



HAL
open science

Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre

Tai Thu Nguyen

► **To cite this version:**

Tai Thu Nguyen. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Génie civil. Université de Bretagne Sud, 2010. Français. NNT : . tel-01017510

HAL Id: tel-01017510

<https://theses.hal.science/tel-01017510>

Submitted on 2 Jul 2014

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

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



UNIVERSITÉ
EUROPÉENNE
DE BRETAGNE

THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD

sous le sceau de L'université Européenne de Bretagne
N° d'ordre : 170

pour obtenir le titre de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE

Mention : Science pour l'Ingénieur

Spécialité : Génie Civil

Ecole doctoral SICMA

présentée par

Tai Thu NGUYEN

préparé au LIMATB (EA 4250)

Laboratoire d'Ingénierie des
MATériaux et Bretagne

Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre

Thèse soutenue le 12. Janvier 2010

devant le jury composé de :

Rapporteurs

M. Laurent ARNAUD

Enseignant chercheur, HDR

École nationale des travaux publics de l'État

M. Christophe LANOS

Professeur, Université de Rennes 1

Examineur

M. Pierre MOUNANGA

Maître de conférences, HDR, Université de Nantes

Directeurs de thèse

M. Christophe BALEY

Professeur, Université de Bretagne Sud

M. Sofiane AMZIANE

Professeur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

M. Vincent PICANDET

Maître de conférences, Université de Bretagne Sud

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mes directeurs de thèse, Christophe Baley, Sofiane Amziane et Vincent Picandet pour leur soutien, leurs conseils et leur confiance. Pendant trois ans de travail avec eux, j'ai pu apprécier leurs connaissances, leur compétence et leur gentillesse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Laurent Arnaud, Christophe Lanos et Pierre Mounanga qui ont acceptés travailler sur mon manuscrit.

Je remercie ensuite Monsieur Patrick Carré de l'Equipe Thermique et Energétique qui a bien voulu accepter de réaliser les mesures de conductivité thermique au sein de son laboratoire.

Je ne saurai oublier Sylvia Fidelius et Julien Le Guen pour avoir collaboré avec moi et m'avoir aidé dans l'avancement de mes recherches.

Je voudrais également remercier les techniciens du Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB), Messieurs Hervé Béliégou, Jean Costa, François Portanguen ainsi que Madame Françoise Peresse pour m'avoir formé et aidé à dans le montage du dispositif d'essai.

Enfin, mes derniers remerciements s'adressent à ma famille pour ses encouragements permanents et à mes amis pour leur soutien au cours de mes 3 années de travail au LIMATB.

Sommaire

Introduction.....	5
Chapitre 1. Etude bibliographique	8
1.1. Généralités sur la construction durable	8
1.1.1. Enjeux environnementaux dans le secteur de bâtiment	8
1.1.2. Matériaux à faibles impacts environnementaux	10
1.2. Chanvre industriel	12
1.2.1. Production du chanvre industriel.....	14
1.2.2. Chènevotte – Granulat du béton de chanvre	16
1.3. Liants	19
1.4. Généralités sur le béton de chanvre.....	22
1.4.1. Définition et fabrication	22
1.4.2. Impacts environnementaux	26
1.4.3. Comportement mécanique.....	27
1.4.4. Propriété thermique	33
1.5. Bilan	34
Chapitre 2. Matériaux étudiés	36
2.1. La chènevotte	37
2.1.1. Morphologie	37
2.1.2. Microstructure	38
2.1.3. Masses volumiques et porosités	40
2.1.4. Absorption d'eau	41
2.1.5. Granulométrie.....	42
2.2. Liants utilisés.....	47
2.2.1. Propriétés mécaniques.....	47
2.2.2. Propriétés thermiques.....	50
2.3. Bilan	51
Chapitre 3. Programme expérimental	52
3.1. Formulation du béton de chanvre.....	53
3.1.1. Principes.....	53
3.1.2. Calcul du dosage des composants	54
3.1.3. Récapitulation des compositions étudiées.....	55

3.2.	Mise en œuvre des échantillons.....	57
3.2.1.	Malaxage	57
3.2.2.	Eprouvettes pour l'essai de compression	59
3.2.2.1.	Fabrication par le compactage	59
3.2.2.2.	Préparation des éprouvettes avant de caractérisation en compression.....	61
3.2.3.	Découpe d'échantillons pour la mesure de la conductivité thermique.....	63
3.2.4.	Plaque pour essai de flexion.....	65
3.3.	Bilan des compositions effectuées et à tester	68
3.4.	Bilan	69
Chapitre 4.	Étude du procédé de fabrication par compactage	70
4.1.	Etude générale du compactage	71
4.1.1.	Essai de compactage du chanvre mouillé.....	71
4.1.2.	Analyse du compactage de béton à l'état frais.....	72
4.2.	Vérification de la masse volumique initiale	77
4.3.	Évolution de la masse des éprouvettes	79
4.4.	Variation du poids volumique au sein d'une éprouvette compactée.....	81
4.5.	Orientation des particules dans l'éprouvette	84
4.6.	Conclusion.....	84
Chapitre 5.	Caractérisation mécanique	86
5.1.	Essais de compression uniaxial	87
5.1.1.	Mode opératoire	87
5.1.2.	Reproductibilité des essais de compression	89
5.2.	Comportement en compression	90
5.3.	Influence des paramètres sur les caractéristiques mécaniques de compression	94
5.3.1.	Influence de la nature du liant	94
5.3.2.	Influence de la taille du granulat	97
5.3.3.	Influence des fibres végétales	100
5.3.4.	Influence du compactage.....	104
5.3.4.1.	Influence de la masse volumique du matériau	104
5.3.4.2.	Influence de la contrainte de compactage	106
5.3.4.3.	Influence du dosage en granulat	108
5.3.5.	Influence du rapport L/G.....	109
5.3.6.	Influence du rapport E/L	111
5.3.7.	Etude à rapport volumique constant.....	115
5.3.8.	Evolution de la résistance en compression en fonction du temps	116
5.4.	Essai de flexion trois points sur les plaques de béton de chanvre.....	119
5.4.1.	Mode opératoire	119
5.4.2.	Influence de la nature du granulat	121
5.4.3.	Influence du compactage.....	121
5.4.4.	Influence du rapport L/G.....	123
5.5.	Conclusion.....	124

Chapitre 6. Caractérisation thermique	126
6.1. Mesure de la conductivité thermique	126
6.2. Influence des paramètres sur la conductivité thermique	129
6.2.1. Influence de la nature du liant	129
6.2.2. Influence des fibres	130
6.2.3. Influence du compactage.....	131
6.2.4. Influence du rapport L/G.....	134
6.2.5. Influence du rapport E/L	135
6.2.6. Anisotropie thermique – Effet d’orientation des particules	136
6.3. Conclusion.....	137
Conclusions et perspectives	139
Bibliographie	143
Annexe I. Mesure de la masse volumique des solides et d’une particule de la chènevotte	148
I.1 Mesure de la masse volumique des solides	148
I.2. Mesure de la masse volumique d’une particule du chanvre.....	149
Annexe II. Influence des paramètres sur les caractéristiques mécaniques (granulat CF)	151
II.1. Influence du compactage.....	151
II.2. Influence du rapport L/G	154
II.3. Influence du rapport E/L	156
II.4. Evolution des caractéristiques mécaniques en compression en fonction du temps	158
Annexe III. Influence des paramètres sur la conductivité thermique (granulat CF)	161
III.1. Influence du compactage.....	161
III.2. Influence du rapport L/G	163
III.3. Influence du rapport E/L	164
III.4. Anisotropie thermique- Effet d’orientation des particules	164
Abstract	166
Résumé	167

Introduction

Le chanvre (*Canabis Sativa*) est une plante annuelle qui est principalement cultivée en Chine et en Europe. Sa production mondiale est estimée à environ 120000 tonnes par an et la France est le plus gros producteur en Europe avec 65000 tonnes de paille pour une surface cultivée de 10000 hectares (ADEME, 2005). Il est considéré comme un matériau “propre” en raison de ses atouts environnementaux : amélioration du sol, faible dépense énergétique pour sa production (liée au bon rendement des cultures avec peu d’utilisation d’intrants), bilan CO₂ favorable, peu ou pas de problème de gestion de fin de vie.

La tige de la plante contient à l’extérieur des fibres (tissu de soutien) et au centre du bois appelé chènevotte. Les fibres sont habituellement utilisées en papeterie, pour la réalisation de textile ou pour le renforcement de polymères. La chènevotte est un sous-produit industriel utilisable comme litière pour animaux, étant donné ses propriétés absorbantes, ou comme granulats végétal pour la confection de matériaux de construction. Dans ce cas, la chènevotte est généralement mélangée avec de la chaux et de l’eau pour former ce que l’on dénomme “béton de chanvre”. Il est à noter que le chanvre n’est utilisé dans la construction que depuis une vingtaine d’années. En France, en 1986, l’idée de l’emploi de la chènevotte comme agrégat pour la confection de béton léger a été initiée par Charles Rasetti en collaboration avec la Chanvrière de l’Aube pour la rénovation de la Maison de la Turquie à Nogent sur Seine (Bouloc *et al.*, 2006).

Actuellement, la préfabrication d’éléments de construction en béton de chanvre (brique, bloc ou parpaing) demeure artisanale. Pourtant, une forte demande sur le marché existe mais par faute de normes et de procédés de construction fiables, les concepteurs hésitent encore trop souvent à prescrire ces matériaux pour les constructions. Cependant, les procédés modernes de fabrication et l’amélioration des connaissances de leurs comportements mécaniques et physiques doivent pouvoir contribuer à l’amélioration de leurs performances.

La très faible masse volumique apparente de la chènevotte, liée à la structure alvéolaire de la tige dont elle est issue, confère au béton de chanvre une légèreté notable et une faible conductivité thermique, cependant elle entraîne une résistance mécanique, une raideur

relativement faible du matériau après durcissement par rapport aux autres matériaux de construction, par exemple la résistance à la compression de ce matériau ne dépasse guère 2 MPa dans le meilleur des cas. Cette raison fait qu'actuellement, le béton de chanvre est le plus souvent utilisé en doublage ou en remplissage pour constituer un élément de construction présentant une bonne isolation thermique et phonique sans apport structurel. La plupart des recherches publiées sont d'ailleurs orientées sur ses qualités thermique et hygrométrique qui résultent de la structure très poreuse de la chènevotte issue de la tige du chanvre.

Concernant la formulation, l'état des connaissances actuelles ne donne pas de préconisation concernant les caractéristiques de la chènevotte à utiliser pour le béton de chanvre ni de méthode établie pour son élaboration. La mise œuvre des béton de chanvre se fait souvent directement sur le chantier, soit manuellement dans des coffrages, soit par projection (Elfordy *et al.*, 2008). Ces modes de mise en œuvre ne permettent pas d'atteindre une compacité élevée ni un contrôle précis de celle-ci. De plus, les aléas de chantier, climatiques et matériels, ne permettent pas non plus de bien maîtriser la teneur en eau du matériau ni les conditions de maturation.

Il est par contre tout à fait réalisable d'appliquer un processus de préfabrication en compactant de manière significative le matériau et de contrôler précisément sa formulation puis sa maturation à court terme. Dans cette hypothèse, il peut être envisagé d'utiliser du béton de chanvre pour constituer des éléments préfabriqués (briques ou parpaings) afin de substituer les blocs de béton traditionnels par exemple. Cependant le compactage, en réduisant le volume d'air inclus dans le matériau présente probablement l'inconvénient d'augmenter sa conductivité thermique. Il convient alors d'évaluer l'intérêt du compactage du béton de chanvre en opposant les gains obtenus en résistance mécanique à ceux engendrés en conductivité thermique.

Dans le présent travail, l'utilisation du béton de chanvre est envisagée pour réaliser des éléments de construction préfabriqués, ayant un rôle structurel ou porteur tout en conservant de bonnes qualités d'isolation thermique. Cette étude s'articule autour d'un travail expérimental pluri disciplinaire.

Une revue bibliographique générale des impacts du secteur du bâtiment sur l'environnement souligne tout d'abord l'intérêt qu'il faut porter aux matériaux alternatifs de construction. Les matériaux d'origine naturelle (les végétaux, la terre cuite,...) réduisent notamment les impacts environnementaux. L'utilisation du béton de chanvre, avec ses caractéristiques mécaniques et thermiques, est introduite dans ce contexte.

Avant de caractériser le matériau étudié dans son ensemble, il apparaît ensuite incontournable d'étudier plus en détail chacun des constituants (chènevotte et chaux) pour mieux les caractériser eux-mêmes. Cette étape permet aussi de cerner les différents paramètres pouvant intervenir dans la composition.

La méthodologie de formulation et le programme expérimental de cette étude sont ensuite présentés. Par ailleurs, le procédé de compactage utilisé à la mise en œuvre, développé

spécifiquement pour cette étude, est décrit, ainsi que les caractéristiques et les spécificités des éprouvettes produites.

Enfin, les résultats du comportement mécanique des éprouvettes sont présentés et analysés. Selon la configuration et la composition, l'effet du compactage sur les caractéristiques mécaniques du matériau mature est alors discuté.

Finalement, en tenant compte de l'anisotropie des éprouvettes produites, la conductivité thermique est également étudiée et analysée en fonction des compositions et configurations. L'effet du procédé de mise en œuvre par compactage destiné à améliorer les performances du matériau peut alors être évalué sur un plan mécanique et thermique, et son intérêt pour la réalisation d'éléments de construction peut être analysé.

Une conclusion fait une synthèse générale des résultats obtenus et propose, dans le même contexte, de nouvelles perspectives de recherches sur le béton de chanvre.

Chapitre 1. Étude bibliographique

1.1. Généralités sur la construction durable

1.1.1. Enjeux environnementaux dans le secteur de bâtiment

Le secteur de la construction est toujours économiquement important pour un pays et représente un puissant levier pour les politiques de développement. Qui plus est, ce secteur impacte fortement l'environnement. Tous les activités associées au secteur de la construction (design, construction, utilisation, démolition,...etc.) affectent en effet directement ou indirectement, de façon visible ou invisible, l'environnement dans lequel elles s'effectuent.

En premier lieu, selon l'étude réalisée par Constatinos *et al.* (2007), par OECD (2003) et par Zimmermann *et al.* (2005), l'énergie dépensée liée à l'utilisation des bâtiments représente de 25 à 40 % de la consommation totale d'énergie dans les pays de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (Figure 1-1). Plus particulièrement, ce chiffre atteint 40 % pour les pays de l'Union européenne.

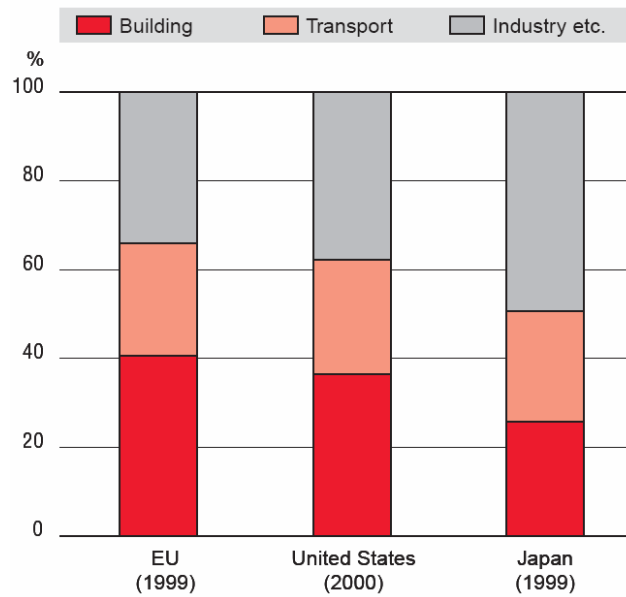


Figure 1-1 : Consommation énergétique des pays de l'OCDE (OCDE, 2003)

La consommation énergétique présentée dans ce graphique est uniquement liée à l'utilisation courante des bâtiments (chauffage, éclairage,...) et ne tient pas compte des activités de construction, de manufacture ou de transport des matériaux. Ces études montrent aussi que cette dépense énergétique est dominée prioritairement par le chauffage. Il est donc clair qu'un accroissement de la performance énergétique du bâtiment peut constituer un instrument important dans les efforts visant à économiser l'énergie. En Europe, la consommation énergétique du secteur du bâtiment a tendance de réduire. Au cours de la période 1990-2000, le nombre de logements s'est accru de 0,9 % par an, alors que la demande en énergie a été limitée à 0,4 % par an. Ce résultat est dû principalement à une meilleure conception des bâtiments, à des matériaux de construction plus performants et à des équipements plus efficaces qui ont été progressivement introduits sur le marché (Constatinos *et al.*, 07).

En deuxième lieu, les bâtiments sont responsables de plus d'un tiers des émissions de dioxyde de carbone, ce qui fait du secteur du bâtiment le deuxième plus grand émetteur de dioxyde de carbone après l'industrie (Diana *et al.*, 2007) (IPCC, 2000) (Price *et al.*, 06). Il faut noter que le dioxyde de carbone est un des principaux gaz à effet de serre responsables du réchauffement planétaire. Il est actuellement estimé que le CO₂ contribue à hauteur de 50% environ à l'effet de serre (Dincer, 1999). C'est pourquoi le secteur du bâtiment est souvent considéré comme une "mine d'or" pour réduire ce phénomène. En ce terme, des auteurs comme Constatinos *et al.*, (2007) et Gonzalez & Navarro (2006) confirment que la sélection de matériaux de construction à faible impact environnemental devrait permettre de diminuer efficacement les émissions de dioxyde de carbone.

En troisième lieu, le bâtiment qui nécessite toujours une grande consommation d'espace requiert de façon inévitable un large apport de matériau pour sa construction. Les analyses de Constatinos *et al.*, (2007) et de OECD (2003) indiquent que en Europe ce secteur utilise à lui

seul environ un tiers de la totalité des ressources naturelles consommées. En parallèle, il génère une quantité non négligeable de déchets en tout genre au cours de sa construction mais aussi de sa démolition. Il est important de réduire les tonnages de matériau utilisés et les déchets issus de la construction en favorisant l'emploi de matériaux recyclés. L'absence d'informations scientifiques sur ces matériaux constitue néanmoins un frein au développement de leur utilisation (OECD, 2003).

Les trois impacts détaillés ci – dessus sont les impacts principaux du secteur de bâtiment à l'échelle mondiale. En outre, ce secteur possède également d'autres impacts significatifs sur la qualité de l'air à intérieur et sur la santé qui sont de plus en plus considérés comme des critères importants pour la construction.

Les impacts cités sont d'abord reliés aux matériaux utilisés. Le cycle de vie des constructions a des conséquences sur l'environnement. La production de matériaux (extraction des matières premières, transformation) et leur mise en œuvre sont associées à l'épuisement des ressources naturelles et à la consommation de l'énergie. Leur utilisation est liée à la consommation énergétique, au confort et à la santé des occupants. Leur démolition engendre des déchets, voire des émissions polluantes. Ainsi, une piste pour minimiser ces impacts est de chercher et développer l'utilisation de matériaux qui sont renouvelables, consomment très peu d'énergie ou de combustibles fossiles, et qui produisent un minimum de pollution et de risques pour la santé.

1.1.2. Matériaux à faibles impacts environnementaux

En général, la construction durable a pour but d'apporter une réponse cohérente à trois questions fondamentales : confort, impact sur l'environnement et santé. En d'autres termes, elle vise à limiter les impacts de la construction ou de la réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables. Les objectifs sont clairs mais il existe de véritables défis économiques et scientifiques à relever avant de disposer de nouveaux produits permettant de réaliser le même type de construction mais avec un impact environnemental le plus faible possible (Escadeillas, 2006). Malgré ces difficultés, la construction durable devient de plus en plus incontournable dans les pays développés ; il apparaît actuellement des démarches professionnelles concernant la construction durable telles que le LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) aux Etats Unis, le BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) en Grande Bretagne ou HQE (Haute Qualité Environnementale) en France,... Cette dernière démarche, est apparue au début de la décennie 1990. Elle qualifie les pratiques consistant à concevoir et réaliser des bâtiments plus respectueux de l'environnement et de la santé et est parfois appelée éco -habitat (pour les bâtiments d'habitation), habitat/bâtiment sain ou encore habitat/bâtiment écologique (Chevalier, 2009). La démarche HQE est principalement connue pour ses 14 cibles de qualité environnementale (Tableau 1-1). Cependant, il est important de noter que la seule certification HQE n'est pas suffisante pour répondre à la question : « Qu'est ce qu'un bâtiment respectueux de l'environnement et de la santé ? ». Il faudra encore des

évaluations quantitatives basées sur des indicateurs objectifs et des méthodes scientifiques reconnues (Chevalier, 2009).

Maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur		Créer un environnement intérieur satisfaisant	
Cibles d'Écoconstruction	Relations des bâtiments avec leur environnement immédiat	Cibles de confort	Confort hygrométrique
	Choix intégré des procédés et produits de construction		Confort acoustique
	Chantier à faibles nuisances		Confort visuel
Cibles d'Écogestion	Gestion de l'énergie		Confort olfactif
	Gestion de l'eau	Cibles sanitaires	Qualité sanitaire des espaces
	Gestion des déchets d'activité		Qualité sanitaire de l'air
	Gestion de l'entretien et de la maintenance		Qualité sanitaire de l'eau

Tableau 1-1 : Les 14 cibles de qualité environnementale (QE) des bâtiments (Chevalier, 2009)

L'application de ces démarches nécessite la prise en compte pour les matériaux de construction, en plus des propriétés mécaniques, d'autres propriétés telles que l'isolation thermique et acoustique ou bien encore l'impact environnemental. De ce point de vue, il est indispensable de chercher dès aujourd'hui des solutions alternatives, car les matériaux de construction actuels ne sont pas biodégradables et posent également des préoccupations (Bevan & Woolley, 2008). En outre, le ciment, matériau de base dans la construction, présente des inconvénients importants. Tout d'abord, il nécessite une température de cuisson élevée (1450°C) atteinte en utilisant principalement des combustibles fossiles ; ce processus utilise environ 1700 MJ par tonne de Clinker (IPCC, 2001). Ainsi, le bilan des émissions gazeuses du processus de fabrication du ciment est estimé à 0,8 tonne de CO₂ équivalent par tonne de clinker ce qui fait de l'industrie cimentière une des principales industries émettrices de gaz à effet de serre (Escadeillas, 2006) (IPCC, 2001). Le béton hydraulique, obtenu à partir du ciment, d'eau et de granulats, ne possède pas non plus de bonnes capacités d'isolation thermique puisque sa conductivité thermique est d'environ 1,7 (W.m⁻¹.K⁻¹) pour une masse volumique de 2400 kg /m³. (De Herde & Evrard, 2005).

De ce fait, à l'heure actuelle, on retrouve un intérêt dans l'utilisation de matériaux d'origine naturelle tels que les végétaux (le bois, la paille, le chanvre, le lin, la terre,..), la brique de terre cuite, la laine de mouton et de nouvelles solutions alternatives (on parle d'Éco – matériaux). En ce qui concerne les végétaux, ils peuvent contribuer à limiter de manière non négligeable les émissions de gaz à effet de serre grâce à leur capacité d'emprisonnement du CO₂. De plus, l'utilisation de matériaux naturels avec des constructions innovantes permet également de réduire le coût de construction. Le faible coût de matériaux comme l'argile ou les balles de paille peut l'expliquer. Par ailleurs, ces matériaux peuvent être mis en oeuvre selon des procédés d'auto-construction, qui permettent de réduire encore le coût de construction et d'exploitation de tels bâtiments, avec une amélioration des performances environnementales (Halliday, 2008). On remarque que l'idée d'utiliser de la matière végétale dans le domaine de construction n'est pas récente : il arrive encore aujourd'hui de découvrir

dans les enduits anciens à la chaux des renforts constitués par des brins de paille. Pourtant, avec l'arrivée de nouveaux matériaux comme le béton ou les polymères, ces techniques sont peu à peu tombées en désuétude (Bouloc *et al.*, 2006). En ce qui concerne le chanvre, ce matériau présente un énorme potentiel pour contribuer à la construction, notamment en France (Halliday, 2008). Depuis les années quatre-vingt-dix, des centaines de maisons en béton de chanvre ont été construites en France (Association construire en chanvre, 2007). Cependant, il reste encore de nombreux points de blocage pour le développement de tels matériaux. Exemple extrême : les produits considérés comme éco – matériaux (terre crue, béton de chanvre,...) sont actuellement fabriqués de manière artisanale et en l'absence de référence ou de cadre de travail précis. Il n'existe donc aucune validation réglementaire pour leur utilisation. De nombreux matériaux à faibles impacts environnementaux ne sont pas encore standardisés. Or il est très important de connaître précisément leurs caractéristiques pour concevoir au mieux leur utilisation. D'un point de vue scientifique, les recherches qui restent à effectuer sur l'élaboration et l'optimisation des performances (mécanique, thermique, hygrométrie,...) de ces matériaux sont très stimulantes.

1.2. Chanvre industriel

Le chanvre dont le nom scientifique est *cannabis sativa* est une plante annuelle dioïque de la famille des Cannabacées (Figure 1-2). Le chanvre comprend trois espèces : *Cannabis sativa* – chanvre, *Cannabis indica* – chanvre, *Cannabis ruderalis* – chanvre. Parmi celles-ci, seule la première est destinée à la culture du chanvre industriel; elle se distingue par une faible teneur en tétrahydrocannabinol (THC), moins de 2 %. En général, on trouve cette espèce en Asie Centrale et particulièrement en Europe (Bouloc *et al.*, 2006).

