conformité ou non du couple pour l'application visée.

De plus certaines informations pourront être données à titre indicatif :

1. Les relevés de température et d'humidité relative des enceintes climatiques pour toute la période de conservation
2. Si des extensiomètres sont utilisés pour la mesure des déformations dans le tiers central de l'éprouvette on tracera les courbes contraintes-déformation avec ces mesures.
3. Une photo de chaque éprouvette à l'atteinte du sigma max

BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052>
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., & Dotelli, G. (2017). Life cycle assessment of natural building materials : The role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1051-1061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161>
- Ashby, M., & Jones, D. (2014). Matériaux - 2. Microstructures et procédés de mise en œuvre. 4^e édition. Dunod. Elsevier. Chapitre 29.
- ASTM C1506-17. (2017). Standard Test Method for Water Retention of Hydraulic Cement-Based Mortars and Plasters. New York.
- ASTM C1702-17. (2017). Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry. American Society for Testing and Materials. New York.
- ASTM C215-19. (2019). Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. New York.
- ASTM D4892-14(2019)e1. (2019). Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Helium Pycnometer Method). New York.
- ASTM D5334-22. (2022). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure. New York.
- ASTM E1050-19. (2019). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System. New York.

- ASTM E2611-19. (2019). Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method. New York.
- Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M., & Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, 85, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- Aygün, H. (2017). Characterization of Acoustical Properties of Felt and Carpet Made of Natural and Environmentally Friendly Materials. *Open Journal of Acoustics*, 07(02), 27-38. <https://doi.org/10.4236/oja.2017.72004>
- Bedlivá, H., & Isaacs, N. (2014). Hempcrete – An Environmentally Friendly Material? *Advanced Materials Research*, 1041, 83-86. Disponible au lien suivant : <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.83>
- Bharadwaj, K., Ghantous, R. M., Sahan, F., Isgor, O. B., & Weiss, W. J. (2021). Predicting pore volume, compressive strength, pore connectivity, and formation factor in cementitious pastes containing fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104113>
- Brylewska, K., Rožek, P., Król, M., & Mozgawa, W. (2018). The influence of dealumination/desilication on structural properties of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 44(11), 12853-12861. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.095>
- Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Collet, F., Bart, M., Serres, L., & Miriél, J. (2008). Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1271-1280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.018>

- Construire en Chanvre, Guide de Bonnes Pratiques, Tome 1,2 & 3. Pichon, Q. et Naumovic, J.-M., InterChanvre. (2018).
- CSA A3000:F18. (2018). Compendium des matériaux liants. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- CSA A3004-A2. (2018). Méthode d'essai pour la détermination de la densité. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- CSA A3004-C1. (2018). Méthode normalisée pour le malaxage mécanique des mortiers de ciment hydraulique et méthode d'essai pour la détermination de l'étalement. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- CSA A3004-C2. (2018). Méthode d'essai pour la détermination des résistances à la compression. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- CSA A3004-C3. (2018). Méthode d'essai pour la détermination de la rétention de l'eau du mortier de maçonnerie. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- CSA A3004-C4. (2018). Méthode d'essai pour la détermination de la teneur en air. Association canadienne de normalisation. Toronto.
- de Bruijn, P. B., Jeppsson, K.-H., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, 103(4), 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.005>
- DeSilva, P. S. (1992). Phase relations in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O relevant to metakaolin - calcium hydroxide hydration. Department of Chemistry, University of Aberdeen, Meston Walk, Old Aberdeen, AB9 2UE, Scotland
- De Spot, M. (2003). Metakaolin Study - Pre-Feasibility Review of the Potential for Developing Metakaolin from Oil Sands Operations for Use in Concrete. EcoSmart Concrete Project, Action Plan 2000 on Climate Change– Minerals and Metals, Alberta, Canada. Repéré à <http://ecosmartconcrete.com/docs/trecosmartmk.pdf>

- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. (2017). Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3655-3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>
- Dheilly, R. M., Tudo, J., Sebaïbi, Y., & Quéneudec, M. (2002). Influence of storage conditions on the carbonation of powdered $\text{Ca}(\text{OH})_2$. *Construction and Building Materials*, 16(3), 155-161. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00012-0)
- Dinh, T. M., Magniont, C., Coutand, M., & Escadeillas, G. (2015). *HEMP CONCRETE USING INNOVATIVE POZZOLANIC BINDER*. 33(2), 6.
- Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 806-812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>
- Evrard, A. (2008). *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*. 141.
- Evrard, A., & Herde, A. D. (2005). *BIOCLIMATIC ENVELOPES MADE OF LIME AND HEMP CONCRETE*. 7.
- Federation Francaise du Batiment. (2009). Construire en chanvre : Règles professionnelles d'exécution, Collection recherche developpement metier.
- Frías, M., & Cabrera, J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 561-569. Lien vers article: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00203-9)
- Gameiro, A. L., & Silva, A. S. (2012). LIME-METAKAOLIN HYDRATION PRODUCTS: A MICROSCOPY ANALYSIS. *Materiali in Tehnologije*, 4.
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2012). Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*, 535, 36-41. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.013>

- Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Santos Silva, A., Silva, V., & Velosa, A. (2014). New natural hydraulic lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 54, 378-384. Disponible au lien : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.078>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2021). Rapport N°6. Repéré à <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>
- Hirst, E. A., Walker, P., Paine, K. A., & Yates, T. (2010). *Characterisation of Low Density Hemp-Lime Composite Building Materials under Compression Loading*. 12.
- Hirst, E. (2013). *Characterisation of Hemp-Lime as Composite Building Material*. PhD Thesis, University of Bath, Bath.
- Houngponou, S. E. (2020). Renforcement des fondations avec du ciment Portland lors de la réhabilitation des chaussées rurales revêtues à faible trafic. Génie de la construction. Rapport de projet. École de technologie supérieure, Montréal.
- Hustache, Y., & Arnaud, L. (2008). Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre. *Construire en chanvre*.
- Igathinathane, C., Pordesimo, L. O., Columbus, E. P., Batchelor, W. D., & Methuku, S. R. (2008). Shape identification and particles size distribution from basic shape parameters using ImageJ. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.02.007>
- International Energy Agency IEA. (2020). Buildings, A source of enormous untapped efficiency potential. Repéré à <https://www.iea.org/topics/buildings>
- Jang, H., Lim, Y.-T., Kang, J.-H., So, S., & So, H. (2018). Influence of calcination and cooling conditions on pozzolanic reactivity of paper mill sludge. *Construction and Building Materials*, 166, 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.119>

- Khatib, J. M., & Clay, R. M. (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 19-29. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00188-1)
- Khatib, J. M., & Wild, S. (1996). Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1545-1553. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00147-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00147-0)
- Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., & Walker, R. (2016). *Acoustic Absorption of Hemp Walls with Ground Granulated Blast Slag*. 10(9), 4.
- Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment*, 93, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.011>
- Lawrence, R. M. H., Mays, T. J., Walker, P., & D'Ayala, D. (2006). Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 444(2), 179-189. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.03.002>
- Leaman, A., & Bordass, B. (2001). Assessing building performance in use 4: The Probe occupant surveys and their implications. *Building Research & Information*, 29(2), 129-143. <https://doi.org/10.1080/09613210010008045>
- Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources. Thèse de doctorat, Génie civil, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Mann, M., & Spath, P. (2001). A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant. *Clean Products and Processes*, 3(2), 81-91. Disponible au lien suivant: <https://doi.org/10.1007/s100980100109>
- Mazian, B. (2020). *Approche intégrée du procédé de rouissage des fibres de chanvre : Vers une amélioration de la qualité des intrants pour la fabrication des matériaux biocomposites*. 240.