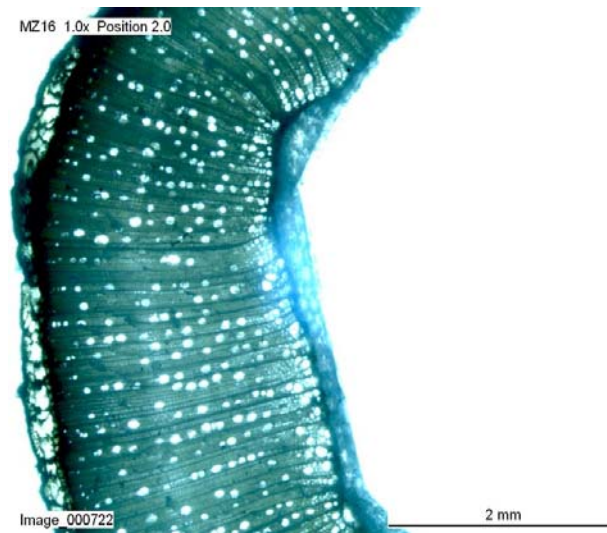


Figure 1-2 : Morphologie de plante du chanvre

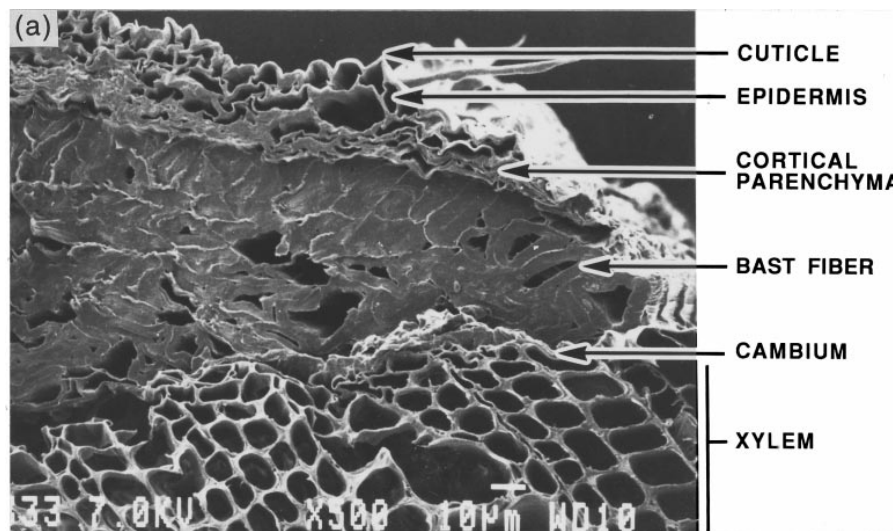
Généralement, le chanvre mesure de 2 à 4m de hauteur pour un diamètre moyen variant de 1 à 3 cm. Sa morphologie est néanmoins très dépendante de l'espèce, des conditions

environnementales et du stade développement de la plante. La croissance du chanvre est assez courte, environ 4 mois (Bouloc *et al.*, 2006).

La tige de chanvre a une surface cannelée et un diamètre croissant de l'apex vers la base. Elle est constituée d'une forte proportion de fibres intérieures plus courtes et très lignifiées qui une fois récupérées par traitement mécanique (défibrage), donnent la chènevotte. A l'extérieur, on trouve en revanche des fibres corticales très longues et peu lignifiées qui donnent la filasse. Le pourcentage de la chènevotte est compris entre 65 et 70 % en masse, et celui de la filasse entre 30 et 35 % (Bouloc *et al.*, 2006).



(a)



(b)

Figure 1-3 : Section transversale de la tige du chanvre : (a) observée par trinoculaire (Fidelious, 2008). (b) par microscopie électronique à balayage (Garcial-Jaldon *et al.*, 1998)

La tige du chanvre a la forme d'un cylindre creux. En s'intéressant à une section transversale de l'extérieur vers l'intérieur, on peut observer successivement la cuticule, les fibres et la chènevotte-partie boisée (Fidelious, 2008) (Garcial-Jaldon *et al.*, 1998) comme montrer dans les Figure 1-3a et b.

Quant à la composition chimique des constituants principaux de la tige du chanvre, dans la filasse ainsi que dans la chènevotte, ce sont la cellulose, les hémicelluloses et les lignines. Ces composants constituent de 80 à 90% de la masse de la tige sèche (Thygesen, 2006), leurs proportions sont présentées dans Tableau 1-2 :

% w/w	Cellulose	Hémicelluloses	Pectines	Lignines	Cires	Cendre	Protéines
Fibres	55	16	18	4	1	4	2
Chènevotte	44	18	4	28	1	2	3

Tableau 1-2 : Analyse des compositions chimiques des fibres et de la chènevotte d'après (Garcial-Jaldon *et al.*, 1998)

1.2.1. Production du chanvre industriel

Les deux produits principaux du chanvre industriel sont les fibres et la chènevotte et sont obtenus par défibrage de la paille de chanvre (transformation primaire). En général, une tonne de paille donne 0,3 tonne des fibres et de 0,55 à 0,65 tonne de chènevotte (Bouloc *et al.*, 2006).

FIBRE	CHÈNEVOTTE	POUDRE	CHÈNEVIS
Papier, Usages industriels en composition avec des polymères, Laine de chanvre Feutres, Géo textiles, Textile, Fils, ficelles et cordes, Etc.	Litières animales, Panneaux de particules, Paillage, Isolation, Béton de chanvre, Etc.	Litières animales après granulation Combution, Amélioration de sols, Etc	Alimentation humaine, Alimentation animale, Produits cosmétiques, Huiles pour cosmétiques, Huiles pour usages industriels, Etc.

Tableau 1-3 : Principales utilisations des composants du chanvre (Bouloc *et al.*, 2006)

Dans l'industrie, les utilisations du chanvre sont très nombreuses, elles sont détaillées dans le Tableau 1-3. Les fibres sont essentiellement utilisées pour produire de la pâte à papier (80% de la totalité des fibres produites). C'est l'application la plus importante des fibres. Elles sont

aussi utilisées dans l'automobile et dans la construction, mais à une échelle beaucoup plus réduite (ADEME, 2005). Pour la chènevotte, son application principale est la litière animale (95%) (Karus & Vogt, 2004).

Auparavant, le chanvre devait subir au préalable toute une préparation avant de défibrage : le rouissage. C'est l'une des plus vieilles biotechnologies connues et peut être décrite comme le processus de décomposition grâce auquel la pectine qui lie les fibres à la partie non fibreuse de la tige est éliminée. Le procédé le plus employé est le rouissage à l'eau. A la suite de la récolte, le chanvre est immergé dans l'eau pendant 2 ou 3 semaines. Le rouissage est suffisant quand les tiges se séparent les unes des autres sur toute la longueur de la tige. Il est important que ce processus soit arrêté à ce moment car s'il durait plus longtemps, les micro-organismes auraient le temps d'endommager les fibres, qui perdraient leur résistance. Actuellement, le chanvre subit justement le séchage avant de défibrage.

Après le séchage, la paille de chanvre intègre une chaîne de production (voir Figure 1-4) où elle est broyée soit par un broyeur à marteaux, soit par un broyeur à rouleaux afin de séparer les fibres et la chènevotte. Lors de l'étape suivante, le criblage, les secoueurs ou les tamis rotatifs vont faire tomber les particules de chènevotte dans une goulotte afin de les acheminer vers le lieu de stockage.

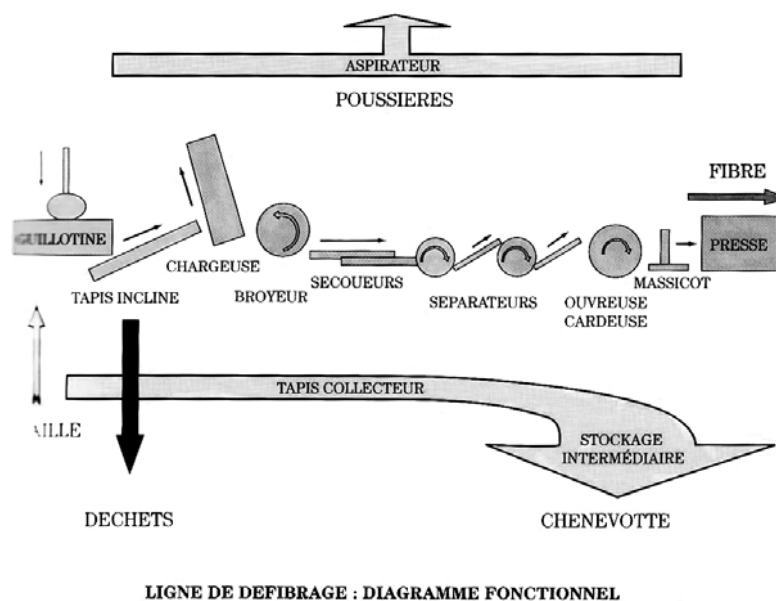
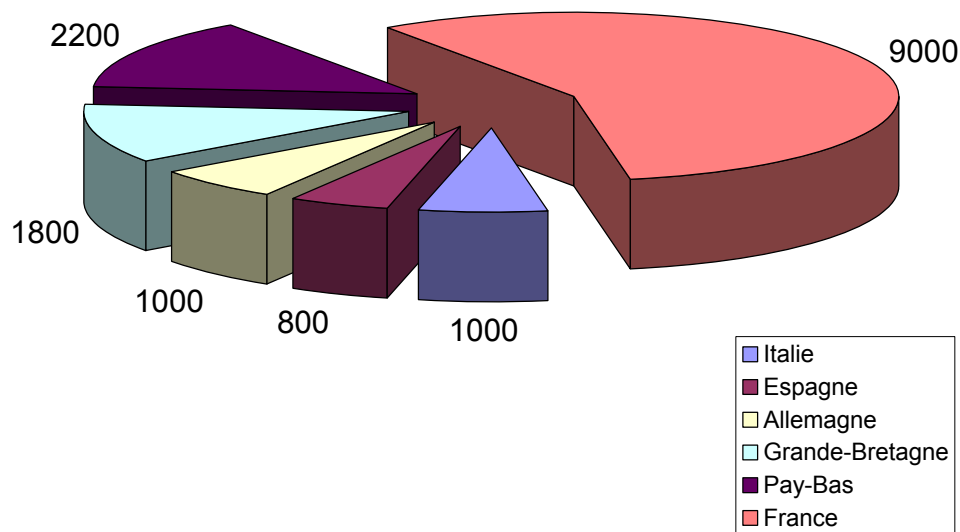
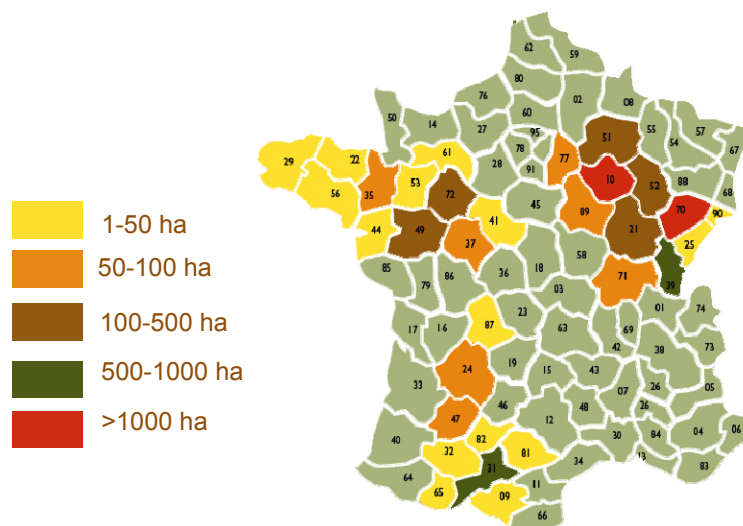


Figure 1-4 : Présentation schématique d'une ligne de défibrage [Bouloc et al' 06]

En Europe, la production de chanvre industriel est estimée de 25000 tonnes de fibres et 40000 tonnes de chènevotte par an (Figure 1-5a). On remarque également que la France, avec 10000 hectares, est le plus gros producteur du chanvre industriel en Europe (50 % de la totalité de production) (ADEME, 2005) (Karus & Vogt, 2004) et à la pointe du développement de cette filière. La culture du chanvre est répartie sur quatre bassins : la Champagne, la Franche-Comté, la région Toulousaine, et le Centre-Ouest (Figure 1-5b).



(a)



(b)

Figure 1-5 : (a) Principaux producteurs de chanvre industriel en Europe (source d'ADEME).
 (b) Production du chanvre industriel en France en 2006 (source de l'Institut Technique du Chanvre)

1.2.2. Chènevotte – Granulat du béton de chanvre

Pour la construction, le chanvre est un matériau propre à de nombreux points de vue : faible dépense énergétique pour sa culture et sa production, bilan CO₂ neutre en fin de vie, renouvelable, qualité remarquable lorsque l'on pense aux problèmes de réchauffement de la

planète, totale biodégradation à la déconstruction ; il est régulièrement disponible comme nous avons signalé dans le paragraphe précédent. En outre, le chanvre présente des intérêts agronomiques non négligeables comme une bonne tête d'assolement, une amélioration de la structure du sol et une culture qui s'effectue sans traitement ni engrais (Boutin *et al.*, 2006). Or, les applications du chanvre dans le secteur de la construction sont encore très réduites ; en Europe seul 5 % environ de la chènevotte est utilisé dans ce secteur, le reste étant utilisé pour la litière animale (Karus & Vogt, 2004).

Il y a généralement deux applications principales du chanvre dans la construction : les fibres pour la fabrication de laine isolante et la chènevotte pour le mortier du béton de chanvre. En ce qui concerne la première, il est à noter que sa résistance mécanique et sa conductivité thermique sont comparables à celles des laines minérales. La conductivité thermique des panneaux de laine de chanvre peut varier de 0,04 à 0,06 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Bouloc *et al.*, 2006) (Kymalainen & Sjoberg, 2008).

Quant à la chènevotte son utilisation en France comme agrégat pour la confection de bétons légers a été initiée en 1986 à Nogent sur Seine (Bouloc *et al.*, 2006). Les applications de ces bétons spéciaux dans la construction s'appuient sur deux de leurs caractéristiques : la légèreté et le pouvoir isolant. Les agrégats de chènevotte se présentent sous la forme de particules parallélépipédiques, leurs dimensions moyennes sont de $2\times 0,5\times 0,2\text{ cm}^3$ (Cérézo, 2005) ou $0,5\times 1\times 0,1\text{ cm}^3$ (Arnaud, 2000). Notons que dans ces études, la taille des particules est une appréciation approximative et il sera nécessaire de trouver une méthode de mesure précise de la distribution de taille des particules (Sami, 2008). Il est important de remarquer que l'apparence de la chènevotte est très variable. En fonction du procédé de fabrication, il y en a actuellement trois types : la chènevotte pure, la chènevotte mêlée à des fibres ou même le chanvre complet simplement broyé. La masse volumique en vrac de la chènevotte tourne autour de $110\text{ kg}/\text{m}^3$ et peut varier selon l'état de compactage et aussi les conditions d'ambiance (Arnaud, 2000) (Bütschi, 2004) (Cérézo, 2005). Cela signifie un arrangement peu dense des particules de chènevotte. Dans la chènevotte, l'air occupe 92% du volume total avec une répartition 1/3-2/3 entre air intra – granulaire (situé dans les particules) et air inter – granulaire (situé entre les particules). De plus, les particules de chènevotte, elles-même, ont aussi une porosité élevée, de l'ordre de 78% (Cérézo, 2005). Sa performance thermique est vérifiée par les mesures de (Cérézo, 2005) qui établit une conductivité thermique de l'ordre de $0,048\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une masse volumique apparente de $110\text{ kg}/\text{m}^3$, c'est à dire très faible par rapport aux autres matériaux de construction.

Cependant, ce type de granulat montre une énorme capacité d'absorption d'eau due à la structure capillaire des particules de la chènevotte (Figure 1-3b). Il peut ainsi absorber jusqu'à 4 fois sa masse en eau. Cette absorption est beaucoup plus importante que celle des autres granulats légers utilisés dans la construction. A titre d'exemple, la Figure 1-6 et la Figure 1-7 montrent la capacité d'absorption d'eau de chènevotte mesurée par Cérézo (2005) et celle d'argile expansée mesurée par Zang & Gjorv (1990).

Cette absorption entraîne potentiellement une mauvaise prise voire une absence de prise des liants mélangés avec la chènevotte, révélant une des difficultés majeures de la formulation du béton de chanvre (Bouloc *et al.*, 2006) (Rizza, 2005). Il est donc important de déterminer quels sont les liants compatibles avec ce type de granulat. (cf. § 1.3)

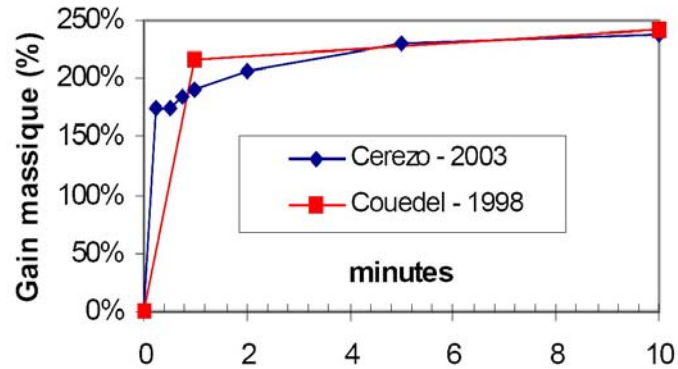


Figure 1-6 : Absorption d'eau en fonction du temps des particules sèches de chènevotte (Cérézo, 2005)

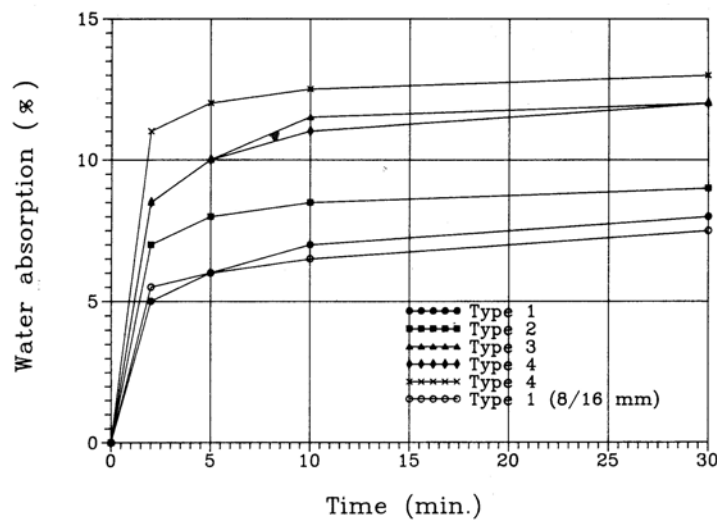


Figure 1-7 : Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Zang & Gjorv, 1990)

En fin, l'essai en compression sur un échantillon de chènevotte (160 mm de diamètre et 320 mm de hauteur) dans l'étude de Cérézo (2005) a montré une forte compressibilité de la chènevotte (Figure 1-8). L'échantillon passe en effet d'une hauteur initiale de 320 mm à moins de 85 mm à la fin de l'essai, sans parvenir à la rupture.

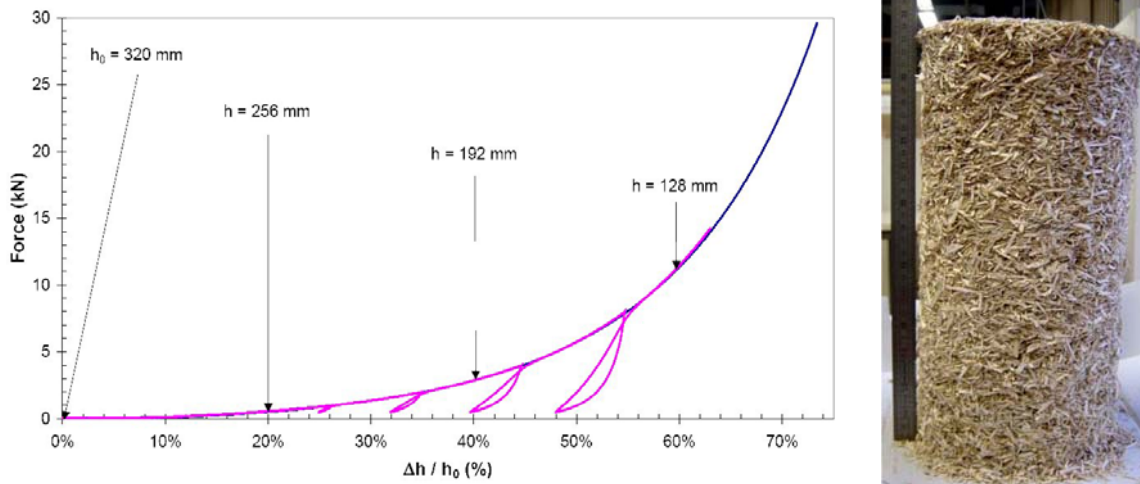


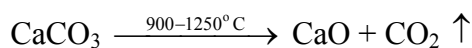
Figure 1-8 : Courbe Force – Déformation de l’essai de compression d’un échantillon du chanvre (Cérézo, 2005)

1.3. Liants

Du fait de la propriété hydrophile de la chènevotte, la question du liant à mélanger avec elle s’avère d’une grande importance mais aussi d’une grande complexité. Elle est un des axes principaux des travaux scientifiques effectués précédemment sur les bétons de chanvre. Dans le cas du béton de chanvre, le choix du liant doit répondre à trois exigences : d’une part, permettre un malaxage aisée notamment par un enrobage parfait des différents constituants, d’autre part, assurer un comportement à l’état frais permettant une mise en oeuvre correcte dans la structure, et enfin, après la prise, assurer les caractéristiques mécaniques essentielles du matériau (Bouloc *et al.*, 2006). Sur ce problème, la plupart des auteurs s’accordent à dire que des liants hydrauliques peuvent produire des résultats inacceptables. Par exemple, en association avec le ciment, seule une couche de fine épaisseur se solidifie en surface, l’intérieur de l’éprouvette restant à l’état de poudre (Cérézo, 2005) (Bevan & Woolley, 2008). Or, les résultats obtenus par Bruijn *et al.* (2009) montrent tous les deux que la résistance en compression et le module d’Young obtenus peuvent être plus élevés pour les mélanges plus riches en ciment. On remarque que les tests de Bruijn *et al.* (2009) sur les mélanges chaux–chanvre et ciment–chanvre sont réalisés à 126 jours. Les mêmes constatations peuvent être faites pour les études de Bütschi (2004), de Bütschi *et al.* (2004) et de Bütschi *et al.* (2003). Il existe donc à l’heure actuelle des contradictions frappantes sur la question du liant à utiliser dans un béton de chanvre, cette question sera abordée d’une manière détaillée dans le paragraphe 1.4.3. Pourtant, la chaux aérienne, dont les spécificités sont de ne se durcir qu’au contact du gaz carbonique en présence d’eau et de ne pas avoir besoin de beaucoup d’eau pour sa carbonatation, semble être un liant “ idéal ” pour ce type d’applications. Cependant, l’usage de la chaux aérienne seul ne se prête pas bien à la préfabrication des éléments du béton de chanvre, car ce liant se solidifie très lentement (Bütschi, 2004). De plus, l’étude de Lawrence *et al.* (2006) a montré que la carbonatation se produit très difficilement au cœur du

matériau lorsqu'on utilise ce produit. L'ajout des liants hydrauliques (ciments, chaux hydraulique, plâtre) et notamment des pouzzolanes permet d'activer la carbonatation et de favoriser un durcissement à cœur plus rapide et ainsi d'apporter des résultats plus satisfaisants (Bouloc *et al.*, 2006) (Evrard, 2002). Au fait, l'addition de pouzzolane peut augmenter significativement la résistance mécanique de la chaux (Cerny *et al.*, 2006). Les pouzzolanes sont constituées essentiellement de silice non hydraulique, mais contiennent aussi des constituants qui, à température ordinaire et en présence d'eau, peuvent se combiner avec la chaux pour donner des composés peu solubles et doués de propriétés hydrauliques (Frachebourg, 1965). Actuellement, les liants utilisés pour confectionner du béton de chanvre contiennent essentiellement de la chaux aérienne et un liant hydraulique qui est souvent la chaux hydraulique et la pouzzolane. Il s'agit de liants recommandés explicitement par les fabricants (FFB, 2007). La proportion des composants du mélange est variable en fonction du fabricant.

Quant à la chaux, sa fabrication nécessite une cuisson du calcaire entre 900°C et 1250°C (calcination). Ces températures sont suffisamment élevées pour libérer le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans le minerai.



Les sources brutes de calcaire étant variables, on peut obtenir de leur transformation deux types de chaux : la chaux aérienne et la chaux hydraulique. La première forme est obtenue lorsque le calcaire contient plus de 95 % CaCO₃. La deuxième est obtenue à partir d'un calcaire contenant de l'argile (de 4 à 16 % Al₂O₃, de 1 à 8% de Fe₂O₃) (IPCC, 2001) et qui conduit lors de la calcination, en plus de l'apparition de chaux vive, à la formation de silicates et d'aluminates de calcium qui proviennent de la combinaison d'une partie de la chaux vive avec des éléments de l'argile. Selon l'origine du calcaire et la température dans le four, la proportion de ces composants peut être variable. On remarque que contrairement au ciment, le silicate dicalcique (C₂S) est la phase hydraulique majeure de la chaux hydraulique, les autres phases telles que C₃S ou C₃A pouvant seulement être détectées en petite quantité (Lanas *et al.*, 2004) (Domede, 2006). En outre, le calcaire peut contenir de la dolomite (MgCO₃) responsable, après l'étape de calcination, de l'apparition d'oxyde de magnésium (MgO) dans le produit final (chaux dolomitique). Dans la Norme EN495-1 (AFNOR, 2003) les chaux aériennes sont classées en fonction de leur teneur en (CaO+MgO). Et les chaux hydrauliques en fonction de leur résistance à la compression comme indiqué dans le Tableau 1-4.

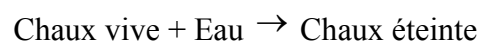
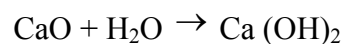
Par ailleurs, il est ajouté dans certaines chaux produites industriellement jusqu'à 20 % en masse de matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques, désignés dans la norme par la lettre Z.

Désignation	Notation	CaO+MgO	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)
Chaux calcique 90	CL 90	≥90	
Chaux calcique 80	CL 80	≥80	
Chaux calcique 70	CL 70	≥70	
Chaux dolomitiques 85	DL 85	≥85	
Chaux dolomitiques 80	DL 80	≥80	
Chaux hydraulique 2	HL 2		≥2 à ≤7
Chaux hydraulique 3,5	HL 3,5		≥3,5 à ≤10
Chaux hydraulique 5	HL 5		≥5 à ≤15
Chaux hydraulique naturelle 2	NHL 2		≥2 à ≤7
Chaux hydraulique naturelle 3,5	NHL 3,5		≥3,5 à ≤10
Chaux hydraulique naturelle 5	NHL 5		≥5 à ≤15

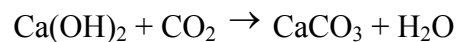
Tableau 1-4 : Classification des chaux de construction selon la norme EN 495-1 (AFNOR, 2003)

Dans le cas de la chaux aérienne, sa prise consiste à la carbonatation de la chaux vive. En fait, ce processus se décompose en deux étapes :

La première est l’extinction lorsque l’on ajoute de l’eau à la chaux vive. La réaction est fortement exothermique et la quantité de chaleur dégagée est de 115 kcal/kg de chaux vive (Ecole d’Avignon, 2003). Il faut noter que si la quantité d’eau ajoutée est juste suffisante pour obtenir cette réaction (extinction contrôlée), on obtient une poudre blanche. Au contraire, si la quantité d’eau est trop importante, on obtient une pâte blanche.



La deuxième étape de la réaction la carbonatation qui commence lors du gâchage de la chaux éteinte avec l’eau et le granulat. La carbonatation de l’hydroxyde de calcium au contact du CO₂ de l’air conduit à la formation de carbonate de calcium (la prise aérienne).



La Figure 1-9 présente le cycle de la chaux qui consiste d’abord en la cuisson du calcaire pour former la chaux vive et à la carbonatation de la chaux éteinte pour reprendre sa forme originale durcie (calcaire).

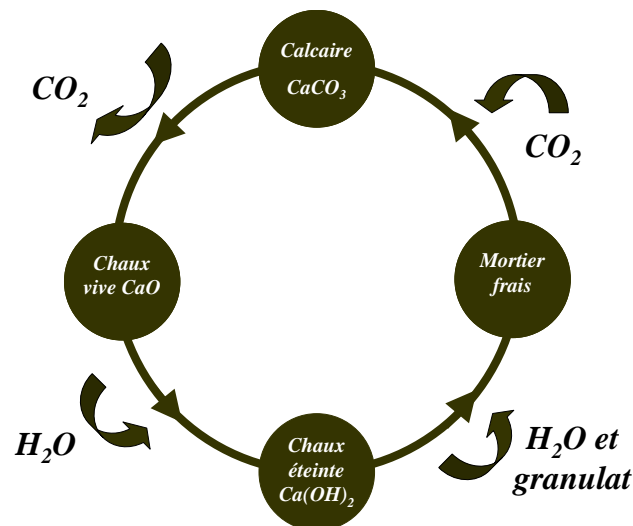


Figure 1-9 : Cycle de la chaux

Cette carbonatation se produit très lentement, car elle repose sur la diffusion du CO₂ à l'intérieur de la matière. Selon les études de Lawrence *et al.* (2006), après 180 jours, le pourcentage de chaux non carbonatée peut atteindre 40 à 50 %.

Dans le cas de la chaux hydraulique, elle présente une double prise (Ecole d'Avignon, 2003). Tout d'abord, il se produit une hydratation des silicates qui concerne essentiellement le silicate dicalcique C₂S même si d'autres phases peuvent se transformer en moindre quantité. Les produits de cette hydratation sont des hydrates insolubles (CSH) qui confèrent au liant un caractère hydraulique. Il en résulte un durcissement de la pâte.



Ensuite, au contact avec l'air humide, la chaux continue sa prise aérienne grâce à la carbonatation de l'hydroxyde de calcium pour redonner du carbonate de calcium.

Cependant la chaux hydraulique a aussi des cinétiques de prise et de durcissement très lentes en comparaison de celles des liants hydrauliques. Lanas *et al.* (2004) montrent que sa résistance mécanique ne cesse de s'accroître jusqu'à 180 jours.

1.4. Généralités sur le béton de chanvre

1.4.1. Définition et fabrication

Dans la construction, le béton de chanvre est considéré comme un nouvel Éco- matériau car il ne fait objet de recherches scientifiques que depuis une vingtaine d'années. D'une manière générale, le béton et le mortier de chanvre sont obtenus en mélangeant la chènevotte avec un

liant à base de chaux et d'eau. La variation des proportions entre la chènevotte et le liant permettent d'obtenir des matériaux ayant différentes caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques, couvrant ainsi plusieurs domaines d'applications dans la construction : chapes d'égalisation sur plancher, dalles de béton léger, remplissage ou doublage d'ossature bois, murs banchés, blocs préfabriqués...

Actuellement, pour faciliter l'utilisation du béton de chanvre, quatre types de mélange sont définis en faisant principalement varier le dosage en liant. Leur dénomination reflète l'usage pour lequel ils sont le plus couramment utilisés, "Toit", "Sol", "Mur", "Enduit". Leur composition, et leur mise en œuvre sont présentées d'une manière détaillée dans les règles professionnelles d'exécution du béton de chanvre (Association construire en chanvre, 2007).

Le mélange "Toit" se présente comme une sorte de stabilisé de chènevotte, il y a peu de liant. Il est très isolant mais peu résistant. Sa densité apparente est d'environ 250 kg/m³.

Le mélange "Sol" permet de réaliser les couches d'isolation ou les dalles d'étage. Sa densité apparente est de l'ordre de 500 kg/m³.

Le mélange "Mur" est né d'un compromis entre la résistance mécanique et l'isolation thermique. Il a des densités apparentes d'environ 420 kg/m³.

Le mélange "Enduit" se caractérise par une forte teneur en liant, sa densité est autour de 800 kg/m³.

Le Tableau 1-5 présente des exemples de compositions pour ces types de mélange.

	Chanvre (kg/m ³)	Liant (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)
Toit	100	100	200
Sol	100	275	500
Mur	100	220	350
Enduit	100	800	500

Tableau 1-5 : Dosage pour différentes applications du béton de chanvre (Association construire en chanvre, 2007)

En ce qui concerne le mur, il existe différentes techniques pour la mise en œuvre d'un mur de béton de chanvre :

La première porte généralement le nom de "banchage sur ossature en bois". Le béton de chanvre est alors utilisé en remplissage de la paroi avec une ossature porteuse (Figure 1-10). N'étant pas porteur, le béton de chanvre est manuellement versé et compacté dans une structure porteuse en bois, par la technique dite du banchage. Evidemment, avec telle opération, le matériau est peu compacté. Généralement le béton de chanvre utilisé pour le mur possède une masse volumique apparente voisine de 420 kg /m³.



Figure 1-10 : Banchage du béton de chanvre (Bevan & Woolley, 2008)

La deuxième technique consiste à mettre en place du béton de chanvre par projection grâce à une machine sur une banche. Le principe est illustré dans la Figure 1-11; un pré-mélange sec de la chaux et de la chènevotte est réalisé à l'air dans un tuyau et l'eau pulvérisée est ajouté juste avant la sortie du tuyau. En fonction de la distance de projection, on peut obtenir des bétons avec des masses volumiques et des caractéristiques mécaniques et thermiques différentes (Elfordy *et al.*, 2007). En générale, cette technique récente est adaptée au grand projet où l'accélération de construction est nécessaire, elle nécessite des matériels spéciaux.

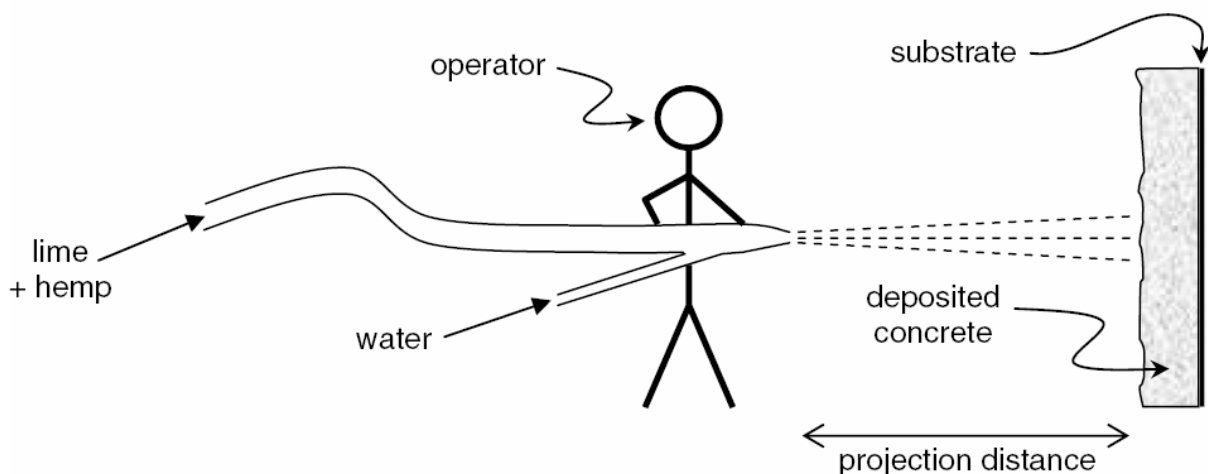


Figure 1-11 : Principe de la projection du béton de chanvre (Elfordy *et al.*, 2007)

La troisième technique consiste à utiliser des éléments préfabriqués avec le béton de chanvre (parpaing, bloc, brique,...) (Figure 1-12). Par rapport aux deux précédentes, cette technique

présente l'avantage d'une mise en œuvre plus rapide et un meilleur contrôle de la qualité du produit. Les dimensions courantes des blocs du béton de chanvre sont de (30×30×60 cm), l'épaisseur pouvant varier entre 10, 15, 20 ou 30 cm. La masse volumique est de l'ordre de 380 kg/m³ et la conductivité thermique est d'environ 0,11 W.m⁻¹.K⁻¹. Avec cette technique, il est possible d'obtenir des blocs porteurs en réalisant une plus forte compaction, mais ceci risque d'atténuer la qualité isolante du béton de chanvre. Un des enjeux majeur est de trouver un bon équilibre entre résistance mécanique et conductivité thermique. Notre étude est orientée vers cette technique, ou bien vers les éléments préfabriqués en béton de chanvre.



Figure 1-12 : Maison construite avec des blocs de béton de chanvre

Par rapport aux bétons hydrauliques, le béton de chanvre présente deux spécificités que l'on doit prendre en compte pour le formuler et aussi expliquer ses caractéristiques. D'abord, il est une associations entre deux matériaux dont la rigidité est très différente : un liant rigide dont le comportement mécanique est fragile et un granulat (la chènevotte) souple dont le comportement mécanique est ductile. Cette différence de rigidité peut conduire à des concentrations de contraintes aux interfaces matrice/granat quand le matériau est soumis à des sollicitations. Ensuite, il y a des interactions physiques, chimiques entre la pâte de liant et la chènevotte. D'une part, la forte capacité d'absorption d'eau de la chènevotte peut établir une compétition concernant la mobilisation de l'eau avec la prise de la portion de liant hydraulique. D'autre part, d'après l'étude de Peyratout *et al.* (2007), il semble que l'introduction des fibres dans une matrice de chaux hydraulique retarde le début du temps de prise d'environ 60 min, et augmente la durée de prise de 20 min. Notons que dans cette étude, le temps de prise des mortiers de chaux a été mesuré par un prisomètre Vicat. Les effets similaires ont également été observés lors de l'introduction de fibres de chanvre dans les matrices cimentaires (Sédan, 2007) (Sédan *et al.*, 2008).

1.4.2. Impacts environnementaux

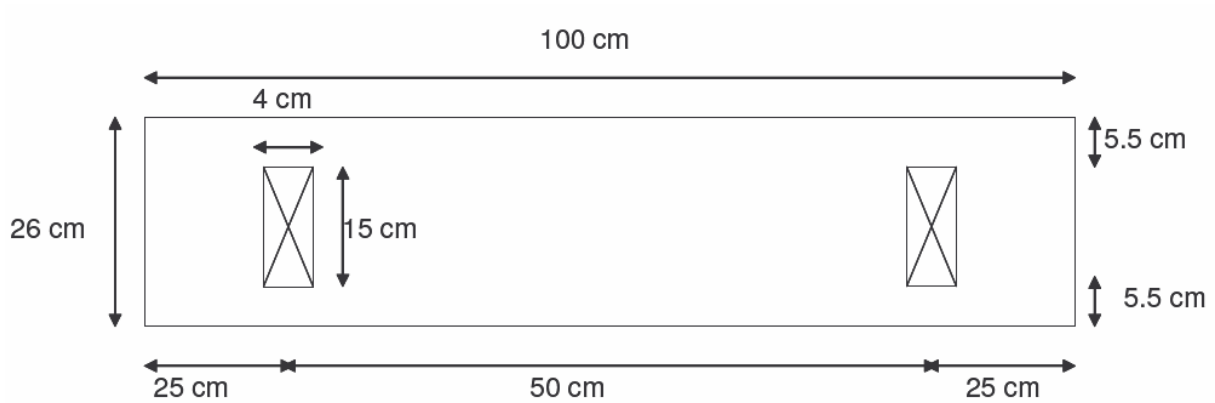


Figure 1-13 : Représentation de l'unité fonctionnelle du mur en béton de chanvre (Boutin *et al.*, 2006)

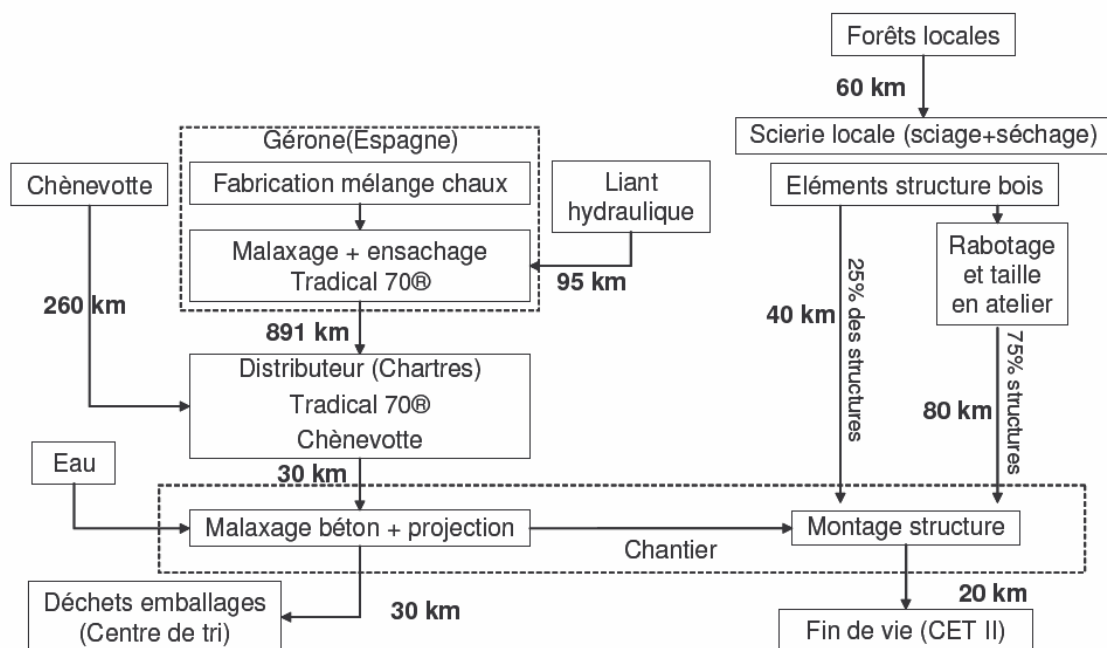


Figure 1-14 : Scénario de référence pour étudier les impacts du béton de chanvre sur l'environnement (Boutin *et al.*, 2006)

Actuellement, les impacts environnementaux du béton de chanvre sont présentés dans une publication intitulée “Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l’analyse de son cycle de vie” (Boutin *et al.*, 2006). La méthode d’analyse du cycle de vie a été appliquée afin de quantifier les impacts du béton de chanvre sur l’environnement. L’objet

d'étude est un mur du béton de chanvre banché sur ossature bois. Le liant utilisé est le Tradical PF70 composé de 75 % de chaux aérienne, 15 % de chaux hydraulique et 10 % de pouzzolane. La durée de vie typique est de 100 ans. La coupe transversale de l'unité fonctionnelle du système étudié est présentée dans la Figure 1-13. Le scénario de référence est présenté dans la Figure 1-14. Il comprend trois phases : transport, production des matières premières et leur transport vers le chantier, mise en œuvre.

Les calculs ont été effectués à l'aide des logiciels Simapro et Biofit, les résultats sont résumés dans le Tableau 1-6.

Impacts	Unité	
Epuisement des ressources	Kg Sb eq	$1,3 \cdot 10^{-1}$
Acidification atmosphérique	kg SO ₂ eq	$1,0 \cdot 10^{-1}$
Effet de serre à 100 ans	kg CO ₂ eq	-35,5
Energie non renouvelable	MJ	394,2
Production de déchets	kg	104,9

Tableau 1-6 : Impacts environnementaux potentiels sur 100 ans liés à la fabrication d'1m² de mur en béton de chanvre banché sur ossature bois (Boutin *et al.*, 2006)

En général, l'impact du béton de chanvre sur l'effet de serre est favorable. Un mur en béton de chanvre n'émet pas de gaz carbonique, au contraire il le stocke. En ce sens, il est intéressant de rappeler qu'il y a très peu de matériaux de construction ayant telle propriété. Généralement, les émissions d'un mur construit selon la méthode conventionnelle sont d'environ 100 kg CO₂/m² (Bevan & Woolley, 2008). Dans les études de Collet (2007) (2005), les comparaisons numériques des besoins de chauffage montrent que les parois en béton de chanvre de 25 cm d'épaisseur permettent d'avoir des besoins inférieurs à ceux obtenus pour des parois en parpaing avec 7,5 cm d'isolant rapporté.

1.4.3. Comportement mécanique

Les travaux de recherche sur le comportement mécanique du béton de chanvre se concentrent principalement sur son comportement en compression. Elles visent d'abord à augmenter la performance mécanique en formulant un liant qui en association avec la chènevotte, donne une prise plus rapide (Bütschi, 2004) (Sami, 2008).

Dans l'étude de Bütschi (2004), l'essai de compression sur les cylindres confectionnés seulement avec la chaux aérienne (150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur) donne des résultats décevants. Après cinq jours l'aggloméré peut être déformé en appliquant une pression avec un doigt et après 21 jours la cohésion du coeur des échantillons est encore faible. Le matériau présente une prise lente qui ne le destine pas à une utilisation industrielle. Ensuite, une trentaine de compositions sont élaborées pour connaître l'influence du liant sur les caractéristiques mécaniques. Le principe est d'ajouter les autres liants (chaux

hydrauliques, ciments, pouzzolanes, ajouts) à la chaux aérienne et de faire varier leurs proportions. Les résultats de l'essai de compression sur ces compositions montrent que :

Le remplacement d'une partie de la chaux aérienne par de la chaux hydraulique en gardant le même poids total de liants, permet d'avoir une sensible amélioration des caractéristiques mécaniques. La cohésion de l'intérieur des échantillons après 21 jours est meilleure mais les résistances restent encore faibles (Tableau 1-7).

L'ajout de 50% en masse de chaux hydraulique ou de ciment à la chaux aérienne donne des résultats très intéressants. Quelles que soient les proportions, toutes les compositions comprenant ces deux types de liants nécessitent moins d'eau pour obtenir une bonne homogénéité, facilitent le malaxage, et permettent une évolution de la résistance plus rapide. Après 21 jours déjà, l'intérieur des échantillons sont secs et fortement cohésif (Tableau 1-7). L'ajout de chaux hydraulique ou de ciment conduit à une augmentation similaire de la résistance en compression du béton de chanvre. Mais l'ajout de ciment présente l'avantage d'une augmentation supplémentaire de résistance par ajout éventuel de pouzzolane (Figure 1-15).

Type de liant (Composition)	Nombre d'observation	Résistance en compression (MPa)
Chaux aérienne	9	0,394
Chaux aérienne - Chaux hydraulique	7	0,581
Chaux aérienne - Ciment	7	0,602

Tableau 1-7 : Evaluation des différences entre les résultats selon les types de liant utilisé (Bütschi, 2004)

Les mélanges de chaux aérienne, chaux hydraulique et ciment sont également utilisés pour confectionner les éprouvettes dans l'étude de Bruijn (2008) et de Bruijn *et al.* (2009). La comparaison entre ces éprouvettes montre que l'augmentation de proportion de chaux hydraulique n'entraîne pas une augmentation de la résistance en compression (Tableau 1-8).

Pour les compositions contenant du ciment, des caractéristiques mécaniques plus élevées sont observées. Notamment, les éprouvettes fabriquées avec seulement du ciment donnent les meilleures résistances en compression. Cependant, Cérézo (2005) a vérifié l'incompatibilité du ciment avec un tel granulats végétal. L'explication peut résider dans le fait que dans les éprouvettes contenant le ciment, l'eau est absorbée par le granulats au dépend de l'hydratation du ciment. Par contre, dans l'étude de Bruijn (2008), les éprouvettes sont régulièrement humidifiées pendant les deux premières semaines, ce qui atténue ce phénomène de compétition.

La silice est souvent utilisée dans le béton pour augmenter la résistance, mais les compositions de chaux hydraulique et de silice donnent de plus faibles résistances en compression (Bruijn, 2008) (Bruijn *et al.*, 2009). Cependant, l'ajout de pouzzolane augmente nettement la résistance en compression du béton de chanvre (Tableau 1-9 et Figure 1-15)

Paper II (B-N and S not pre-mixed, P and R pre-mixed)		Before freeze-thaw treatment		After freeze-thaw treatment	
Mixture	Composition, fraction by weight	σ (MPa)	E (MPa)	σ (MPa)	E (MPa)
B		0.42 _{a,b,c}	23.90 _{a,b,c,d}	0.27 _{a,b}	19.33 _a
D		0.80 _d	†	0.38 _a	17.73 _a
E		2.14 _e	173.90 _e	1.79 _e	165.80 _b
N		0.53 _a	36.69 _{a,f}	0.25 _b	17.05 _a
P		0.33 _b	14.38 _{b,g}	0.13 _d	4.42 _c
R		0.42 _c	16.62 _{c,g}	0.12 _d	4.50 _c
S		0.71 _d	60.50 _{d,f}	†	†

Tableau 1-8 : Compositions testées et leurs caractéristiques mécaniques (Brujin, 2008)

composant	mélange			
	1	2	3	4
chènevotte	1.0	1.0	1.0	1.0
chaux	1.1	1.1	1.1	1.1
ciment	1.8	1.8	1.4	1.4
pouzzolane	0.1	0.2	0.7	0.4
AJ1	0.3	0.3	0.3	0.3
eau	3.1	3.2	3.2	3.0

Tableau 1-9 : Composition (rapport en masse) des mélanges du béton de chanvre (Bütschi, 2004)

Le comportement et les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre sont également liés au dosage en liant. Contrairement au béton hydraulique dont le comportement en compression est toujours fragile quelque soit la composition, le comportement en compression du béton de chanvre varie en fonction de dosage en liant (Figure 1-16). En général, le béton de chanvre possède un comportement élasto – plastique avec des déformations plastiques présentes dès les faibles niveaux de sollicitation. Le matériau ne présente pas de rupture fragile marquée et il est susceptible de subir des fortes déformations sans rupture brutale. De plus, lors des essais à la compression et une fois la charge ultime atteinte, ce matériau se déforme encore beaucoup tout en résistant à des charges relativement élevées (Bütschi, 2004).

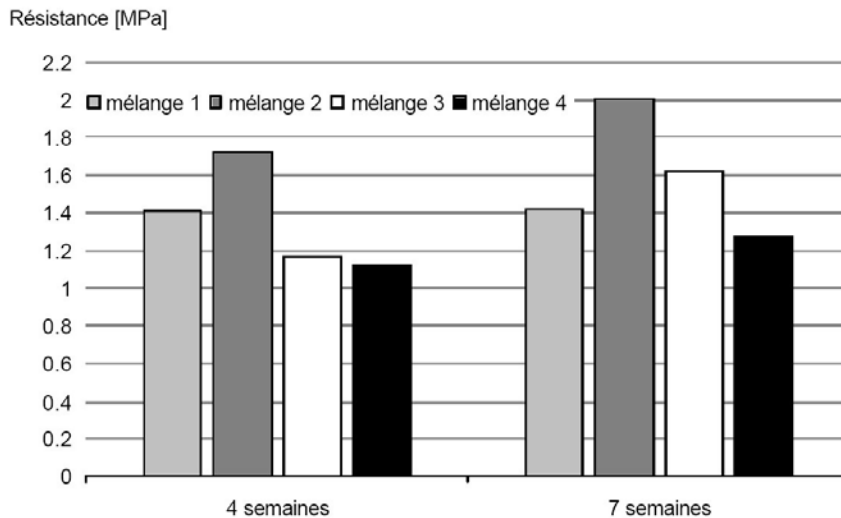


Figure 1-15 : Résistance en compression du béton de chanvre en fonction de leur âge et de leur composition (Bütschi, 2004)

Pour un faible dosage en liant (concentration volumique de 10%), le béton de chanvre se comporte comme un empilement de particules compressibles. Le matériau possède une faible résistance en compression et aussi un faible module d'élasticité. Par contre, sa capacité de déformation est très importante (supérieure à 15%).

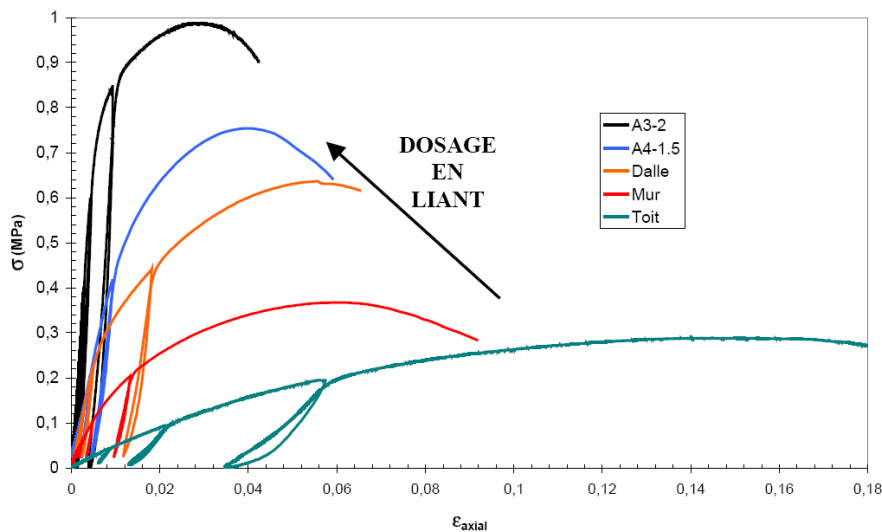


Figure 1-16 : Comportement mécanique en compression du béton de chanvre à différents dosage en liant (Cérézo, 2005)

Pour un dosage en liant compris entre 19 et 29% en volume, les particules de chènevotte sont enrobées par une couche du liant d'épaisseur plus ou moins grande. La performance mécanique augmente avec la quantité du liant, la densité des hydrates augmente et impose le comportement global (Tableau 1-10).

Pour un fort dosage en liant (concentration volumique d'environ 40%), le comportement est similaire à celui d'une matrice du liant continue dans laquelle des particules végétales sont noyées, la performance mécanique augmente et tend vers celle du liant pur.