- McFadden, T. (1988). Thermal Performance Degradation of Wet Insulations in Cold Regions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2(1), 25-34. Disponible au lien suivant: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(1988\)2:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(1988)2:1(25))
- Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., & Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.008>
- Miller, S. A. (2009). Use of Diatomaceous Earth as a Siliceous Material in the Formation of Alkali Activated Fine-Aggregate Limestone Concrete. Master of Science in Materials Science and Engineering. Drexel University. United States.
- Mirzahosseini, M., & Riding, K. A. (2015). Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). *Cement and Concrete Composites*, 56, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004>
- Mohammed, S. (2016). *Utilisation des argiles et des déchets argileux comme ajouts pouzzolaniques pour la fabrication des éco-ciments : Revue bibliographique*. 34(1), 8.
- Monreal, P., Mboumba-Mamboundou, L. B., Dheilily, R. M., & Quéneudec, M. (2011). Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 301-308. Disponible au lien suivant: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.017>
- Morsy, M. S. (2005). *EFFECT OF TEMPERATURE ON HYDRATION KINETICS AND STABILITY OF HYDRATION PHASES OF METAKAOLIN-LIME SLUDGE-SILICA FUME SYSTEM*. 5.
- Murat, M. (1983). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, 13(2), 259-266. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90109-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90109-6)

- Nguyen, T.T. (2010). Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Génie civil. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, Français. tel-01017510
- Niyigena, C. (2017). *Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne*. 226.
- Nozahic, V. (2012). Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal : application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce / chaux. (Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, France). Repéré à Semantic Scholar. (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00809816/document>)
- Passas, R. (2008). Caractérisation de la morphologie des fibres de bois. Chapitre 1 - Structures des bois. Grenoble INP-Pagora. Site internet disponible au lien suivant : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/tutoriel/morphologie-fibres-bois/page04.htm>
- Pelisser, F., Gleize, P. J. P., & Mikowski, A. (2012). Effect of the Ca/Si Molar Ratio on the Micro/nanomechanical Properties of Synthetic CSH Measured by Nanoindentation. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(32), 17219-17227. Disponible au lien: <https://doi.org/10.1021/jp302240c>
- Peyronnard, O., & Benzaazoua, M. (2011). Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for applications requiring low mechanical strength. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 22-33. Disponible au lien suivant: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.008>
- Pigeon, M. (1981). Composition et hydratation du ciment Portland. ACI - Progress in Concrete, Québec, QC, Canada. pp. 36-72.
- Piotrowski, S., & Carus, M. (2011). *Ecological benefits of hemp and flax cultivation and products*. 7.

- P. Mounanga, P. Poullain, G. Bastian, P. Glouannec et H. Khelifi, (2009). Influence de la composition et du mode de mise en oeuvre sur le développement des propriétés mécaniques du béton de chanvre, Actes du 27eme congrès de l'AUGC, Saint-Malo. 3-5 juin.
- Pontiga, F., Valverde, J. M., Moreno, H., & Duran-Olivencia, F. J. (2013). Dry gas–solid carbonation in fluidized beds of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and nanosilica/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at ambient temperature and low CO_2 pressure. *Chemical Engineering Journal*, 222, 546-552. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.067>
- Ramanathan, S., Kasaniya, M., Tuen, M., Thomas, M. D. A., & Suraneni, P. (2020). Linking reactivity test outputs to properties of cementitious pastes made with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103742>
- Rode, C., Peuhkuri, R., Hansen, K. K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J., & Ojanen, T. (2005). *NORDTEST PROJECT ON MOISTURE BUFFER VALUE OF MATERIALS*. 7.
- Rojas, M. F., & Cabrera, J. (2002). The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems. *Cement and Concrete Research*, 32(1), 133-138. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00642-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00642-1)
- Salissou, Y., Panneton, R., & Doutres, O. (2012). Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3), EL216-EL222. <https://doi.org/10.1121/1.3681016>
- Samari, M., Ridha, F., Manovic, V., Macchi, A., & Anthony, E. J. (2020). Direct capture of carbon dioxide from air via lime-based sorbents. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(1), 25-41. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9845-0>