Les mêmes constatations peuvent être faites dans l'étude de Bütschi (2004). Cependant, notons que plus le dosage en liant est important, plus le coût de fabrication est élevé.

Dosage en liant	Concentration volumique liant	ρ (kg/m ³)	σ_{\max} (MPa)	E (MPa)	$\varepsilon_{\sigma_{\max}}$	ν
Faible	10 %	250	0,25	4	0,15	0,05
Intermédiaire	19 % à 29 %	350 à 500	0,35 à 0,80	32 à 95	0,05 à 0,06	0,08 à 0,16
Fort	40 %	600 à 660	1,15	140 à 160	0,04	0,20

Tableau 1-10 : Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre en fonction de dosage en liant (Cérézo, 2005)

La technique de mise en œuvre a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre. Les éprouvettes fabriquées par projection (Elfordy *et al.*, 2007) présentent une résistance en compression beaucoup plus faible que celles légèrement compactées (Cérézo, 2005). Pour une masse volumique apparente de 500 kg/m³, le module d'élasticité est de l'ordre de 15 MPa (Figure 1-17) pour les premières et de 70 MPa pour les deuxièmes.

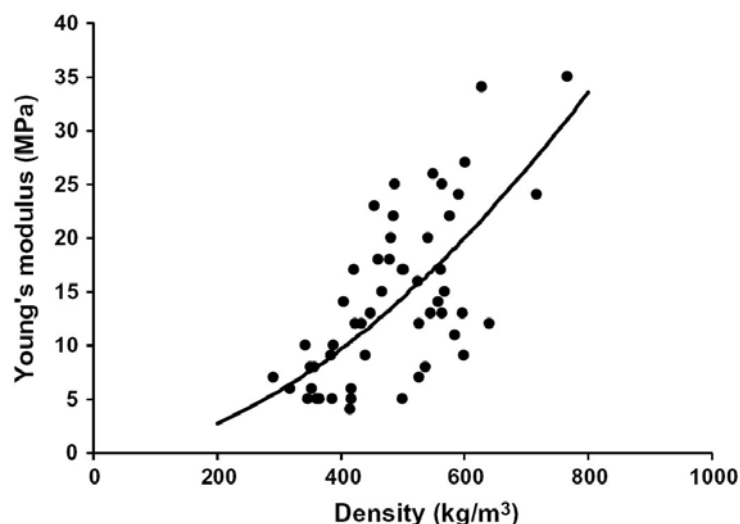


Figure 1-17 : Variation du module d'élasticité en fonction de la densité du béton de chanvre fabriqué par projection (Elfordy *et al.*, 2007)

Pourtant elles sont encore faibles par rapport aux autres matériaux utilisés dans la construction (Arnaud, 2000) (Bruijn, 2008) (Cérézo, 2005). Actuellement, le béton de chanvre n'est pas encore utilisé comme un matériau autoporteur, un ossature en bois est nécessaire

pour utiliser avec le béton de chanvre. La faible résistance mécanique du béton de chanvre proviendrait d'une part à des particules granulaires très souples, et d'autre part à l'arrangement imparfait de ces particules (Bouloc *et al.*, 2006). Et le compactage peut augmenter la résistance en compression du béton de chanvre (Cérézo, 2005).

Les caractéristiques mécaniques augmentent d'une manière très lente en fonction du temps (Figure 1-18). Selon Cérézo (2005) d'une part la prise du liant est toujours perturbée par l'absorption d'eau des particules de la chènevotte, malgré une saturation préalablement. Donc, la prise est ralentie par manque d'eau disponible pour l'hydratation. D'autre part, ce retard pourrait être lié à l'interaction chimique entre les particules végétales et le liant. Actuellement, il n'y pas encore des études précis sur cette question. Par contre, le retard de la prise de la pâte de ciment à cause de l'introduction des fibres de chanvre est définitivement vérifié dans l'étude de (Sedan, 2007) (Sedan *et al.*, 2009).

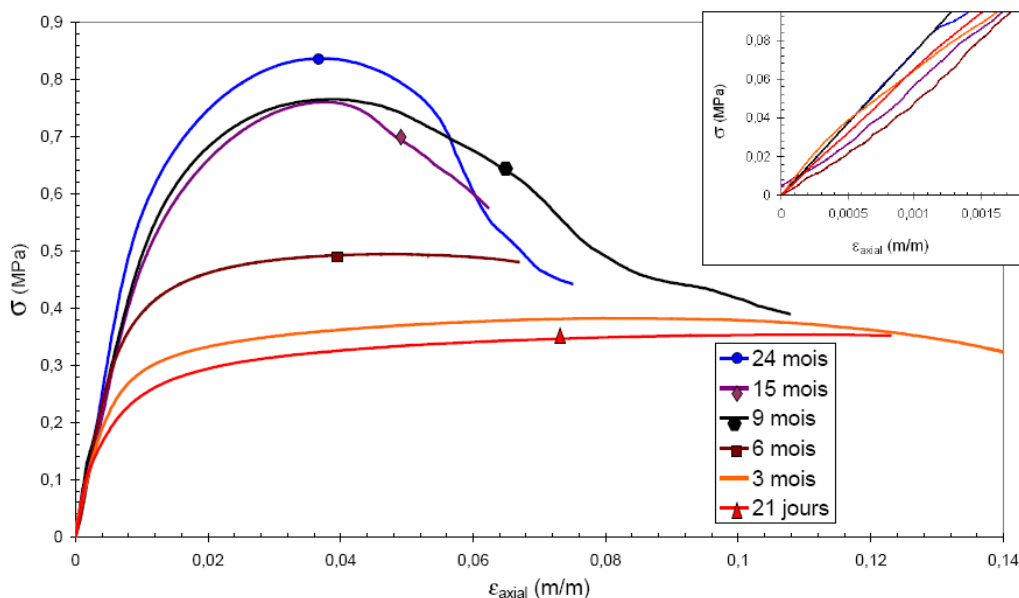


Figure 1-18 : Comportement en compression du béton de chanvre à différent âge (Cérézo, 2005)

Le béton de chanvre présente également un comportement très ductile en flexion. Lors de l'essai de flexion, une fois la charge maximale atteinte, l'éprouvette ne casse pas brusquement en deux parties mais la fissure qui apparaît sur la face inférieure de l'échantillon s'ouvre progressivement (Bütschi, 2004). En ce qui concerne la résistance en flexion, sa valeur est comprise entre 0,6 et 1,4 MPa pour une masse volumique apparente allant de 400 à 600 kg/m³ (Bütschi, 2004) (Elfordy *et al.*, 2007). Notons que les valeurs dans ces études sont obtenues d'essai de flexion 3 points.

1.4.4. Propriété thermique

Pour la construction, le béton de chanvre présente une large gamme d'applications, mais l'intérêt principal de ce matériau est sa faible conductivité thermique. Cette performance est reliée d'une part au réseau poreux du matériau qui permet de stocker de l'air (un très bon isolant). D'autre part, la répartition de la taille des pores, du micromètre (porosité intra-particulaire de la chènevotte et du liant) au centimètre (porosité inter-granulaire), favorise une très bonne circulation de la vapeur d'eau (Bouloc *et al.*, 2006). En général, la porosité du béton de chanvre déduite à partir des mesures pycnométriques environ 76,5 % pour une masse volumique sèche de 440 kg/m^3 (Collet *et al.*, 2007) et (Collet, 2007). La porosité ouverte a été également mesurée dans ces études (saturation d'eau des échantillons), les résultats montrent que le béton de chanvre possède une proportion très élevée de la porosité ouverte (70,6%). Avec un porosimètre, Cérézo (2005) aboutit aux mêmes constatations. Ces résultats confirment une bonne connectivité des pores au sein du matériau. En outre, le béton de chanvre comprend principalement des mésopores et macropores dont le diamètre est supérieur à $0,05 \mu\text{m}$ (Collet *et al.*, 2007)

La conductivité thermique du béton de chanvre, elle est comprise entre $0,06$ et $0,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour des masses volumiques sèches variant de 200 à 840 kg/m^3 (Cérézo, 2005) (Figure 1-19) Les mesures ont été effectuées sur les plaques de 27 cm de côté et de 5 cm d'épaisseur. Ces plaques ont été séchées dans un four à une température de 60°C pendant une semaine, de façon à stabiliser leur masse en éliminant l'eau libre présente dans le matériau. Les mesures sont menées à l'aide d'un dispositif appelé boîte thermique. On remarque que la conductivité thermique évolue d'une manière quasi linéaire avec la masse volumique sèche du matériau.

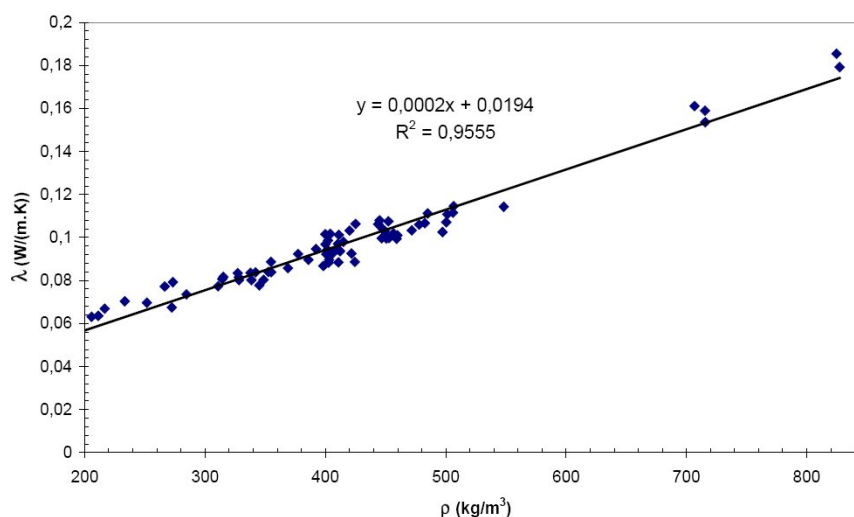


Figure 1-19 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche (Cérézo, 2005)

Ces résultats sont assez cohérents avec ceux mesurés par la méthode de la plaque chaude gardée dans les travaux de Collet (2007). Cependant, avec la même méthode, Elfordy *et al.*

(2007) montre une conductivité thermique nettement supérieure pour les échantillons confectionnés par projection (Figure 1-20). Elle peut aller jusqu'à $0,49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une masse volumique de $550 \text{ kg}/\text{m}^3$. Pourtant, on rappelle que les caractéristiques mécaniques de ces blocs sont nettement faibles. Donc, pour le béton de chanvre l'importance du mode de mise en œuvre est probablement non négligeable.

Dans le cas de Bütschi (2004), parallèle à une nette amélioration de la résistance mécanique par le compactage, la conductivité thermique augmente jusqu'à $0,34 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour une masse volumique apparente de $700 \text{ kg}/\text{m}^3$. Les mesures ont été réalisées sur un muret de 310 mm d'épaisseur. Après un temps de séchage de trois semaines, le muret est déposé dans une "boîte chaude gardée" et les mesures sont effectuées après 15 jours, une fois le flux thermique stabilisé. Donc, les enjeux du compactage doivent être étudiés plus en détail.

De plus, il est nécessaire à noter que la conductivité thermique du béton de chanvre augmente sensiblement avec l'humidité de l'ambiance. En effet les valeurs de la conductivité thermique sèche sont entre 20 et 40 % inférieures à celles obtenues sous $\text{HR}=50\%$ et $\text{HR}=70\%$ (Cérézo, 2005).

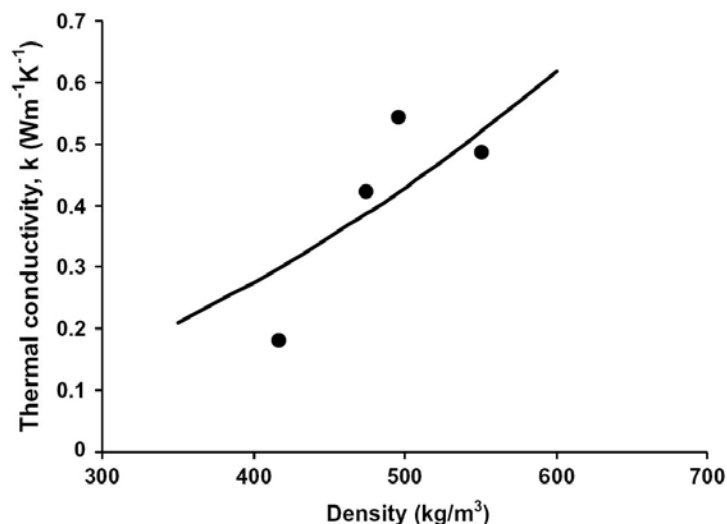


Figure 1-20 : Conductivité thermique des échantillons du béton de chanvre fabriqués par projection (Elfordy *et al.*, 2007)

1.5. Bilan

Les analyses de cycle de vie ont montré les atouts environnementaux du béton de chanvre. Ce matériau possède un bilan positif sur l'effet de serre, une faible consommation d'énergie pour sa fabrication et peu de déchet en fin de vie. D'ailleurs, en France, le béton de chanvre est associé à la question de valorisation des sous-produits industriels, car ce pays est le plus gros producteur de chanvre industriel en Europe avec 9000 hectares.

D'un point de vue thermique, le réseau dense des pores ouvertes et connectés permet au béton de chanvre d'avoir une faible conductivité thermique. Ceci est extrêmement intéressant pour économiser l'énergie de chauffage dans le domaine du bâtiment.

Du point de vue mécanique, le béton de chanvre présente une faible capacité de portance par rapport aux autres matériaux de construction ; la souplesse des particules de la chènevotte, combinée à leur imparfait arrangement devrait être responsable de la faible résistance mécanique. A ce jour, la résistance en compression de ce matériau ne dépasse guère 2 MPa. Dans la construction, il doit donc être utilisé pour le moment avec une ossature en bois qui joue le rôle de système porteur. A partir des études précédentes, il apparaît que le compactage est un facteur prédominant pour améliorer la résistance mécanique du béton de chanvre. Pourtant il n'est pas le seul à intervenir. On peut envisager d'essayer de jouer sur les autres paramètres tels que le rapport Liant/Granulat, Eau/Liant, le type du liant, la taille du granulat,...En même temps, une telle amélioration devrait ne pas ou peu modifier la performance thermique de ce matériau, caractéristique la plus intéressante dans les applications pratiques.

D'ailleurs, la combinaison des études des paramètres influencés sur les caractéristiques pourrait contribuer à établir une méthode de formulation du béton de chanvre qui est toujours en absence jusqu'à présent.

En ce terme, les chapitres suivants consisteront principalement à étudier l'influence des différents paramètres constitutifs du matériau sur la résistance mécanique et aussi sur la conductivité thermique du béton de chanvre.

Chapitre 2. Matériaux étudiés

Comme on l'a vu dans le chapitre 1, le béton de chanvre est un aggloméré de chènevotte et d'un liant à base de chaux. Actuellement, l'une des difficultés majeure à leur utilisation est le manque d'informations concernant leurs caractéristiques données par les fournisseurs. Or, pour étudier correctement les propriétés du béton de chanvre, on devra faire appel aux caractéristiques de la chènevotte qui occupe souvent un volume considérable au sein de celui-ci. Dans ce chapitre, les mesures et les essais sur les constituants du béton de chanvre seront exposés. Le but est d'analyser les paramètres pouvant influencer les propriétés mécaniques et thermiques des bétons de chanvre.

Dans un premier temps, on effectuera une caractérisation de la chènevotte, principalement les propriétés physiques de ce granulat, comme la masse volumique de la chènevotte en vrac, sa porosité, sa capacité d'absorption d'eau, sa granulométrie... Ces mesures seront effectuées pour les deux types de granulats utilisés.

Dans un second temps, on examinera les propriétés du liant employé qui est un mélange de chaux aérienne, de chaux hydraulique et de pouzzolanes commercialisé sous le nom de Tradical PF70. Trois autres liants également été utilisés pour la fabrication des éprouvettes : les chaux hydraulique NHL 2 et NHL 3,5Z et un ciment Portland (CPA CEM1 52,5 N). L'objectif est d'observer l'influence de la nature du liant sur les propriétés du béton de chanvre. Néanmoins, la plus grande partie des éprouvettes a été fabriquée avec du

Tradical PF70. Les essais mécaniques et les mesures de la conductivité thermique ont été réalisés uniquement sur des éprouvettes confectionnées avec de la chaux.

2.1. La chènevotte

2.1.1. Morphologie

Avant d'entrer dans les détails des études sur ce type de granulat qui est d'origine végétale, on notera que le terme "chènevotte" désigne l'ensemble des particules de la tige du chanvre (Figure 2-1a). Deux types de granulats ont été utilisés dans cette étude : la chènevotte pure et la chènevotte fibrée. La chènevotte pure est obtenue par défibrage total de la tige du chanvre (séparation totale des fibres situées en périphérie et de la partie boisée centrale). Le produit final est alors constitué des particules boisées de différentes tailles. Dans ce chapitre mais aussi les chapitres suivants, ce granulat sera nommé CP (Figure 2-1b). Il est produit dans l'Aube (France) et est commercialisé en sac de 20 kg.

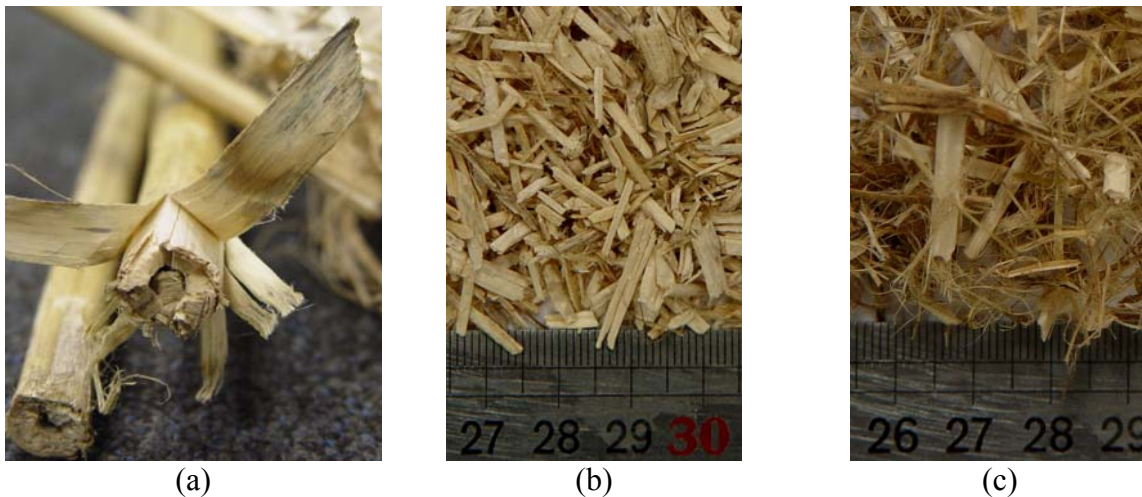


Figure 2-1 : Les granulats étudiés. (a) La tige du chanvre. (b) Chènevotte pure (CP). (c) Chènevotte fibrée (CF)

Le deuxième type de granulat est un mélange de bois et de fibres végétales puisqu'il n'y a qu'un défibrage partiel de la tige du chanvre qui est simplement broyée. Les fibres végétales peuvent soit se trouver isolées, soit rester collées avec les particules boisées. Ce granulat nommé CF dans le cadre de cette étude (Figure 2-1c), provient de Trémargat (Côte d'Armor) et est commercialisé en sac de 8 kg. La teneur en eau initiale, c'est à dire dans le sac, est d'environ 10% pour le granulat CP et 13% pour granulat CF. Une première comparaison à l'œil nu des deux types de chènevotte permet de voir que la morphologie du granulat CF est plus variée que celle du granulat CP. Malheureusement, il est difficile d'évaluer précisément le pourcentage massique des fibres dans le granulat CF, car leur séparation nécessite des dispositifs spécifiques. Une séparation manuelle a été tentée sur des échantillons de 100 g, et

montre une proportion de fibre supérieure 12 %. L'apparence de ces deux types de granulat est illustrée dans les Figure 2-1 *b* et *c*.

2.1.2. Microstructure

Comme dans tous les végétaux, la tige du chanvre possède des capillaires de différentes tailles qui jouent un rôle de transmission de la sève le long de la tige. A l'état sec, ces capillaires sont vides et constituent la plus grande partie de la porosité des particules végétales. La Figure 2-2 présente les observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la tige du chanvre. Deux observations ont été effectuées : une coupe transversale et une autre longitudinale.

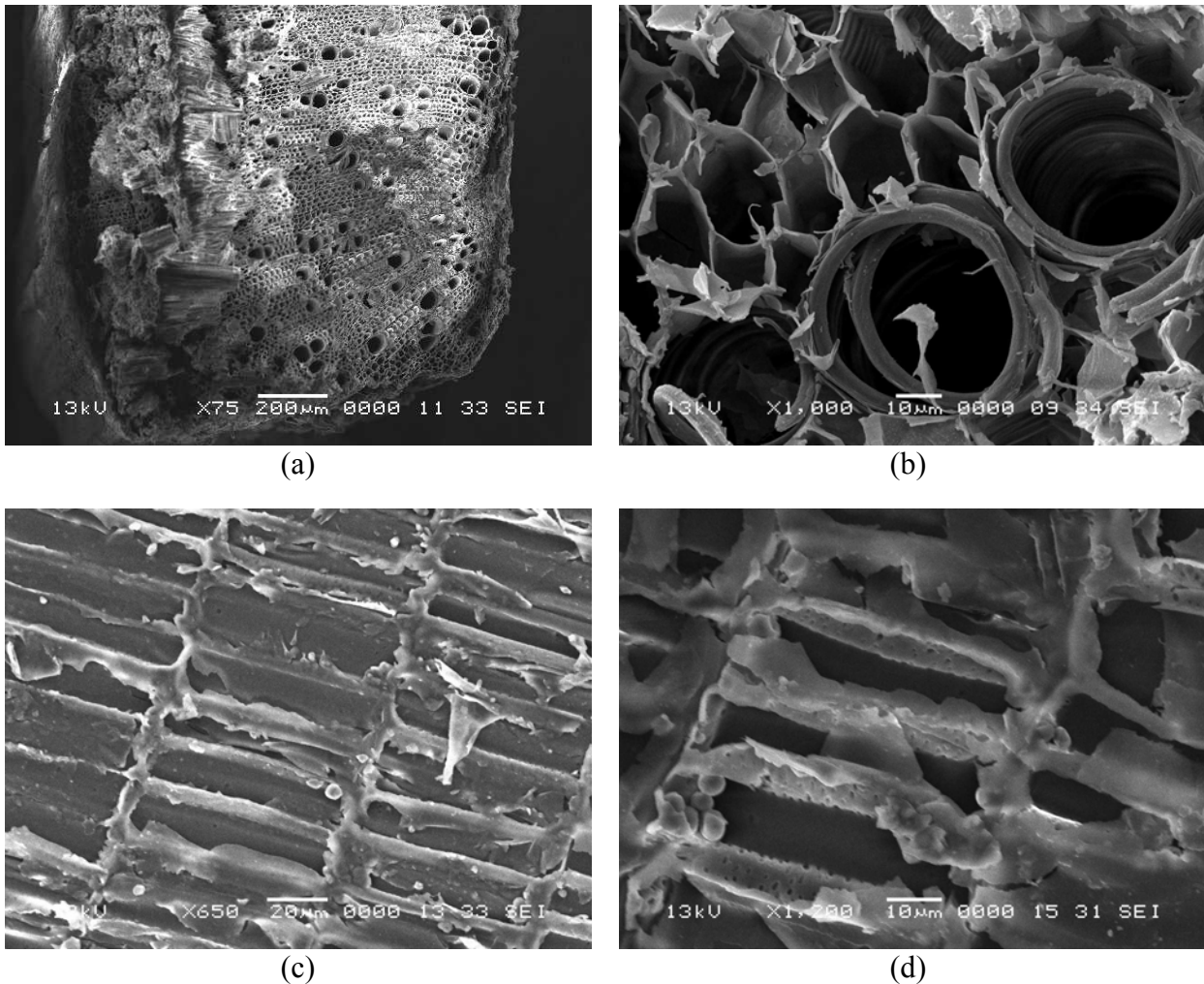
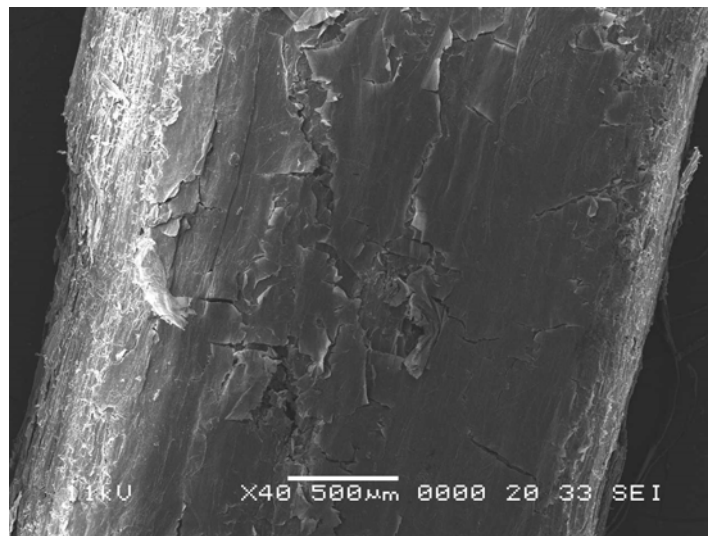


Figure 2-2 : Microstructure de la tige du chanvre. (a) (b) Observation d'une coupe transversale. (c) (d) Observation d'une coupe longitudinale

Les observations réalisées sur la coupe transversale montrent clairement le réseau de capillaires dont le diamètre est généralement compris entre 10 et 50 μm , ceux-ci sont orientés dans le sens de la tige. Lors de la croissance de la plante, la sève circule dans ces capillaires tout le long de la tige. Après séchage ils sont vides. Cependant sur les coupes longitudinales,

les capillaires sont apparemment séparés par des parois orientées perpendiculairement au sens de la tige (Figure 2-2 c, d). La connectivité de ces alvéoles est probable mais reste difficilement observable. La question de l'interconnexion des capillaires pourrait être étudiée plus en détail afin de mieux caractériser la chènevotte, mais ce point n'a pas pu être approfondi dans cette étude. Ce genre de structure peut expliquer les caractéristiques essentielles de la chènevotte comme sa capacité d'absorption d'eau (cf. § 2.1.4) et son faible poids volumique.

De plus, ces observations montrent également une anisotropie structurale de la particule de chènevotte. Ce type de structure peut conduire à des anisotropies du béton de chanvre. Cette question sera abordée dans le chapitre 5.



(a)



(b)

Figure 2-3 : Surfaces d'une particule du granulat CP (a) et d'une particule du granulat CF (b)

Des observations au MEB de la surface des particules de ces deux granulats ont aussi été réalisées. On constate rapidement une différence morphologique entre ceux-ci. Tout d’abord, la surface de la particule du granulat CP est vraisemblablement lisse Figure 2-3a. Par contre on peut observer clairement des fibres végétales à la surface des particules dans le cas du granulat CF (Figure 2-3b). Cette morphologie spécifique pourrait influencer l’adhérence entre ces granulats et le liant.

2.1.3. Masses volumiques et porosités

Le Tableau 1-2 résume les masses volumiques des granulats CP et CF. On trouvera aussi dans ce tableau leurs porosités calculées à partir de ces masses volumiques. Les masses volumiques ont toujours été mesurées sur les échantillons en vrac, c’est à dire à l’état non compacté (à l’état sec). La méthode utilisée pour la mesure est celle du pycnomètre (voir 0), chaque résultat est la valeur moyenne de six mesures.

	Masse volumique en vrac à l'état sec $\rho_{vs}^{(1)}$	Masse volumique d'une particule $\rho_{gs}^{(2)}$	Masse spécifique $\rho_s^{(3)}$	Porosité totale $n_{totale}^{(4)}$	Porosité inter-granulaire $n_{inter}^{(5)}$	Porosité intra-granulaire $n_{intra}^{(6)}$
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
CP	102,83	256,41	1465	92,98	59,90	33,08
CF	54,86	256,41	1438	96,18	78,60	17,58

Tableau 2-1 : Masses volumiques et porosités mesurées sur les granulats CP et CF en vrac

⁽¹⁾ ρ_{vs} , la masse volumique apparente du chanvre sec en vrac sans compactage, est mesurée sur des échantillons séchés en étuve pendant 2 jours à la température de $100 \pm 5^\circ\text{C}$

⁽²⁾ ρ_{gs} , la masse volumique apparente d’une particule de chènevotte non compactés est directement mesurée à partir de section de tige de chanvre défibrée (cf. § 0).

⁽³⁾ ρ_s , la masse volumique de la matière végétale constituant la chènevotte est déterminée au pycnomètre en utilisant du toluène comme fluide de remplissage.

⁽⁴⁾ n_{totale} , la porosité totale, est calculé selon la relation suivante : $n_{totale} = 1 - \rho_{vs} / \rho_s$

⁽⁵⁾ n_{inter} , et ⁽⁶⁾ n_{intra} sont respectivement les porosités inter et intra-granulaire calculées à partir des relations suivantes : $n_{inter} = 1 - \rho_{vs} / \rho_{gs}$ et $n_{intra} = n_{totale} - n_{inter}$.

En vrac, les deux granulats présentent une très faible masse volumique, en particulier le granulat CF (55 kg/m^3). Elle est deux fois plus faible que celle du granulat CP (103 kg/m^3). En revanche, leur masse volumique spécifique est approximativement de 1400 kg/m^3 . Cette faible valeur provient d’une part de la structure très poreuse des particules elles-mêmes, d’autre part de la porosité inter – granulaire qui occupe jusqu’à 60 % du volume total en vrac dans le cas du granulat CP et 79 % pour le granulat CF. Il faut remarquer que le granulat CF contient des fibres végétales qui occupent beaucoup de volume et dont la porosité est très

faible : environ de 2,46 % selon les mesures de Mwaikambo & Ansel (2001). En raison de la difficulté de mesure de la teneur en fibres, on fait cependant l'hypothèse qu'il y a seulement des particules boisées dans le granulat CF pour effectuer le calcul de la porosité inter granulaire, qui est donc de ce fait légèrement sous estimée.

2.1.4. Absorption d'eau

Une des caractéristiques importantes des granulats légers est leur capacité d'absorption d'eau. Lorsqu'on fabrique un béton avec ces granulats, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée du fait de leur importante porosité.

Pour déterminer la capacité d'absorption d'eau des granulats CP et CF ainsi que la cinétique d'absorption, des mesures ont été réalisées sur des échantillons de 100 g de granulat entièrement sec. Ils ont été séchés au préalable à 100°C pendant deux jours avant d'être immergés dans l'eau pendant différentes durées : 1, 2, 5, 10, 30 et 60 minutes puis 24 h et 48 h. Cette température est généralement appliquée pour la mesure de teneur en eau du bois afin d'obtenir une évaporation rapide et complète de l'eau libre (Trouy-Triboulot & Triboulot, 2001). La masse de l'échantillon un instant t nous permet de déterminer le taux d'absorption d'eau A(t) qui s'exprime comme le rapport entre le gain massique de l'échantillon à l'instant t et sa masse initiale sèche.

$$A(t) = \frac{M(t) - M(0)}{M(0)} \quad [1]$$

d'où t – instant où s'effectue la pesée (minutes ou heures)

M(t) – masse de l'échantillon à l'instant t

M(0) – masse initiale de l'échantillon sec, M(0)=100 g

Les cinétiques d'absorption d'eau des granulats sont montrées sur la Figure 2-4. La méthode expérimentale que nous avons appliquée ne peut décrire qu'une absorption d'eau globale des granulats. La quantité d'eau absorbée se compose d'une partie emprisonnée par le réseau capillaire des particules et d'une autre partie retenue superficiellement par les particules (eau inter – granulaire). La proportion d'eau inter – granulaire ne peut pas être déduite.

Les capacités d'absorption d'eau des granulats CF et CP sont respectivement de 276 et 290 %, après 30 minutes d'immersion. Elles sont beaucoup plus importantes que pour d'autres granulats légers comme l'argile expansé ou les cendres volantes frittées. En outre, le taux d'absorption au bout de 5 minutes est déjà très élevé : environ 70 % de l'absorption est en effet complétée dès 5 minutes. La vitesse d'absorption diminue ensuite logiquement au fil du temps. Après 48 h d'immersion, l'absorption du granulat CP atteint 406 % et celle du granulat CF 356 %.

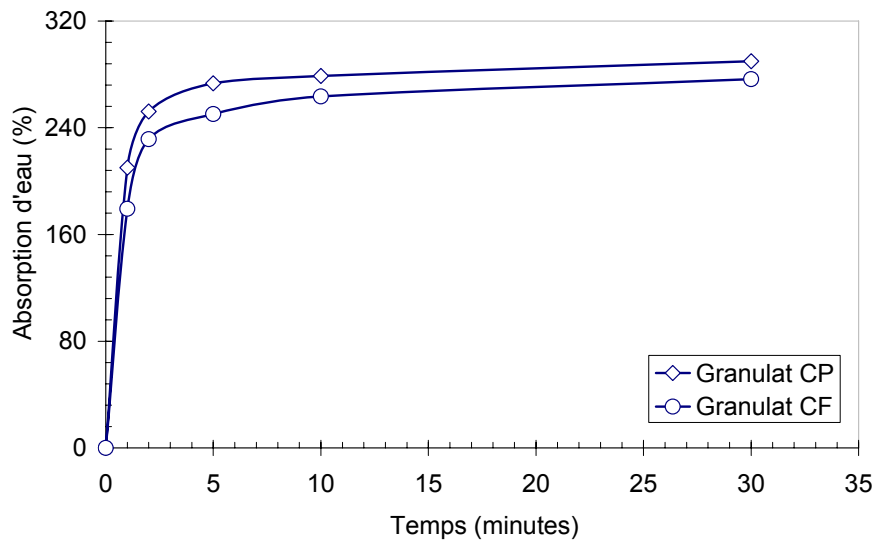


Figure 2-4 : Quantité d'eau absorbée par les granulats (CP et CF) initialement secs immergés dans l'eau en fonction du temps

On constate ainsi que le granulat CF absorbe moins d'eau que le granulat CP, malgré une masse volumique en vrac deux fois plus faible que celle du granulat CF. Autrement dit la légèreté ne paraît pas être le seul paramètre régissant l'absorption d'eau dans les granulats puisque les valeurs diminuent quand la masse volumique décroît. L'explication qui peut être avancée est la présence de fibres végétales beaucoup moins poreuses dans le granulat CF. Comme elles se trouvent à la surface des particules, elles peuvent modifier la progression de l'eau durant l'absorption.

La capacité d'absorption en eau joue un rôle très important pour la formulation et la mise en œuvre du béton de chanvre. Cette propriété hydrophile des granulats devrait conditionner l'utilisation de liants hydrauliques. Le fonctionnement du liant peut en effet être profondément altéré, entraînant des désordres graves tels que : mauvaises prises, poudrages, dessiccation. Les essais mécaniques conduits sur les échantillons confectionnés avec le ciment (voir cf. § 5.3.1) confirmeront cette hypothèse. Cet inconvénient peut être réduit en humidifiant les granulats avant de les mélanger avec le liant. En se basant sur les courbes d'absorption d'eau, une durée d'humidification de 5 minutes au-delà de laquelle l'absorption d'eau varie faiblement a été retenue.

2.1.5. Granulométrie

Pour étudier la répartition en taille des particules de chènevotte, deux méthodes ont été utilisées : un tamisage mécanique et une analyse d'images. La première méthode a été utilisée sur les deux granulats, sachant que le maximum de fibres possible a été retiré du granulat CF avant le passage dans le tamis. En revanche, la deuxième méthode n'a pu être appliquée que

sur le granulat CP car la présence de fibres complique beaucoup le traitement d'images pour le granulat CF.

Ces deux méthodes présentent chacune des avantages et des inconvénients :

- Le tamisage mécanique classique par voie sèche permet de faire des mesures sur des échantillons d'une centaine de grammes mais est peu adaptée à la géométrie allongée et à la faible masse volumique de tels granulats. En effet, l'utilisation du tamisage mécanique amène à se poser la question suivante :
- La particule passant à travers un tamis peut avoir une longueur plus grande que l'ouverture de la maille de tamis comme illustré dans la Figure 2-5. Par conséquent, l'ouverture des mailles du tamis permet d'obtenir une mesure de la dimension latérale (diamètre maximal) de particule mais pas de sa plus grande dimension, à savoir sa longueur.

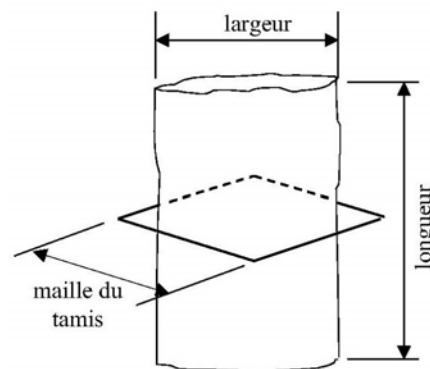


Figure 2-5 : Une particule passant à travers une maille de tamis par sa largeur.

En résumé, les tamis mécanique ne sont pas adaptés à la mesure granulométrique des telles granulats.

Pour palier à ce problème, une analyse d'images a été effectuée sur les particules de chanvre. L'avantage majeur de cette technique est qu'elle permet d'obtenir directement les dimensions en 2D des particules. En revanche, elle nécessite une mise en œuvre plus complexe et un échantillonnage limité, dans notre cas 5 grammes ont été analysés.

L'analyse d'images a été utilisée et est très répandue dans de nombreuses disciplines : les sciences des matériaux, la médecine, la géographie, etc. En génie civil, on l'emploie par exemple pour la quantification de la granulométrie des roches fragmentées (Mora *et al.*, 1998) (Outal, 2006). Plusieurs techniques ont été développées afin d'analyser des images de granulats mais la démarche reste toujours la même. Tout d'abord, les images numériques des particules du granulat sont obtenues soit grâce à des appareils photo, soit par un scanner. Par la suite, ces images sont binarisées avant d'être analysées pour obtenir les informations

relatives à la taille et la forme des granulats. Enfin, à partir de ces informations, on est à même de déterminer la distribution de taille des granulats (ou la courbe granulométrique).

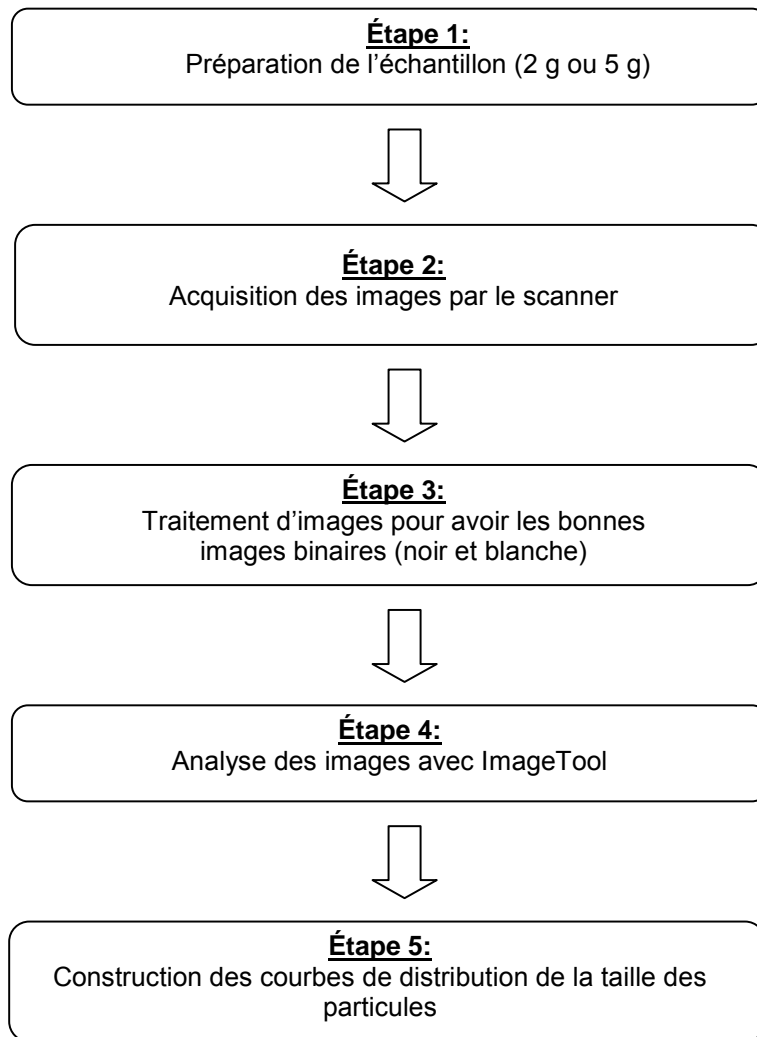


Figure 2-6 : Etapes successives de l'analyse d'images

Dans le cadre de cette étude, un scanner a été utilisé afin de pouvoir travailler sur des images numérisées qui sont ensuite traitées et analysées par le logiciel ImageTool. Le processus de l'analyse d'images est schématisé dans la Figure 2-6. Une image couleur est obtenue (Figure 2-7). Cette image doit ensuite être traitée pour enlever de nombreux détails de l'image ne devant pas être pris en considération pour les mesures. L'emploi de filtres permet d'éliminer ces informations inutiles et d'obtenir une image plus adaptée à l'analyse (Étape 3). Après définition d'un seuillage, une image binaire est obtenue (Figure 2-8) et peut être analysée avec ImageTool (Figure 2-9).



Figure 2-7 : Image scannée en couleur avant traitement



Figure 2-8 : Image obtenue après binarisation

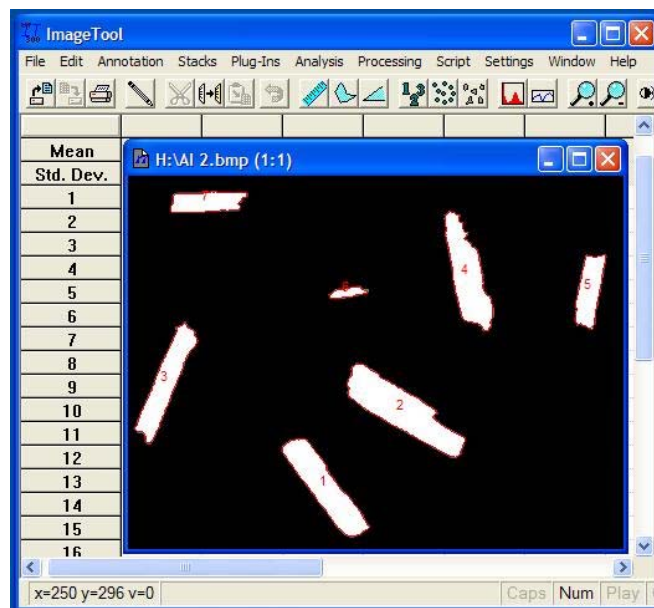


Figure 2-9 : Analyse d'images avec ImageTool

Pour une particule, les trois paramètres pris en compte sont sa largeur, sa longueur et son aire. En ce qui concerne les dimensions déterminées par ImageTool, elles sont calculées à partir de la mesure du diamètre de Feret (la distance entre les deux plans parallèles encadrant le contour de la particule) L'ensemble des données obtenues avec cette technique sera utilisé pour construire la courbe de répartition en longueur (ou largeur) des particules en fonction de leurs fraction surfacique. Les calculs sont semblables à ceux de l'analyse par tamisage mais on détermine " le refus " exprimé en pourcentage surfacique au lieu du pourcentage massique. La Figure 2-10 présente les courbes granulométriques obtenues par l'analyse d'images sur un échantillon de 2 g et un autre de 5 g. Les résultats de l'échantillon de 2 g corroborent ceux obtenus avec l'échantillon de 5 g.

Les courbes granulométriques des granulats CP et CF sont présentées dans la Figure 2-11. Celles obtenues par analyse d'images sur les échantillons du granulat CP sont nommées "CP-AI : Longueur" et "CP-AI : Largeur". La première courbe correspond à la distribution en longueur des particules du granulat CP tandis que la deuxième correspond à la distribution en largeur de ces mêmes particules.

Lorsque l'on étudie les résultats obtenus par tamisage mécanique, on s'aperçoit que le granulat fibré CF est plus fin que le granulat CP.

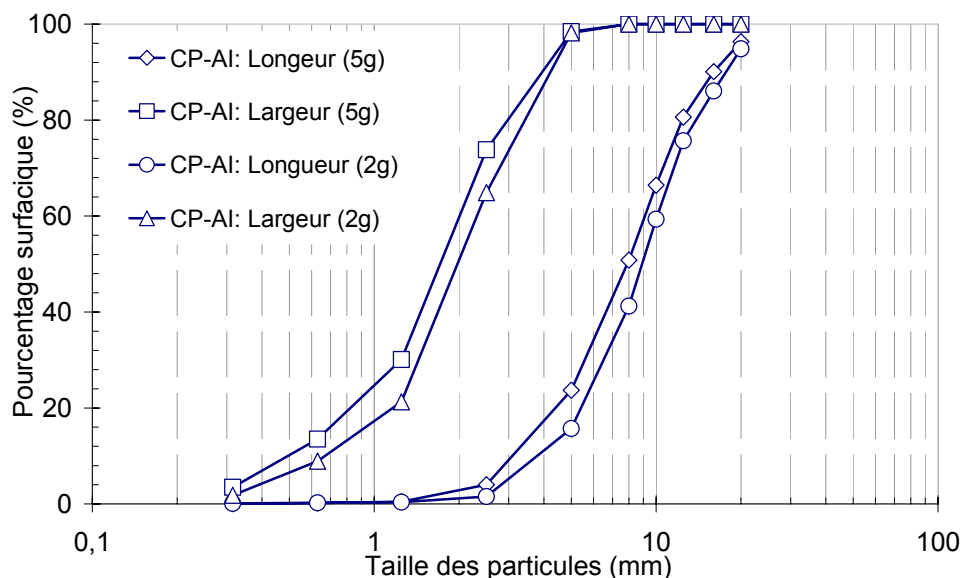


Figure 2-10 : Courbe granulométrique par analyse d'images d'un échantillon de 5 grammes et d'autre de 2 grammes

L'analyse d'images montre aussi que la longueur des particules du granulat CP est comprise entre 1,25 et 20 mm et que leur largeur varie de 0,315 à 10 mm. Des éprouvettes fabriquées avec différentes tailles de granulats seront testées pour essayer de déterminer l'influence de la taille du granulat sur les propriétés du béton de chanvre (cf. § 5.3.2).

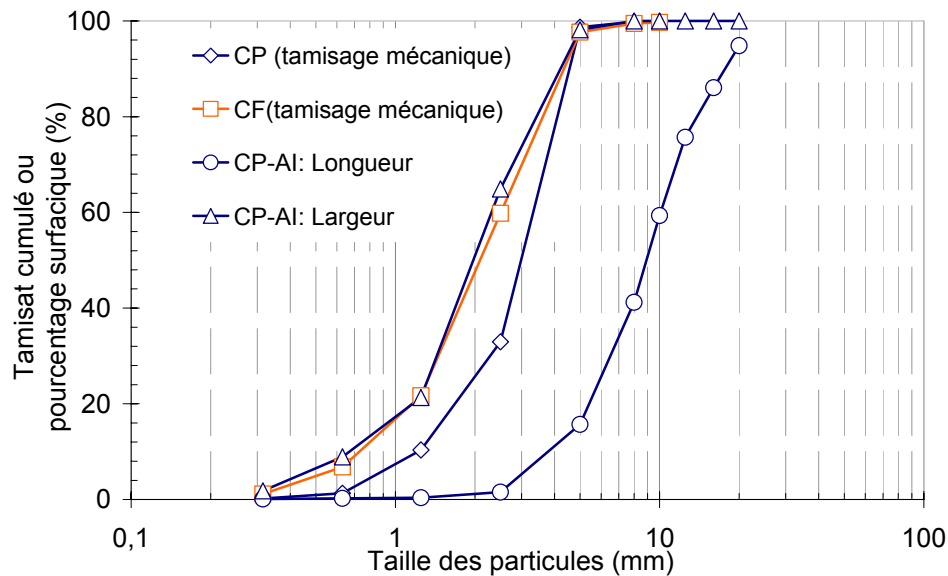


Figure 2-11 : Distribution de la taille des granulats déterminée par tamisage mécanique (CP et CF) et par la méthode d'analyse d'images (CP)

2.2. Liants utilisés

2.2.1. Propriétés mécaniques

Comme on l'a vu dans le paragraphe § 2.1.4, la forte tendance hydrophile de la chènevotte exige de choisir en premier lieu le liant le plus adapté à la formulation d'un béton de chanvre. Dans ce cadre d'étude, quatre liants ont été testés :

- Tradical PF70
- Chaux hydraulique NHL 3,5Z
- Chaux hydraulique NHL 2
- Ciment CPA CEM I 52,5 N

Le premier liant, le Tradical PF70, est un mélange manufacturé par Balthazard Cotte Bâtiment (BCB) qui se compose de 75 % de chaux aérienne, 15 % de chaux hydraulique et 10 % de pouzzolanes. L'ajout de pouzzolanes a pour but d'activer la carbonatation de la chaux et aussi de favoriser un durcissement au cœur du matériau. Sa composition chimique et ses propriétés sont résumées dans le Tableau 2-2.

L'essai de compression à 28 jours réalisé sur l'éprouvette cylindrique de Tradical PF70 de 220 mm × Ø110 mm montre que son comportement est comparable à celui du béton classique mais avec une plus faible résistance et aussi un plus faible module d'élasticité, respectivement 10 MPa et 4 GPa pour un rapport Eau/Liant égale à 0,5 (Figure 2-12).

Tradical PF70	
SiO ₂	10,51
Al ₂ O ₃	3,66
Fe ₂ O ₃	1,58
CaO	78,36
MgO	1,02
SO ₃	1,6
K ₂ O	0,42
Na ₂ O	0,25
P ₂ O ₅	0,07
TiO ₂	0,09
Cl	0,01
Mn ₂ O ₃	0,08
Densité	0,65±0,02
Granulométrie	0,001 ÷ 0,009 mm
Compression	≥ 4,3 N/mm ²
Flexion	≥ 1,4 N/mm ²

Tableau 2-2 : Composition chimique et propriétés du liant Tradical PF70 (source de Balthazard Cotte Bâtiment)

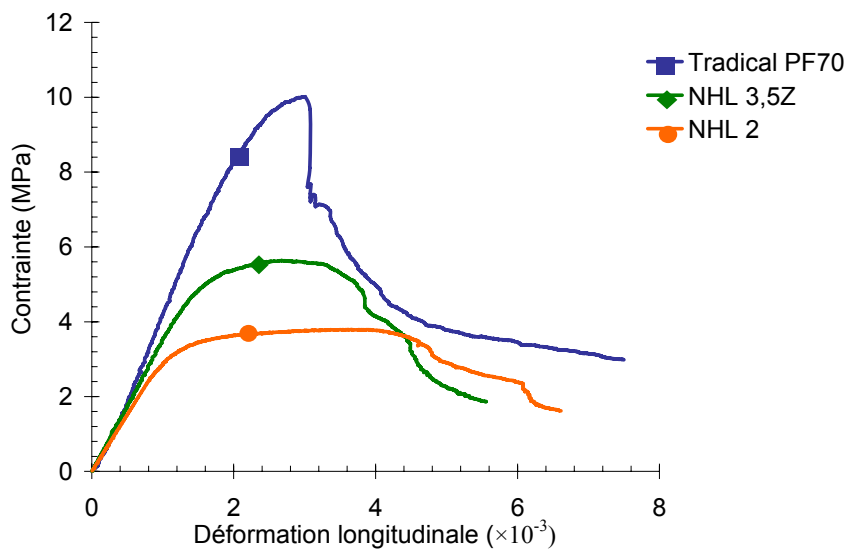


Figure 2-12 : Comportement en compression à 28 jours des liants étudiés

Grâce aux observations effectuées au MEB sur la structure du Tradical PF70, on peut facilement apprécier l'hétérogénéité de la porosité (Figure 2-13). La taille des pores observés peut s'étendre de quelques micromètres à quelques millimètres.