- San Nicolas, R., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2013). Characteristics and applications of flash metakaolins. *Applied Clay Science*, 83-84, 253-262. Disponible au lien suivant: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.036>
- Sauvageon, T. (2019). *Caractérisation et valorisation de fibres de chanvre issues de sols et de matériels délaissés : Cas du traitement par explosion à la vapeur*. 298.
- Sedan, D. (2007). Étude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Chotard, T., Smith, A., Lejolly, D., Gloaguen, V., & Krausz, P. (2007). Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres. *Journal of Materials Science*, 42(22), 9336-9342. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., & Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 671-676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457-468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>
- Shi, C., & Day, R. L. (2000a). Pozzolan reaction in the presence of chemical activators Part I. Reaction kinetics. *Cement and Concrete Research*, 8.
- Shi, C., & Day, R. L. (2000b). Pozzolan reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism. *Cement and Concrete Research*, 7.
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932. Disponible au lien suivant: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>

- Siddique, R., & Bennacer, R. (2012). Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.002>
- Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete : A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400. Disponible au lien: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Silva, B. A., Ferreira Pinto, A. P., & Gomes, A. (2014). Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 72, 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.010>
- Stanwix, W. et Sparrow, A. (2014). The HempcreteBook : Designing and building with hemp-lime, Édition Green Books (livre en ligne)
- Tang, S., Wang, Y., Geng, Z., Xu, X., Yu, W., A, H., & Chen, J. (2021). Structure, Fractality, Mechanics and Durability of Calcium Silicate Hydrates. *Fractal and Fractional*, 5(2), 47. <https://doi.org/10.3390/fractalfract5020047>
- Tettey, U. Y. A., Doodoo, A., & Gustavsson, L. (2014). Primary Energy Implications of different Wall Insulation Materials for Buildings in a Cold Climate. *Energy Procedia*, 61, 1204-1207. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1056>
- Umnova, O., Attenborough, K., Standley, E., & Cummings, A. (2003). Behavior of rigid-porous layers at high levels of continuous acoustic excitation : Theory and experiment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(3), 1346-1356. <https://doi.org/10.1121/1.1603236>
- Urhan, S. (1987). Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 2 : Observations on expanded perlite aggregate concretes. *Cement and Concrete Research*, 17(3), 465-477. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90010-X)

- Vaisberg, J.M., Folkeard, P., Parsa, V., Froehlich, M., Littmann, V., Macpherson, E.A., & Scollie, S. (2017, August). Comparison of music sound quality between hearing aids and music programs. *AudiologyOnline*, Article 20872. Retrouvé au site web www.audiologyonline.com
- Wakou, B. F. N. (2014). Modélisation moléculaire de l'hydratation, de la structure, et de la mobilité des ions et de l'eau dans l'espace interfoliaire et à la surface d'une argile smectitique. 310.
- Walker, R., & Pavia, S. (2012). Impact of water retainers in the strength, drying and setting of lime hemp concrete. 6.
- Walker, R., & Pavia, S. (2014). Effect of Hemp'S Soluble Components on the Physical Properties of Hemp Concrete. *Journal of Materials Science Research*, 3(3), p12. <https://doi.org/10.5539/jmsr.v3n3p12>
- World Health Organisation. (2011) Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe.
- Wu, B., & Ye, G. (2017). Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation. *Construction and Building Materials*, 145, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.176>
- Xie, J., Chen, W., Wang, J., Fang, C., Zhang, B., & Liu, F. (2019). Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 345-359. Disponible au lien: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.311>
- Yajun, J., & Cahyadi, J. H. (2003). Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1543-1548. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00100-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00100-5)