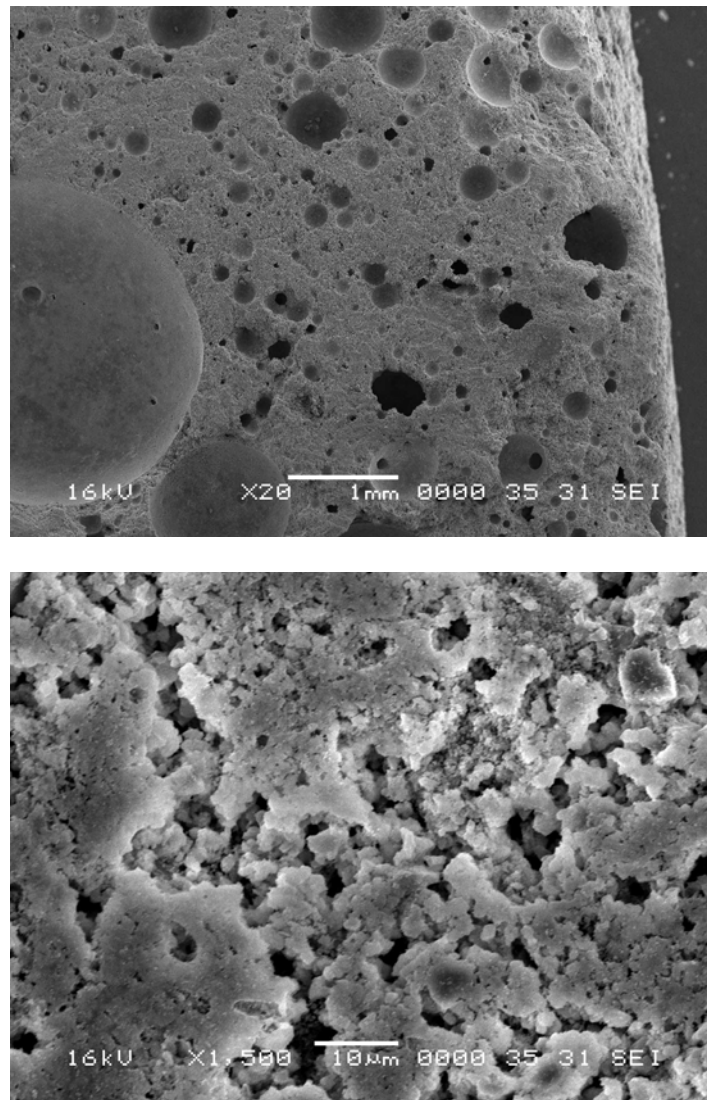


Figure 2-13 : Microstructure du mortier de liant Tradical PF70 (le rapport E/L=0,5)

Les essais mécaniques réalisés sur les prismes 4×4×16 cm indiquent bien une dépendance de la résistance en compression et en flexion 3 points avec le rapport Eau/Liant (Figure 2-14a et b). Plus ce rapport augmente, plus la résistance mécanique est faible ; cela s'explique par le fait qu'un excès en eau donne un matériau plus poreux et de faible densité. Cependant, on remarque que lorsque ce rapport E/L est inférieur à 0,4, l'ouvrabilité du liant est gravement réduite.

Pour les autres liants, leur étude a seulement été destinée à estimer leur influence sur les propriétés du béton de chanvre. Leurs résistances n'ont donc pas été étudiées en détail comme celles du liant Tradical PF70. Les comportements en compression des deux chaux hydrauliques NHL 2 et NHL 3,5Z sont observables sur la Figure 2-12. A titre de comparaison, les éprouvettes obtenues avec le Tradical PF70 sont les plus résistantes, celles obtenues avec la chaux NHL 2 étant les moins résistantes. Toutefois, sur le plan de la résistance mécanique, on pourrait supposer que le liant permettant d'obtenir les plus grandes résistances serait le

ciment CPA 52,5 N. En revanche, le matériau possède un comportement d'autant plus fragile que sa résistance en compression est élevée.

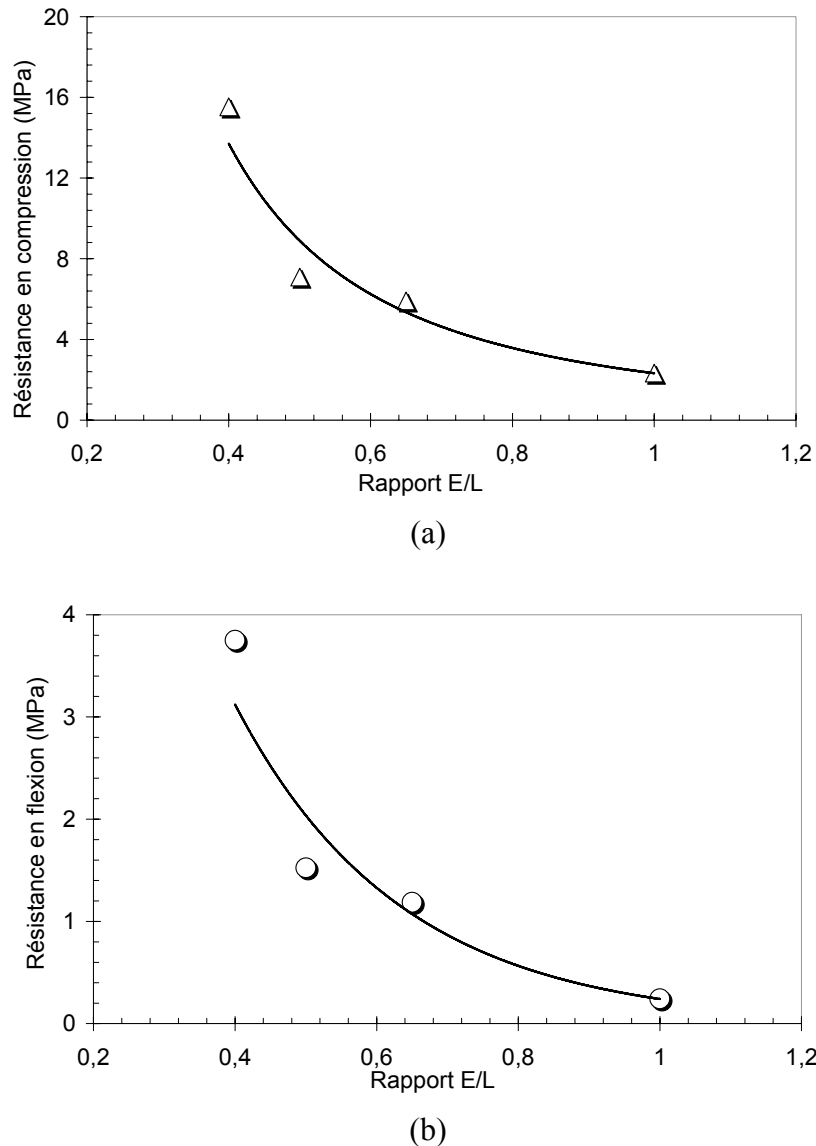


Figure 2-14 : Evolution de la résistance en compression (a) et en flexion 3 points (b) à 28 jours des éprouvettes de Tradical PF70 en fonction du rapport E/L.

Si l'on tient compte de la grande compressibilité de la chènevotte, l'utilisation du liant dont le module d'élasticité est le plus grand n'est certainement pas un critère à prendre en compte pour l'amélioration de la résistance mécanique du béton de chanvre.

2.2.2. Propriétés thermiques

En ce qui concerne les caractéristiques thermiques des liants, les mesures de la conductivité thermique ont été réalisées sur des échantillons de 10 cm d'arrête et de 3 cm d'épaisseur. Cette méthode et aussi les conditions de la mesure sont indiquées en détail dans le chapitre 6

(cf. § 6.1). Les échantillons étudiés sont des pâtes de liants durcies obtenus avec rapport E/L égale à 0,5. Avant d'effectuer la mesure, ils sont préalablement séchés à 80°C jusqu'à stabilisation de leur masse. Notons que la conductivité thermique du ciment n'a pas été mesurée. Pour une masse volumique sèche d'environ 1200 kg/m³, les conductivités thermiques des différentes pâtes sont très proches (Tableau 2-3).

Liant	Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Tradical PF70	0,373
NHL 3,5Z	0,37
NHL 2	0,363

Tableau 2-3 : Conductivités thermiques des liants pour une masse volumique sèche d'environ 1200 kg/m³

2.3. Bilan

Les études décrites dans ce chapitre ont mis en lumière les caractéristiques des composants du béton de chanvre, notamment les chènevottes. Ces connaissances doivent être prises en compte lors de la formulation mais également la fabrication des éprouvettes. De plus, elles permettront d'expliquer les propriétés mécaniques et thermiques de ce matériau.

La structure intrinsèque très poreuse des deux granulats employés a été identifiée par les mesures de masses volumiques et aussi grâce aux observations au MEB. Cette structure confère une légèreté toute particulière à ces matériaux mais aussi un énorme pouvoir d'absorption d'eau.

A partir de ces composants, des dizaines de compositions ont été élaborées pour étudier les propriétés du béton de chanvre. Sur le plan de la formulation, il est nécessaire de noter qu'actuellement il n'existe pas encore de Normes ou de préconisations pour ce type de matériaux. Le chapitre suivant présentera les principes de formulation de notre étude.

Chapitre 3. Programme expérimental

D'une manière générale, ce troisième chapitre est une description des principes de formulation retenus, compte tenu du procédé de mise en œuvre par compactage qui sera appliqué et décrit en détail au chapitre suivant. Dans ce cadre, la principale difficulté consiste à prendre en compte la capacité d'absorption d'eau et la compressibilité de la chènevotte. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans l'élaboration du matériau, nous essayerons d'établir un plan d'expériences afin d'obtenir le maximum d'information avec un nombre de compositions limité. Le but est d'examiner l'influence des paramètres étudiés sur les propriétés mécaniques et thermique du béton de chanvre produit. Les trois paramètres influents retenus lors de l'élaboration de bétons compactés sont le rapport massique Liant/Granulat (L/G), le rapport massique Eau/Liant (E/L) et le compactage. Ce dernier est exprimé par la masse volumique visée de l'éprouvette à l'issue de la mise en œuvre. D'autres paramètres comme la nature du liant, la présence des fibres (granulat CF) ou la taille du granulat sont également étudiés.

3.1. Formulation du béton de chanvre

3.1.1. Principes

Dans cette étude, nous visons à réaliser différents mélanges en faisant varier le liant, le granulat et la proportion entre les constituants. La comparaison des résultats des essais et des mesures entre les uns et les autres nous permettra de mettre en lumière l'influence de chacun des paramètres sur les caractéristiques du béton de chanvre.

Après nos études préliminaires présentées dans Nguyen *et al.* (2009) (2008a) (2008b) (2008c), les paramètres principaux influant sur les propriétés mécaniques du béton de chanvre ont été pris en considération. Ces paramètres se classent en deux catégories : ceux de composition et ceux de mise en œuvre. En ce qui concerne les premiers, nous allons étudier les paramètres suivants :

- La nature du liant (Tradical PF70 ; NHL 2 ; NHL 3,5Z ; Ciment)
- La présence des fibres (granulat CP et CF)
- Le rapport massique Liant/Granulat (L/G)
- La masse volumique initiale ρ_{initiale} (compactage)
- Le rapport massique Eau/Liant (E/L), avec E : la quantité d'eau totale dans le mélange
- La taille du granulat dont l'influence est étudiée sur quatre fractions granulométriques : 1,25 – 2,5 mm (taille T1) ; 2,5 – 3,15 mm (taille T2) ; 3,15 – 5 mm (taille T3) ; > 5mm (taille T4).

A propos des paramètres liés à la mise en œuvre, seul le compactage sera étudié car notre programme de recherche s'oriente vers les éléments préfabriqués, structurels et/ou isolants. Ce paramètre correspond à la masse volumique initiale des éprouvettes, c'est à dire celle obtenue à l'issue de la mise en œuvre par compactage.

Parmi les paramètres ci-dessus, il est nécessaire de remarquer que la nature du liant, celle du granulat ainsi que sa taille sont des grandeurs discrètes. A l'inverse, le rapport L/G, le rapport E/L et la masse volumique initiale sont des grandeurs continues. Ces paramètres sont des paramètres fondamentaux pour formuler le béton de chanvre dans notre étude. Pour chacun d'entre eux, trois niveaux ont été attribués : faible (A), moyen (B), fort (C). Cette dénomination a pour but de faciliter l'identification des éprouvettes. Notons qu'actuellement il n'y a pas de méthode définie ou d'étude détaillée sur la formulation des bétons de chanvre. Les niveaux de ces paramètres sont choisis en se basant sur la formulation recommandée par les règles professionnelles (Association construire en chanvre 2007). Le niveau moyen du rapport L/G est conservé tout proche de la valeur recommandée, mais le rapport E/L dans notre étude est beaucoup plus faible. L'idée est que lors du compactage, les granulats sont en partie essorés et rendent suffisamment d'eau pour le liant. Le compactage du matériau conduit à une masse volumique initiale du matériau nettement plus élevée dans notre étude. Par ailleurs, le choix du niveau des paramètres dépend également de la capacité du dispositif de compactage utilisé.

La valeur de chacun des niveaux est présentée dans le Tableau 3-1 qui résume également tous les paramètres utilisés pour la formulation du béton de chanvre.

Nature du liant	Tradical PF70; NHL 2; NHL 3,5Z; Ciment CPA 52,5N			
Nature du granulat	Chênevotte pure (CP) et fibré (CF)			
Taille du granulat	1,25-2,5mm; 2,5-3,15mm; 3,15-5mm; >5mm (granulat CP)			
	Niveau			
	Faible (A)	Moyen (B)	Fort (C)	Chanvrière de l'Aube (*)
Rapport Liant/Granulat (L/G)	1,11	2,15	3,48	2
Masse volumique initiale ρ_{initiale} (kg/m ³)	684	899	963	672
Rapport Eau/Liant (E/L)	0,55	0,86	0,93	1.5

(*) Formulation recommandée par Chanvrière de l'Aube (Cérézo, 2005)

Tableau 3-1 : Tableau récapitulatif des paramètres de formulation du béton de chanvre

3.1.2. Calcul du dosage des composants

Avant d'aborder les principes de calcul du dosage des composants, il convient de préciser le terme "configuration" que nous allons utiliser. Dans cette étude, ce terme désigne la combinaison formée par les rapports L/G et E/L ainsi que la masse volumique initiale de l'éprouvette (ρ_{initiale}), autrement dit le dosage des composants sans prise en compte du type de liant ou de granulat. En connaissant ces paramètres, nous pouvons facilement calculer le dosage des composants (*Formule 2-1*).

- Données de base : rapport massique L/G, rapport massique E/L, masse volumique initiale ρ_{initiale}
- Calcul des quantités des composants pour 1 mètre cube :

$$G+L+E=\rho_{\text{initiale}}$$

$$\text{Ou } G + \frac{L}{G} \times G + \frac{L}{G} \times \frac{E}{L} \times G = \rho_{\text{initiale}}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} G = \frac{\rho_{\text{initiale}}}{1 + \frac{L}{G} + \frac{E}{L} \times \frac{L}{G}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ L = \frac{L}{G} \times G \text{ (kg/m}^3\text{)} \\ E = \frac{E}{L} \times \frac{L}{G} \times G \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{cases} \quad [2-1]$$

Ces principes de calcul des dosages ont été appliqués pour la plupart des compositions à l'exception de quelques-unes. Ce sont les compositions supplémentaires élaborées pour étudier l'influence du rapport E/L, numérotées de 26 à 31 dans les tableaux 3-2 et 3-3 (cf. § 5.3.6).

3.1.3. Récapitulation des compositions étudiées

Presque toutes les configurations étudiées sont géométriquement repérées comme des points dans un repère cartésien (Figure 3-1). Le premier axe de ce repère est attribué au rapport massique L/G, le second à la masse volumique initiale, ρ_{initiale} , et le troisième au rapport massique E/L. L'ensemble de ces points forme notre domaine d'étude.

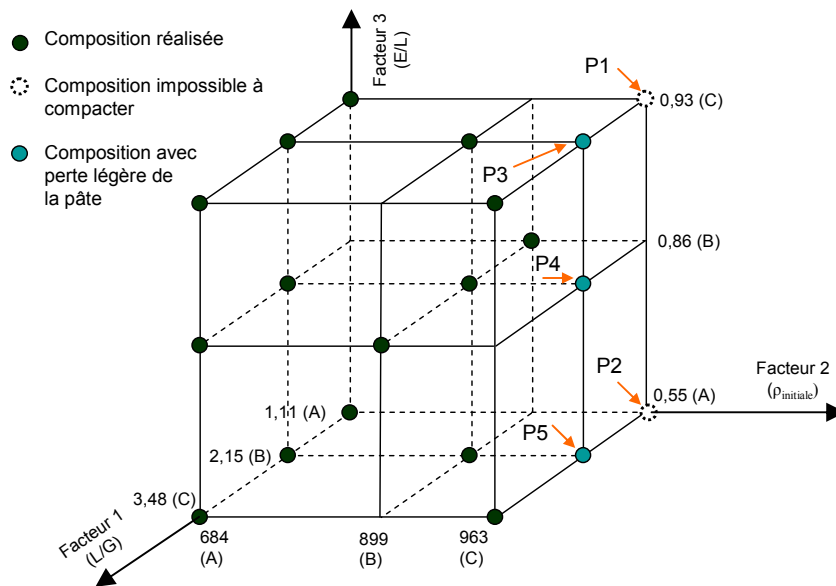


Figure 3-1 : Répartitions configurations définissant le domaine d'étude

Au début, nous avons prévu de réaliser les configurations situées aux huit extrémités de ce domaine d'étude. Cependant, les configurations P1 ou P2 se sont révélées infaisables car le compactage nécessaire dépasse la capacité du dispositif de compactage (cf. 3.2.2.1). D'autres points intermédiaires ont donc été ajoutés. Par ailleurs, pour les éprouvettes des configurations P3, P4, P5, on a observé une légère perte de pâte.

Sur le plan de la dénomination, chaque composition est nommée selon le granulat utilisé et le niveau des paramètres (dans l'ordre : L/G, ρ_{initiale} , E/L). Par exemple, la composition CP 8 – BCB correspond au mélange utilisant le granulat CP, le niveau B (2,15) pour le rapport L/G, le niveau C (963 kg/m³) pour la masse volumique initiale ρ_{initiale} et le niveau B (0,89) pour le rapport E/L.

En général, toutes les configurations sont réalisées avec les granulats CP et CF. Au total, 31 compositions ont été élaborées pour le granulat CP et 18 compositions pour le granulat CF. Elles sont toutes détaillées dans le Tableau 3-2.

N°	Configuration	Liant	Granulat		L/G	E/L	ρ_{initiale} (kg/m ³)	Dosage (kg/m ³)		
			CP	CF				Granulat	Liant	Eau
1	AAA	Tradical PF70	x	x	1,11	0,55	684	251	279	153
2	BBB	—	x	x	2,15	0,86	899	180	387	331
3	BBA	—	x	x	2,15	0,86	899	245	446	245
4	BBC	—	x	x	2,15	0,93	899	175	375	349
5	ABB	—	x	x	1,11	0,86	899	294	326	279
6	CBB	—	x	x	3,48	0,86	899	120	419	360
7	BAB	—	x	x	2,15	0,86	684	137	295	252
8	BCB	—	x	x	2,15	0,86	963	193	415	355
9	CCC	—	x	x	3,48	0,93	963	121	421	421
10	BAA	—	x	x	2,15	0,55	684	158	340	186
11	BAC	—	x	x	2,15	0,93	684	133	286	266
12	BCA	—	x	x	2,15	0,55	963	222	478	262
13	BCC	—	x	x	2,15	0,93	963	187	402	374
14	AAC	—	x	x	1,11	0,93	963	218	242	224
15	CAB	—	x	x	3,48	0,86	684	92	319	274
16	CAA	—	x	x	3,48	0,55	684	107	373	204
17	CAC	—	x	x	3,48	0,93	684	89	308	287
18	CCA	—	x	x	3,48	0,55	963	151	524	288
19	BBB	Ciment CPA 52,5	x		2,15	0,86	899	180	387	331
20	BBB	NHL 2	x		2,15	0,86	899	—	—	—
21	BBB	NHL 3,5Z	x		2,15	0,86	899	—	—	—
22	BBB	Tradical PF70	1,25-2,5 mm		2,15	0,86	899	—	—	—
23	BBB	—	2,5-3,15 mm		2,15	0,86	899	—	—	—
24	BBB	—	3,15-5 mm		2,15	0,86	899	—	—	—
25	BBB	—	>5mm		2,15	0,86	899	—	—	—
26	EL035	—			2,75	0,35	1047	222	611	214
27	EL045	—	x		2,41	0,45	1000	222	536	241
28	EL070	—	x		1,84	0,7	920	222	410	287
29	EL085	—	x		1,61	0,85	873	222	353	300
30	EL1	—	x		1,44	1,00	863	222	320	320
31	EL125	—	x		1,22	1,25	831	222	271	338

Tableau 3-2 : Récapitulation des compositions réalisées selon les rapports massiques considérés et les dosages (kg/m³) équivalents

Les compositions de la ligne 1 à la ligne 18 ont pour but d'étudier l'influence des paramètres comme le rapport L/G, le rapport E/L, la nature du granulat et le compactage. Le liant utilisé est le Tradical PF70 et le granulat peut être soit CP, soit CF.

Les compositions de la ligne 19 à la ligne 21 ont été élaborées pour observer l'effet de la nature du liant sur les caractéristiques du béton de chanvre. Nous tenterons d'analyser cet effet à travers une même configuration correspondant au niveau intermédiaire pour chacun des paramètres : CP2-BBB, CP19-BBB Ciment ; CP20-BBB NHL 2; CP21-BBB NHL 3,5Z. (cf. § 5.3.1)

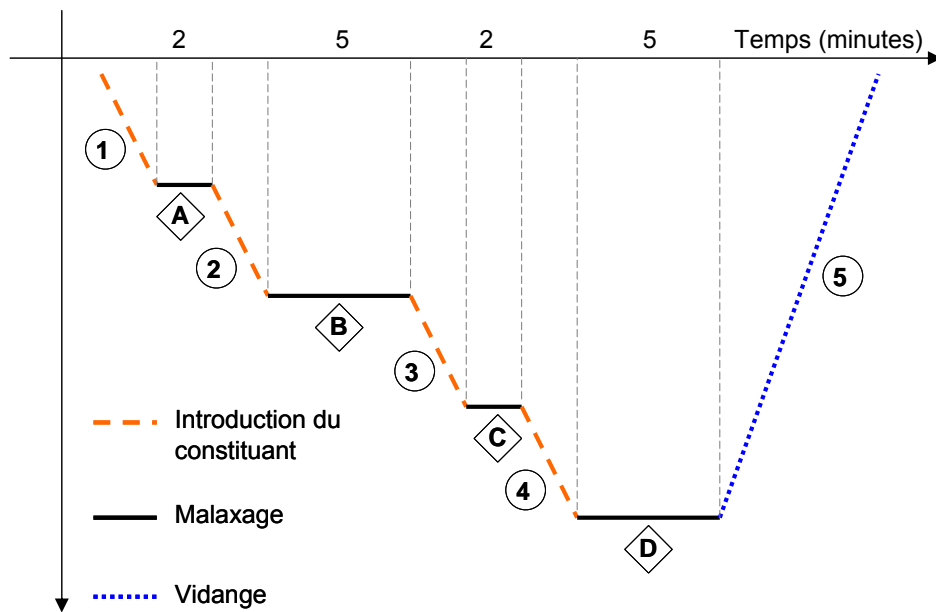
De la même façon, mais cette fois afin d'étudier l'effet de la taille du granulat, nous examinerons les compositions de la ligne 22 à la ligne 25 : CP22-BBB T1 ; CP23-BBB T2 ; CP24-BBB T3 ; CP25-BBB T4 (cf. 5.3.2).

Enfin, les compositions de la ligne 26 à la ligne 31 ont été ajoutées pour observer l'influence du rapport E/L sur les caractéristiques du béton de chanvre. (cf. 5.3.6). Ces compositions ne sont pas calculées selon les principes dans le paragraphe § 3.1.2, mais s'appuient sur la composition BCA. Ces dernières compositions ont été établies de façons à garder le même volume de granulat et de pâte que celui de la composition BCA (offrant les meilleures caractéristiques mécaniques), mais avec un rapport E/L variable. Sept compositions suivantes seront prises en considération : CP12-EL055 ; CP26-EL035 ; CP27-EL045 ; CP28-EL070 ; CP29-EL085 ; CP30-EL1 ; CP31-EL125.

3.2. Mise en œuvre des échantillons

3.2.1. Malaxage

Après le dosage des composants, le béton de chanvre est malaxé à l'aide d'un malaxeur à axe vertical (avec 3 bras) d'une capacité de 80 litres. La procédure de malaxage ainsi que ses différentes étapes sont décrites dans la Figure 3-2. Ce protocole se base sur celui de Cérézo (2005) et a pour buts d'éviter une trop forte absorption de l'eau de gâchage nécessaire à l'hydratation du liant par la chènevotte ainsi que d'obtenir une bonne homogénéité du mélange. Ce n'est qu'avec un mélange homogène que l'on assurera un bon contact entre les constituants (granulat, liant), une bonne homogénéité des particules de chènevotte et leur enrobage.



1. Introduction du granulat	A. Malaxage à sec pendant 2 minutes
2. Introduction de l'eau de pré - mouillage	B. Malaxage pendant 5 minutes
3. Introduction du liant	C. Malaxage pendant 2 minutes
4. Introduction de l'eau de gâchage	D. Malaxage pendant 5 minutes
5. Vidange du malaxeur	

Figure 3-2 : Schéma du cycle de malaxage du béton de chanvre et description des différentes étapes de ce processus

La quantité d'eau absorbée par la chènevotte lors de la mise en œuvre a été mesurée avec du chanvre mouillé pour la contrainte de compactage la plus élevée, jusqu'à 25 MPa (cf. 4.1.1). Cette proportion d'eau nous a servi de référence pour déterminer l'eau de pré mouillage pour CP et CF.

Néanmoins, pour quelques compositions, la quantité d'eau totale nécessaire est très faible et, dans ces cas, on ne distingue pas l'eau de pré – mouillage et celle de malaxage. Le schéma de malaxage est alors un peu modifié ; la totalité de l'eau n'est introduite qu'en une seule fois puis le mélange est malaxé pendant 5 minutes. Enfin, le liant est versé et mélangé pendant 5 minutes. A la sortie du malaxeur, le mélange paraît sec et sans cohésion car la majeure partie de l'eau a été absorbé par les granulats. Lors de la phase de compactage, les granulats sont en partie essorés, rendant suffisamment d'eau pour le liant.

Au cours du malaxage, des boulettes peuvent se former en fonction de la formulation, notamment de la nature du granulat. Elles apparaissent plus souvent dans le cas du granulat fibré CF que dans celui du granulat CP (Figure 3-3b). Ces boulettes doivent être brisées à la main pour obtenir une bonne homogénéité.

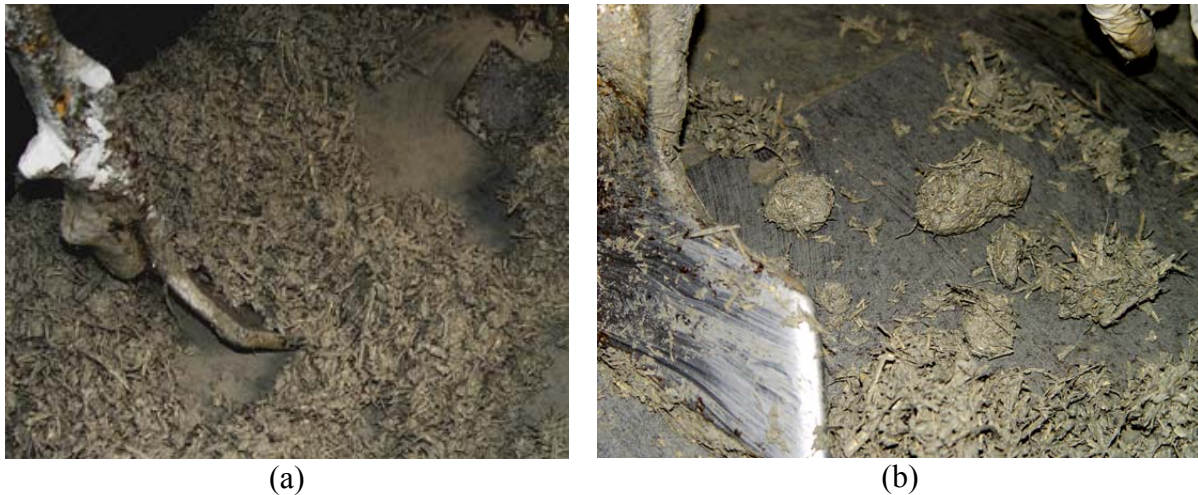


Figure 3-3 : Malaxage du béton de chanvre. (a) dans le cas du granulat CP. (b) Dans le cas du granulat CF

3.2.2. Epreuves pour l'essai de compression

3.2.2.1. Fabrication par le compactage

Pour la fabrication des éprouvettes de béton de chanvre, un dispositif spécifique a été dimensionné et utilisé pour cette étude. Il est présenté dans la Figure 3-4. Le détail des pièces est le suivant :

- Cylindre (1) en PVC de 100 mm de diamètre, de 600 mm de hauteur et de 5 mm d'épaisseur. Une fente est réalisée le long du cylindre et sert au démoulage des éprouvettes.
- Collier (2) et (3) : renfort du cylindre de compactage. En plus de sa fonction de collier (3), il sert aussi à bloquer le piston (5) après compactage.
- Fond démontable (4) en PVC
- Piston (5) en acier

L'expérience montre que les moules spécifiques en PVC fonctionnent bien à condition que la contrainte de compactage ne soit pas supérieure à 2,5 MPa (ce qui correspond à une force de 20 kN sur le piston). Au-delà, le compactage risque de déformer le cylindre en PVC.

Le compactage est exécuté à l'aide d'une presse électromécanique (Zwick HB 250) dont la capacité maximale est de 250 kN. Grâce au long parcours du bâti supérieur, ainsi qu'à celui de la traverse, elle permet une mise en place des dispositifs et un compactage facilités.

Les moules sont auparavant huilés (avec de l'huile végétale) afin de limiter les frottements entre le granulat et la paroi du cylindre. Une quantité donnée, déterminée préalablement, de béton de chanvre à l'état frais est introduite manuellement dans le moule. Avant de

compacteur, le piston est réglé avec un niveau pour assurer son alignement dans le cylindre (Figure 3-5a). Le compactage est piloté à la main ou en déplacement par la machine et se termine lorsque le piston arrive à la hauteur désirée où il est bloqué par deux vis opposées (Figure 3-4 et Figure 3-5b). Au moment précis où s'arrête le piston, la force de compactage est enregistrée.

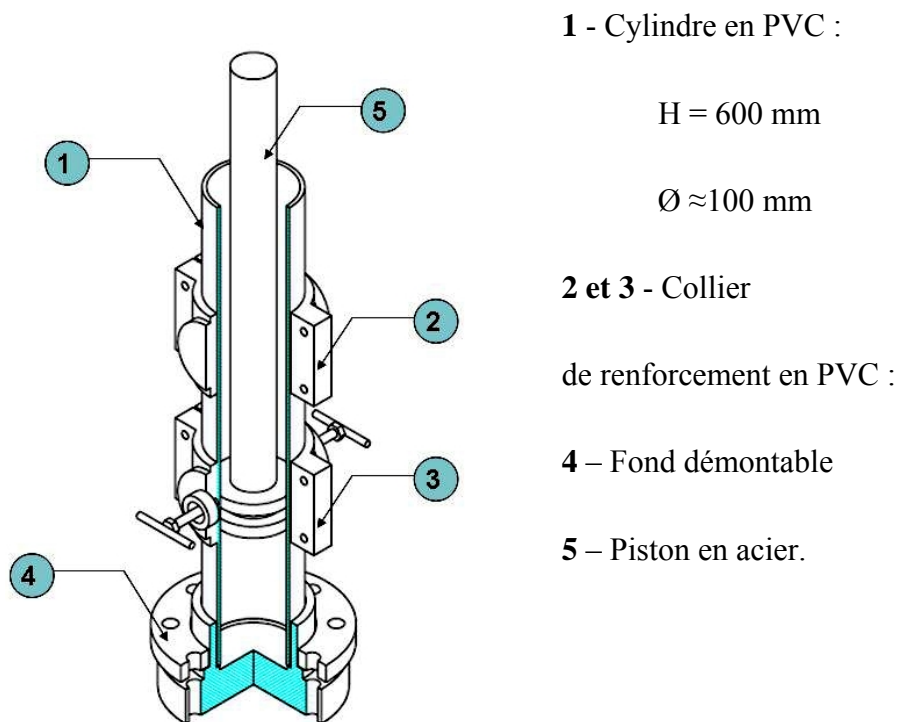
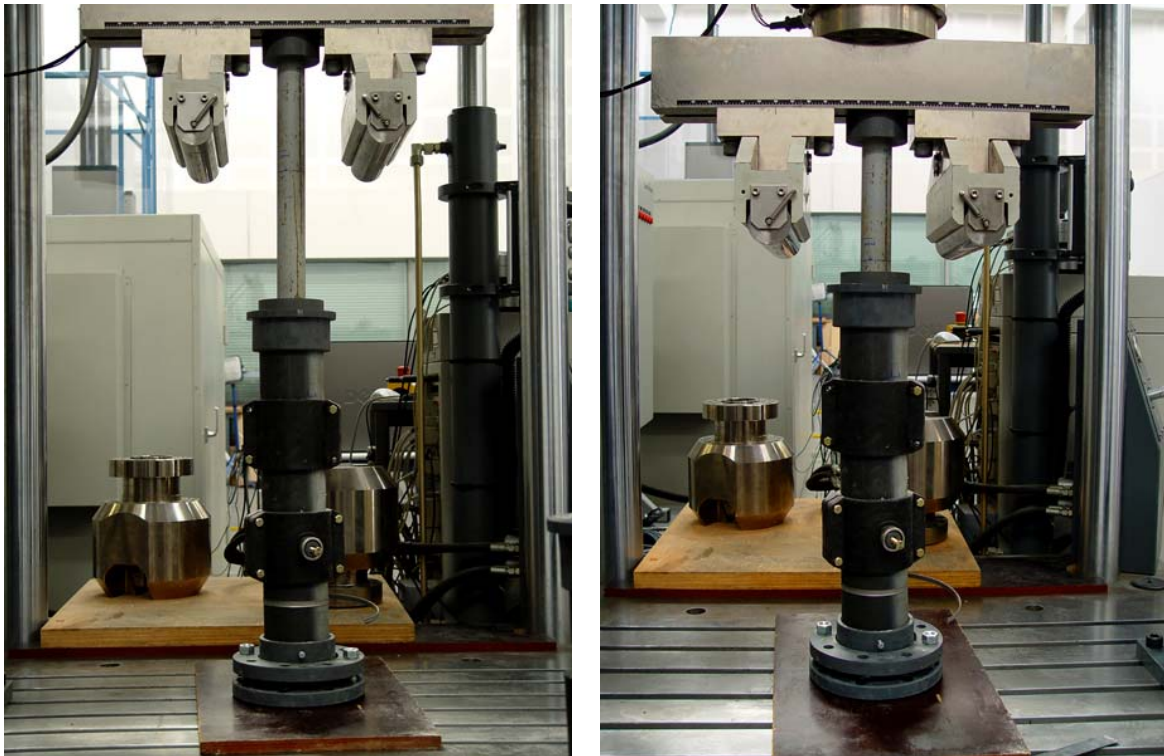


Figure 3-4 : Schéma du dispositif de compactage

Les éprouvettes restent ensuite confinées 48 heures dans ce moule avant d'en être extraites grâce au fond démontable. Les deux colliers de renforcement et le fond sont simplement dévissés pour agrandir légèrement la section du cylindre et extraire l'éprouvette. Ces éprouvettes ont une dimension d'environ $\text{Ø}100 \times 200$ mm. Notons que la hauteur des éprouvettes est souvent un petit peu supérieure à 200 mm. Un léger retour élastique des éprouvettes est parfois observé. Cette différence de hauteur peut causer des différences entre la masse volumique initiale ciblée (ρ_{initiale}) et celle réelle de l'éprouvette. Cette problématique fait l'objet du paragraphe (cf. § 4.2).

Par la suite, les éprouvettes sont stockées en atmosphère contrôlée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à $75 \pm 5\%$ d'humidité relative. Une ambiance relativement humide a été adoptée pour le stockage des éprouvettes après démoulage afin de limiter la compétition séchage/hydratation de la chaux hydraulique durant les premiers jours, tout en permettant une évaporation progressive de l'eau excédentaire éventuellement contenue, ou produite lors de la carbonatation de la fraction de la chaux aérienne.



(a)

(b)

Figure 3-5 : Compactage du béton de chanvre : (a) Début du compactage et (b) Fin du compactage

Les éprouvettes sont régulièrement pesées jusqu'à 90 jours afin de connaître l'évolution de leur masse. Les résultats seront présentés dans le paragraphe (cf. § 4.3).

Pour chaque composition, cinq éprouvettes ont généralement été réalisées : quatre éprouvettes pour l'essai de compression, deux à 28 jours, et deux à 90 jours, et une pour le prélèvement des échantillons pour la mesure de la conductivité thermique.

3.2.2.2. Préparation des éprouvettes avant de caractérisation en compression

Pour assurer l'homogénéité de contrainte dans l'éprouvette, la préparation des surfaces d'appui de celle-ci doit être effectuée consciencieusement. Dans notre cas, les éprouvettes en béton de chanvre ayant au préalable subi l'effet du compactage, les surfaces aux deux extrémités sont relativement planes. De petites hétérogénéités peuvent être observées éventuellement à la surface en contact avec le piston.

Le surfacage des éprouvettes est réalisé à l'aide d'une rectifieuse (Figure 3-6). Elle est généralement destinée aux éprouvettes en béton ou en roche mais elle s'avère utilisable pour le béton de chanvre, à condition de ne pas introduire d'eau durant le surfacage. Cette condition nous oblige à rectifier plusieurs fois, et progressivement pour éviter

l'endommagement des particules de chènevotte par frottement. Le surfaçage se termine lorsque l'éprouvette présente une surface lisse et rectifiée (Figure 3-7c).



Figure 3-6 : Surfaçage du béton de chanvre à l'aide d'une rectifieuse

Presque toutes les éprouvettes ont été surfacées, les dimensions finales après le surfaçage sont de 200 mm de hauteur et 100 mm de diamètre. Toutefois, le surfaçage n'a pas été réalisé pour quelques (les configurations CAC, CAB, CAA) éprouvettes en raison d'une faible adhésion des particules de chènevotte, le surfaçage risquait d'endommager sérieusement le matériau.

Une fois surfacées, les éprouvettes sont pesées et leur hauteur et diamètre sont mesurés. Ces grandeurs servent à déterminer leur masse volumique à 28 jours.

Par la suite, trois plaques en plastiques très minces et transparentes sont posées contre la surface extérieure de l'éprouvette cylindrique et maintenues à l'aide d'élastiques (Figure 3-7a). En fait, lors de l'essai de compression, trois LVDT (Linear Variable Differential Transducer) seront mis en contact avec ces plaques (Figure 3-7b) afin de mesurer l'expansion du diamètre moyen des éprouvettes, dans la direction perpendiculaire au chargement. Le rôle de ces cales est de limiter l'influence des défauts de la surface (souvent très hétérogène) sur le signal obtenu des LVDT durant l'essai. Ils sont de dimension 15×60 mm et ils sont placés tous les 120° autour du cylindre.

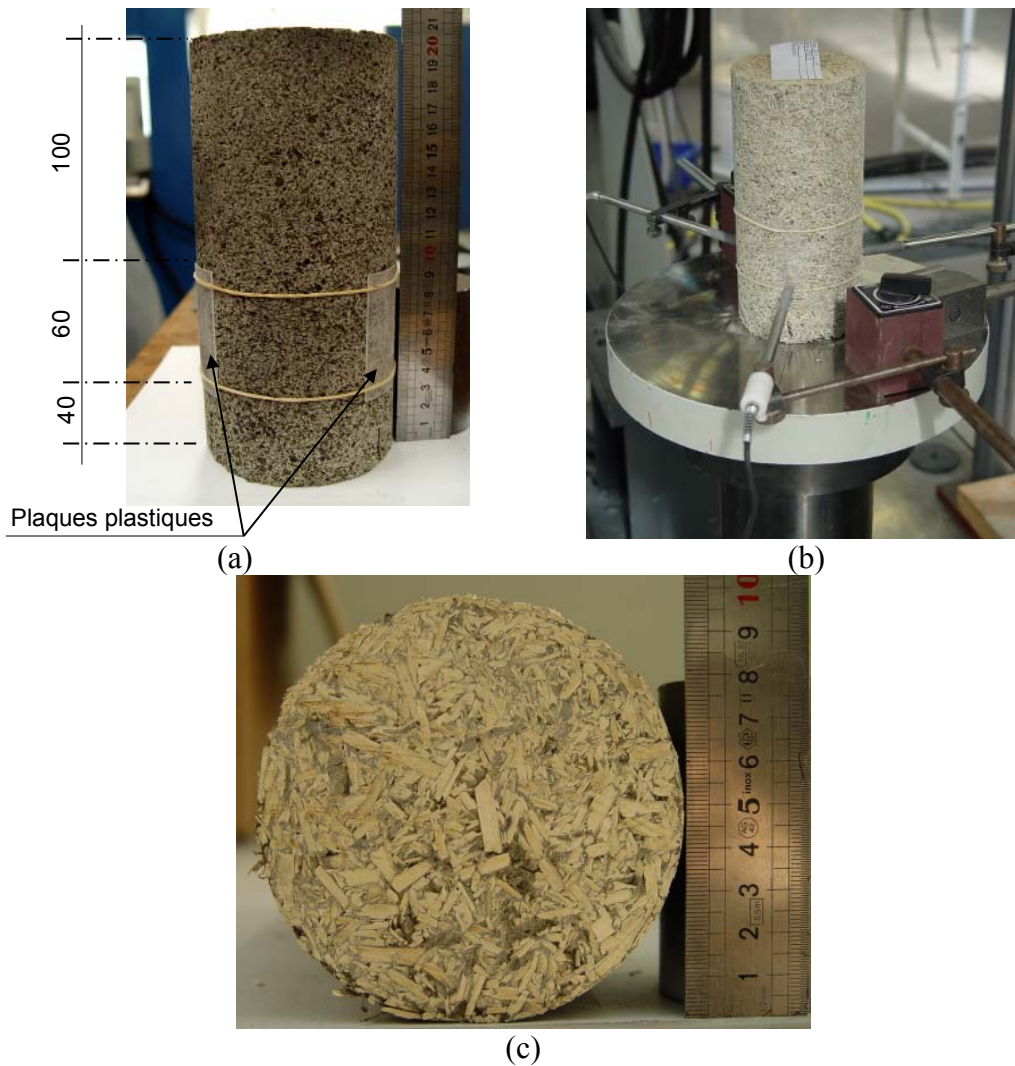


Figure 3-7 : Pose des plaques en plastique et les LVDT contre une éprouvette cylindrique (a) (b). Section transversale de la éprouvette cylindrique (c)

L'ensemble des LVDT fixé par rapport à l'un des plateaux, est initialement placé sur la moitié inférieure de l'éprouvette en raison de la grande déformabilité observée.

3.2.3. Découpe d'échantillons pour la mesure de la conductivité thermique

Parallèlement aux essais mécaniques conduits sur les éprouvettes cylindriques 100×200 mm, les éprouvettes sont découpées avec une scie circulaire pour en extraire des échantillons prismatiques de 60×60×30 mm³ destinés à la mesure de la conductivité thermique (Figure 3-9c et d). Ces échantillons sont prélevés selon un plan axial et transversal de manière et évaluer l'anisotropie de la conductivité thermique engendrée par l'orientation des particules du granulat lors du compactage à la mise en œuvre. Par ailleurs, le frottement du matériau le long du moule cylindrique peut produire une compacité plus importante de l'éprouvette à proximité du piston (cf. § 4.4). Quatre échantillons sont donc prélevés à différents niveaux de

l'éprouvette afin d'évaluer également le gradient de compacité dans l'éprouvette et son effet sur la conductivité thermique (Figure 3-8).

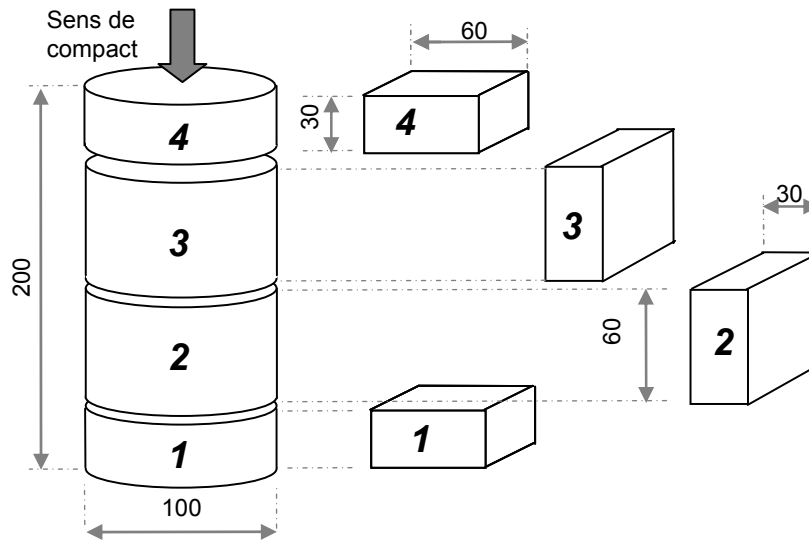


Figure 3-8 : Schéma du découpage des parallélépipèdes à partir d'un cylindre (dimensions en millimètre)

Le découpage a été exécuté en utilisant une scie ruban ; par la suite, les prismes sont surfacés et rectifiés (voir Figure 3-9a et b) pour assurer un bon contact avec le dispositif de la mesure de conductivité thermique décrit dans le paragraphe § 6.1.

Les échantillons sont séchés à 80°C pendant 7 jours, temps à partir duquel leur masse est quasiment constante. Jusqu'à 80°C, peu ou pas d'altération de la chaux et du chanvre ont été constatées. Cette température a été adoptée pour obtenir rapidement un séchage jusqu'à obtenir une masse constante.

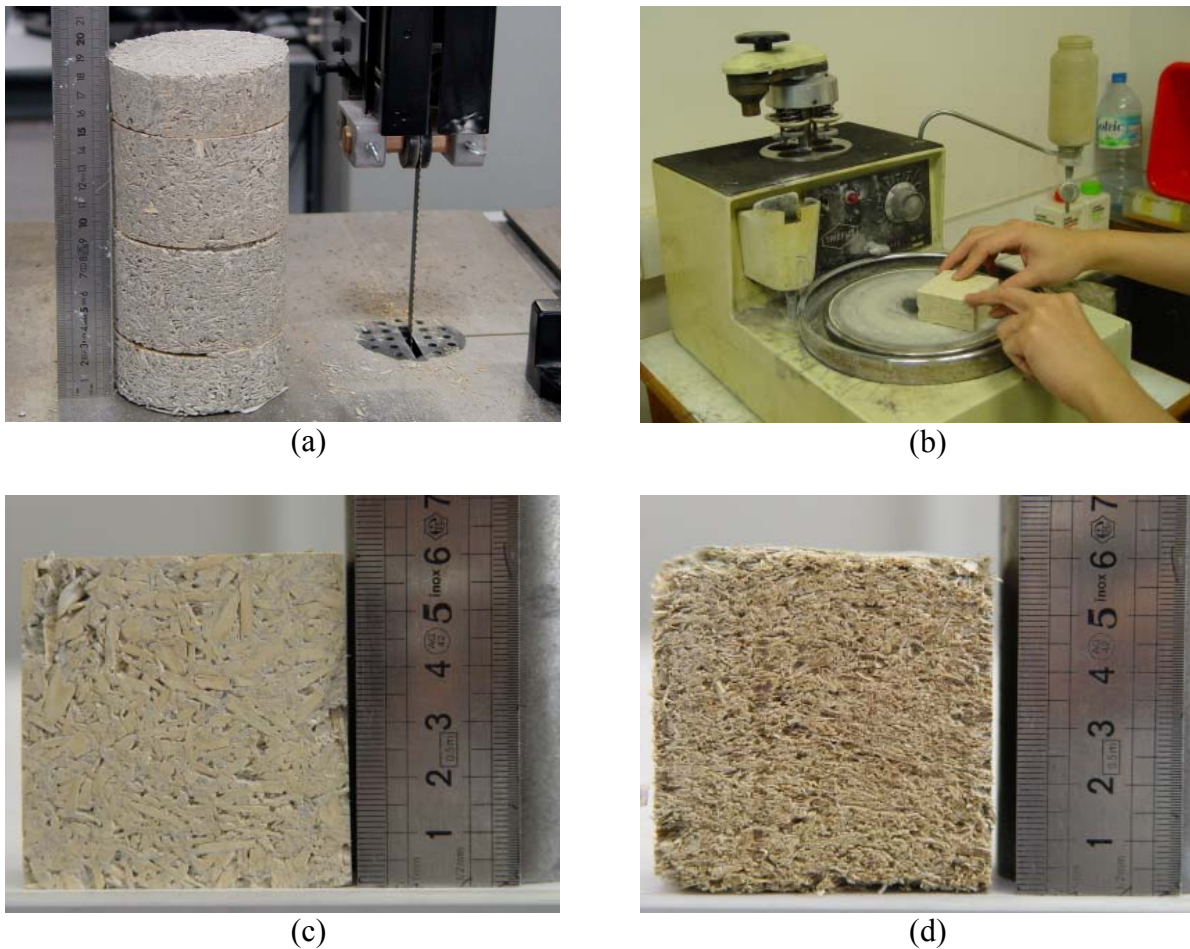


Figure 3-9 : Découpage et surfacage des prismes du béton de chanvre (a) (b). Echantillon du granulat CP (c). Echantillon du granulat CF (d)

3.2.4. Plaque pour essai de flexion

Les plaques de béton de chanvre ont été dimensionnées en s'appuyant sur la Norme NF EN 520 qui rassemble les spécifications pour les plaques de plâtre utilisées dans les ouvrages de construction. Il faut noter que dans cette étude, les plaques de béton de chanvre sont utilisées pour des essais de flexion 3 points. Les opérations de cet essai sont réalisées selon le protocole établi dans Norme NF EN 520. Dans notre étude, des plaques de 400×600 mm ont été fabriquées puis découpées en deux selon leur largeur afin d'avoir deux plaques de 300×400 mm, qui ont été testées jusqu'à rupture.

Le processus de fabrication se compose des étapes suivantes :

- Malaxage, idem pour toutes les éprouvettes (cf. § 3.2.1)
- Mise en œuvre : Le mélange frais est versé dans un moule constitué de plaques en bois vissées (Figure 3-10). Le mélange doit être soigneusement répandu au sein de l'espace intérieur du moule pour assurer une bonne homogénéité.

- Compactage : il est exécuté à l'aide d'une presse hydraulique Zwick HB 250 par l'intermédiaire d'un assemblage de deux plaques, l'une en bois, l'autre en acier qui joue le rôle de piston. Les dimensions de cet assemblage sont un petit peu inférieures à celles de la plaque de béton de chanvre ($\approx 400 \times 600$ mm). Les dimensions de la plaque métallique qui joue le rôle de répartiteur de la force de compactage, sont $350 \times 450 \times 10$ mm (Figure 3-10a). Il faut noter que le compactage de la plaque est beaucoup plus difficile à réaliser que celui des cylindres (cf. § 3.2.2.1) à cause de sa grande surface de contact (30 fois plus grande que celle des éprouvettes cylindriques) ce qui nécessite une force nettement supérieure. Une fois que la plaque n°3 arrive à la profondeur déterminée à laquelle l'épaisseur de la plaque de béton de chanvre est de l'ordre de 15 mm, la plaque métallique n°4 est enlevée. Des cales en bois sont installées et fixées sur la plaque n°3 pour la bloquer correctement (voir Figure 3-10b). Ensuite, l'ensemble de la plaque de béton de chanvre et du moule est déplacé dans la même salle climatisée que celle des éprouvettes cylindriques ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$, $HR=75 \pm 5\%$). La plaque de béton de chanvre reste ainsi confinée dans le moule pendant une semaine au lieu de 48 heures pour les cylindres. En effet, des plaques ayant été démoulées après 48 heures présentaient un retour élastique (gonflement) important par rapport à l'épaisseur désirée (15 mm). Leur épaisseur après le démoulage était deux fois plus élevée que celle avant le démoulage. Après démoulage, les plaques sont posées sur des grilles métalliques pour avoir deux surfaces libres de contact avec l'air.
- Découpage : Après 40 jours, les plaques sont découpées en deux suivant la largeur à l'aide d'une scie à ruban pour obtenir deux plaques de 300×400 mm.

Pour les mêmes raisons de difficultés de compactage qu'avec les cylindres, nous n'avons pas pu fabriquer les plaques correspondant à toutes les configurations présentées dans le paragraphe § 3.1.3. Il a également été impossible de compacter des plaques ayant pour configuration $\rho_{\text{initiale}} = 963 \text{ kg/m}^3$ (niveau C) ou un rapport $L/G=1,11$ (niveau A). Il a été décidé de ne réaliser les plaques de béton que pour 8 compositions : 4 pour le granulat CP et 4 pour le granulat CF (Tableau 3-3).

Avec ces compositions, nous cherchons à étudier l'influence du compactage, de la nature du granulat et aussi du rapport L/G sur la résistance en flexion des plaques. Les opérations de l'essai de flexion 3 points et les résultats seront présentés plus en détail dans le chapitre 5.

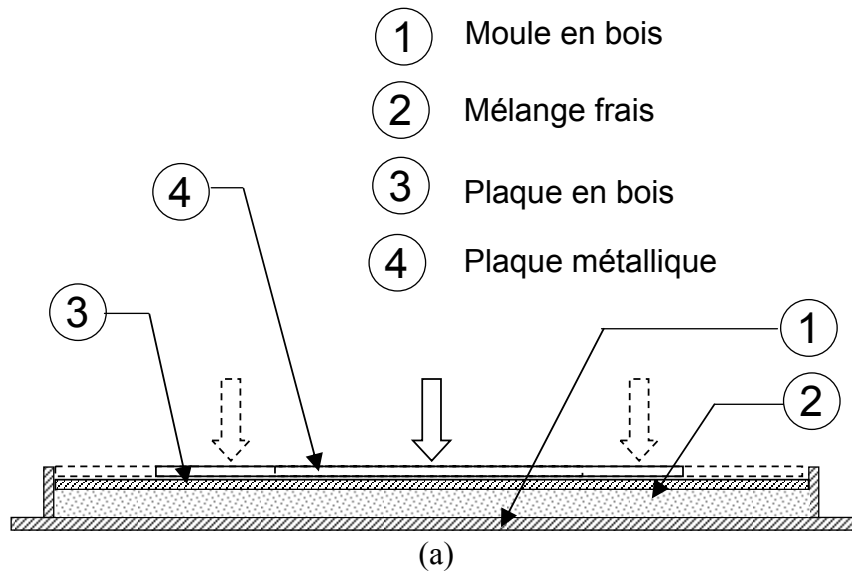


Figure 3-10 : Schéma du dispositif de compactage des plaques de béton de chanvre (a) et son confinement dans le moule en bois (b)

N°	Configuration	Liant	Granulat		L/G	E/L	p initiale (kg/m ³)
			CP	CF			
2	BBB	Tradical PF70	×	×	1,11	0,55	684
6	CBB	—	×	×	3,48	0,86	899
7	BAB	—	×	×	2,15	0,86	684
15	CAB	—	×	×	3,48	0,86	684

Tableau 3-3 : Compositions utilisées pour réaliser les plaques du béton de chanvre

3.3. Bilan des compositions effectuées et à tester

N°	Configuration	Liant	Caractéristiques mécaniques				Conductivité thermique	
			Compression		Flexion		CP	CF
			CP	CF	CP	CF		
1	AAA	Tradical PF70	x	x	x	x		
2	BBB	—	x	x	x	x	x	x
3	BBA	—	x	x				
4	BBC	—	x	x			x	
5	ABB	—	x	x			x	x
6	CBB	—	x	x	x	x	x	x
7	BAB	—	x		x	x	x	x
8	BCB	—	x				x	x
9	CCC	—	x				x	x
10	BAA	—	x	x			x	x
11	BAC	—	x	x			x	x
12	BCA (EL055)	—	x	x			x	x
13	BCC	—	x	x			x	x
14	AAC	—	x	x				
15	CAB	—	x	x	x	x		
16	CAA	—	x	x			x	x
17	CAC	—	x	x			x	x
18	CCA	—	x	x			x	x
19	BBB	Ciment CPA 52,5	x					
20	BBB	NHL 2	x				x	
21	BBB	NHL 3,5Z	x				x	
22	BBB	Tradical PF70	x (T1)					
23	BBB	—	x (T2)					
24	BBB	—	x (T3)					
25	BBB	—	x (T4)					
26	EL035	—	x					
27	EL045	—	x					
28	EL070	—	x					
29	EL085	—	x					
30	EL1	—	x					
31	EL125	—	x					

Tableau 3-4 : Bilan des essais et des mesures essentielles effectués sur les bétons de chanvre manufacturés avec le granulats CP et CF

Dans la mesure où les paramètres et les caractéristiques étudiés sont nombreux, il est nécessaire de faire un bilan des essais et des mesures que nous avons réalisés. Les essais et les mesures effectués sur les bétons durcis qui seront abordés dans les chapitres 5 et 6 sont les suivants :

- Essai de compression uniaxial sur les éprouvettes cylindriques

- Essai de flexion trois points sur les plaques de 300×400 mm
- Mesure de la conductivité thermique sur les échantillons prismatiques prélevés à partir des cylindres

Le Tableau 3-4 indique les essais mécaniques et les mesures de conductivité thermique réalisés.

D'une manière générale, l'essai mécanique de compression a été réalisé sur presque toutes les compositions. La mesure de la conductivité thermique a également été effectuée assez largement. Cependant, l'essai mécanique de flexion a été réalisé seulement sur huit compositions en raison de difficultés liées au compactage des plaques (cf. § 3.2.4).

En outre, d'autres caractéristiques du béton de chanvre seront également étudiées comme l'évolution dans le temps de la masse de l'éprouvette, le durcissement ou l'anisotropie thermique due à l'orientation des particules de la chènevotte. Cependant, leur étude sera réalisée à plus petite échelle.

3.4. Bilan

Une trentaine de compositions pour le granulats CP et une dizaine de compositions pour le granulats CF ont été élaborées dans ce programme expérimental. L'objectif est d'étudier l'influence des différents paramètres (nature du liant et du granulats, rapports E/L et L/G, masse volumique initiale) sur les propriétés mécaniques et thermiques. Parmi ces paramètres, remarquons que les rapports L/G, E/L et le compactage sont les paramètres fondamentaux qui permettent de calculer le dosage des composants du béton de chanvre. Le paramètre de compactage de cette étude est exprimé comme la masse volumique initiale de l'éprouvette après la mise en œuvre par compactage. Le niveau de compactage appliqué ici est nettement supérieur à celui des blocs de béton de chanvre commercialisés actuellement ainsi que celui utilisé dans les autres études (Cérézo, 2005) (Collet, 2004). L'idée de base est de diminuer la proportion du liant tout en augmentant le compactage pour obtenir des propriétés mécaniques supérieures ou équivalentes.

Au total, dans ce programme expérimental, environ 200 cylindres de Ø100×200 mm, 64 prismes de 60×60×30 mm et 16 plaques de 300×400 mm ont été fabriqués pour étudier les propriétés mécaniques et la conductivité thermique du béton de chanvre. Les résultats des essais et mesures sur ces échantillons seront présentés dans les chapitres qui suivent.

Chapitre 4. Étude du procédé de fabrication par compactage

Malgré une importante proportion des éléments préfabriqués de béton de chanvre dans la construction en chanvre, il y a peu d'information sur les études expérimentales traitant du compactage de béton de chanvre à la mise en œuvre. Pour étudier cette question, nous avons entreprise une campagne expérimentale utilisant ce procédé pour confectionner nos éprouvettes.

Une étude sur le compactage du chanvre mouillé a d'abord été effectuée pour comprendre le comportement du granulat lui – même sous l'action du compactage. Ce type d'essai a été réalisé sur les deux types de granulats retenus : non fibré (CP) et fibré (CF).

Ensuite, au cours du procédé de mise en œuvre, la force de compactage a été enregistrée afin d'analyser l'influence des paramètres, comme la masse volumique initiale, les rapports L/G et E/L, ainsi que le dosage final du granulat par volume unitaire, sur la contrainte de compactage.

De plus, l'effet du compactage sur les caractéristiques physiques (masse volumique réelle, homogénéité de l'éprouvette) et l'évolution de la perte de masse des éprouvettes dans le temps font également l'objet de ce chapitre.

4.1. Etude générale du compactage

4.1.1. Essai de compactage du chanvre mouillé

Cet essai consiste simplement à remplir un moule cylindrique métallique par de la chènevotte mouillée et puis à la compacter. Au préalable, la chènevotte initialement sèche est mélangée avec de l'eau selon le rapport massique Granulat : Eau=1 :2 pendant 5 minutes. Ensuite, le mélange est versé dans un moule métallique de 16 cm de diamètre, 32 cm de hauteur et 5 mm d'épaisseur. Le compactage est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 500 kN. Le déplacement du piston et la force appliquée sont enregistrés. La courbe force – déplacement de compactage des deux types de granulats est présentée dans la Figure 4-1.

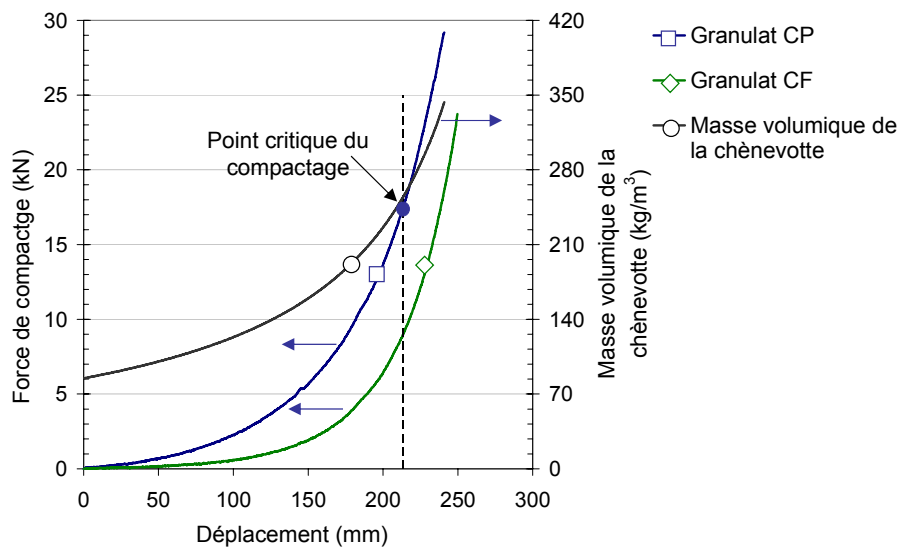


Figure 4-1 : Résultats des essais de compactage des chènevottes mouillées dans le moule métallique

Ces courbes montrent la forte déformabilité de la chènevotte en vrac, les échantillons perdent facilement un tiers de leur hauteur initiale, même sous une faible sollicitation. On note que le granulat CF subit un écrasement supérieur à celui du granulat CP à contrainte égale, et ce malgré une masse volumique apparente de particule à sec équivalente. Les raisons de cette différence peuvent être multiples, mais il faut en premier lieu prendre en considération la présence des fibres dans le granulat CF et aussi sa granulométrie.

Rappelons en effet que le granulat CF comporte davantage d'éléments fins que le granulat CP (cf. § 2.1.5) qui peuvent s'agencer plus facilement dans le cylindre de compactage

En outre, sur la courbe force – déplacement du granulat CP, on remarque que lorsque l'écrasement est d'approximativement 65 % de la hauteur initiale, la masse volumique de l'échantillon est égale à celle d'une particule de la chènevotte (256 kg/m^3).

Au-delà, le volume inter-granulaire devient très faible et le volume de pâte devient critique. En dessous de ce volume critique, la quantité de pâte ne permet pas de générer une meilleure

cohésion ou résistance mécanique globale. La hauteur du dispositif utilisé pour les essais détaillés dans le Chapitre 3 a été estimée à partir de cette observation.

Les coefficients d'absorption d'eau des chènevottes ont été calculés à partir de la teneur en eau du chanvre mouillé compacté à la contrainte la plus élevée (25 MPa) pour évacuer le maximum d'eau par ce procédé. Cette valeur, sert ensuite à calculer la quantité d'eau de " pré – mouillage " requise pour le malaxage (cf. § 3.2.1). Dans notre cas, le compactage s'est poursuivi jusqu'à atteindre une force de 480 kN. Ensuite, les échantillons essorés ont été sortis du moule métallique et passés à l'étuve à une température de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse afin de déterminer leur teneur en eau. Les résultats sont présentés dans Tableau 4-1. On observe que les coefficients d'absorption d'eau pour le malaxage du granulat CP (Abm_{CP}) et du granulat CF (Abm_{CF}) sont très proches. Notons aussi que la teneur en eau initiale des granulats stockés en condition ambiante a été prise en compte pour le calcul de ces coefficients.

Tableau 4-1 : Coefficients d'absorption d'eau pour le malaxage des granulats

Coefficient d'absorption d'eau pour le malaxage	
Granulat CP (Abm_{CP})	0,84
Granulat CF (Abm_{CF})	0,8

4.1.2. Analyse du compactage de béton à l'état frais

Dans cette étude, à l'exception de la composition CP26-EL035, la contrainte de compactage varie de 0,1 à 2 MPa en fonction du granulat utilisé, de la masse volumique initiale ciblée, de la composition et aussi de la taille du granulat.

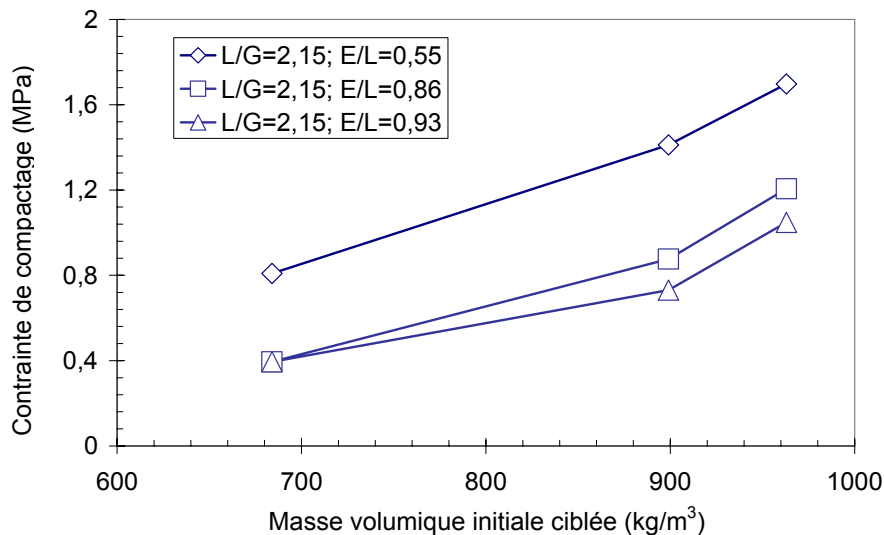
Le Tableau 4-2 donne les valeurs moyennes de la contrainte de compactage des compositions. On remarque que dans le cadre de ce travail, le niveau de compactage est nettement plus élevé que dans les autres études (Cérézo, 2005) (Collet, 2004) où l'éprouvette de béton de chanvre n'était que peu compactée (contrainte de compactage inférieure à 0,1 MPa) afin de ne pas modifier l'empilement ou voire d'écraser les particules de chènevotte. Selon ces auteurs, cela aurait un effet négatif sur les propriétés thermiques du béton de chanvre. Cette problématique fera l'objet du Chapitre 6.

On remarque tout d'abord qu'avec un mélange de chaux, les contraintes de compactage sur les cylindres fabriquées avec le granulat CP sont toujours supérieures à celles utilisées avec le granulat CF. En moyenne, pour une même configuration, le rapport entre la contrainte de compactage exercée sur le granulat CP et celle exercée sur le granulat CF est compris entre 1,2 et 2,5. Cette remarque concorde avec les résultats obtenus lors des essais de compactage de chanvres mouillés. Elle reflète une compressibilité plus importante du granulat CF par rapport au granulat CP.

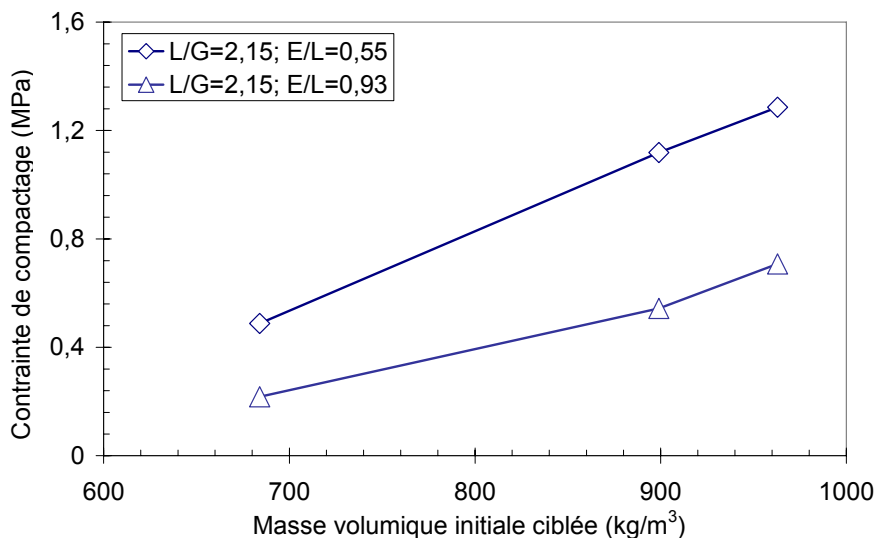
N°	Configuration	Liant	Contrainte de compactage (MPa)		Dosage en granulat sec (kg/m ³)
			CP	CF	
1	AAA	Tradical PF70	1,60	1,30	251
2	BBB	—	0,88	0,56	180
3	BBA	—	1,41	1,12	245
4	BBC	—	0,73	0,54	175
5	ABB	—	2,08	1,76	294
6	CBB	—	0,47	0,23	120
7	BAB	—	0,39		137
8	BCB	—	1,21		193
9	CCC	—	0,25	0,10	121
10	BAA	—	0,81	0,49	158
11	BAC	—	0,39	0,22	133
12	BCA (EL055)	—	1,70	1,29	222
13	BCC	—	1,05	0,71	187
14	AAC	—	1,32	0,71	218
15	CAB	—	0,31	0,21	92
16	CAA	—	0,30	0,17	107
17	CAC	—	0,09	0,07	89
18	CCA	—	1,01	0,77	151
19	BBB	Ciment CPA 52,5	0,69		180
20	BBB	NHL 2	0,89		180
21	BBB	NHL 3,5Z	0,85		180
22	BBB	Tradical PF70	0,86		180
23	BBB	—	0,97		180
24	BBB	—	0,98		180
25	BBB	—	1,00		180
26	EL035	—	2,89		222
27	EL045	—	2,06		222
28	EL070	—	1,55		222
29	EL085	—	1,27		222
30	EL1	—	1,24		222
31	EL125	—	1,14		222

Tableau 4-2 : Contraintes de compactage enregistrées durant le compactage des éprouvettes cylindriques

On établit ensuite le niveau de contrainte de compactage en fonction de la masse volumique initiale ciblée (Figure 4-2). On constate que quel que soit le granulat utilisé, pour un rapport L/G et E/L donné, la contrainte de compactage des éprouvettes tend naturellement à augmenter significativement lorsque la compacité finale visée augmente.



(a)



(b)

Figure 4-2 : Evolution de la contrainte de compactage en fonction de la masse volumique initiale ciblée. (a) Dans le cas du granulat CP. (b) Dans le cas du granulat CF

La contrainte de compactage dépend également des rapports L/G et E/L . Les Figure 4-4 et Figure 4-5 présentent l'influence du rapport L/G et E/L sur la contrainte de compactage pour quelques compositions, la tendance est la même pour les autres compositions :

La contrainte de compactage décroît avec le rapport L/G pour un rapport E/L donné. Parce que la masse volumique de la chaux est nettement supérieure à celle des autres constituants, la contrainte de compactage diminue lorsque le rapport L/G augmente. (Voir Figure 4-3).

La Figure 4-3 montre également que cette contrainte de compactage, pour un rapport L/G fixé et pour une masse volumique ρ_{initiale} donnée tend à diminuer lorsque le rapport E/L augmente.

Ce point vient du fait que lorsque le rapport E/L augmente, le volume de chanvre qui a la plus faible masse volumique diminue, entraînant un plus faible volume à compacter. Par ailleurs, l'eau doit aussi jouer un rôle lubrificateur lors du compactage.

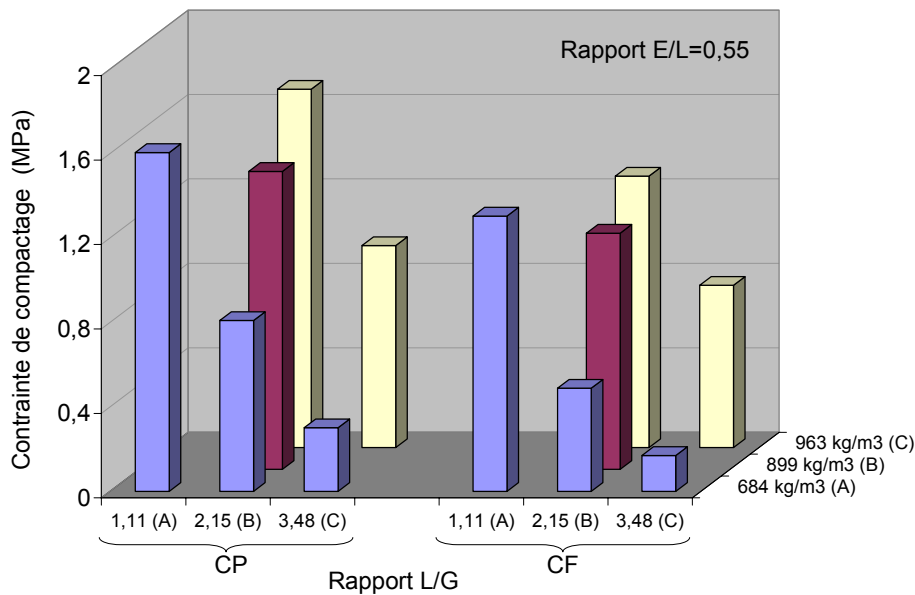


Figure 4-3 : Influence du rapport L/G sur la contrainte de compactage (cas ou E/L =0,55)

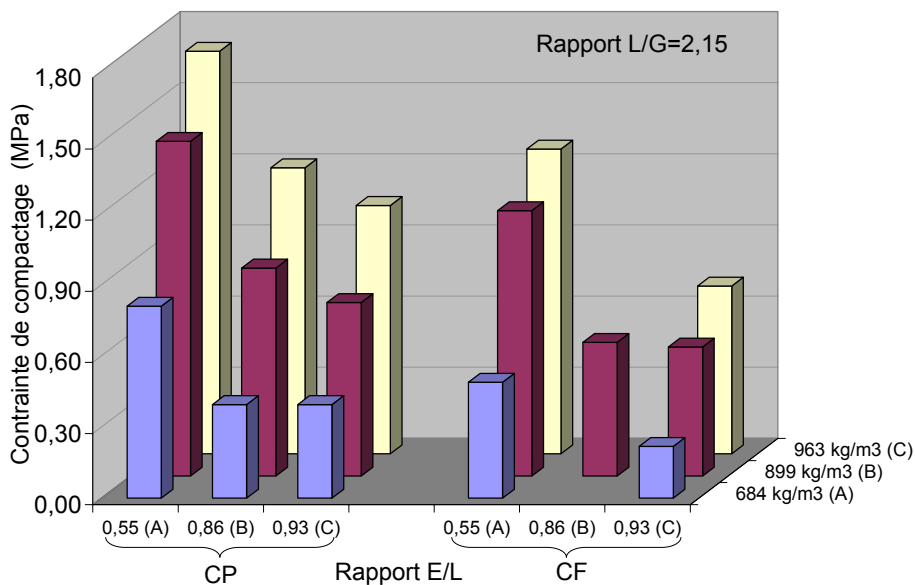


Figure 4-4 : Influence du rapport E/L sur la contrainte de compactage (cas ou L/G =2,15)

Globalement, l'explication à ces observations se trouve dans la conception de la formulation qui considère des rapports massiques : pour une masse volumique initiale ciblée, la

diminution des rapports L/G et/ou E/L nécessite une augmentation de la quantité de granulat pour pouvoir atteindre la même masse volumique initiale. Par conséquent, le compactage est généralement relatif à la quantité massique de granulats secs par volume unitaire de matériau produit (voir Figure 4-5).

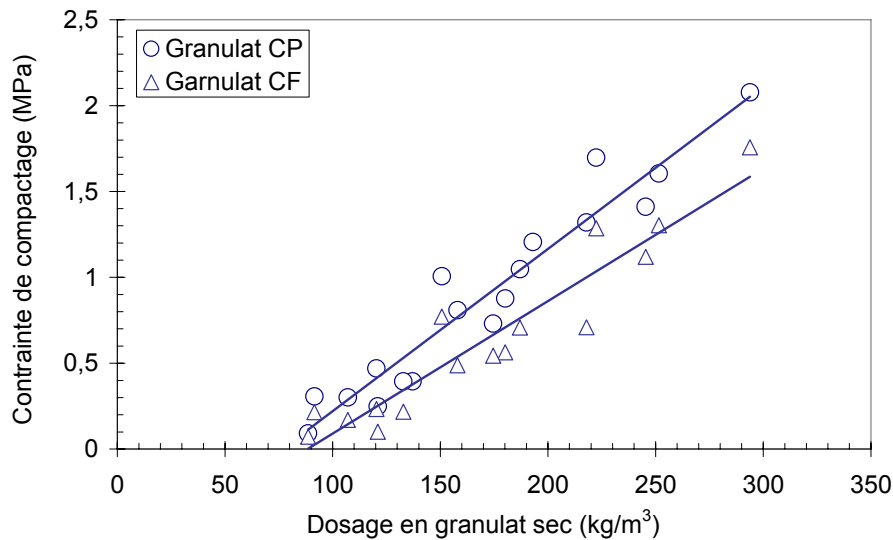


Figure 4-5 : Evolution de la contrainte de compactage en fonction du dosage en granulat sec

L'expérience a montré qu'à partir de 250 kg/m^3 de granulat, le compactage atteint les capacités du dispositif de compactage. Lorsqu'un cylindre en PVC est utilisé, une légère déformation du dispositif est observée. Ceci s'explique simplement par le fait que la masse volumique de l'éprouvette s'approche de celle d'une particule de chènevotte. Nous pouvons même confirmer qu'un dosage en granulat de 290 kg/m^3 (configuration ABB) s'avère être le dosage limite pour que le compactage soit réalisable avec le dispositif utilisé dans cette étude.

En outre, il apparaît que la relation entre la contrainte de compactage et le dosage d'un granulat donné est prédominante quel que soit le dosage des autres composants (voir Figure 4-5).

L'influence du rapport E/L a aussi été examinée plus en détail (Figure 4-6), à travers les 7 compositions complémentaires : CP26-EL035 ; CP27-EL045; CP12-EL055; CP28-EL070; CP29-EL085; CP30-EL1; CP31-EL125

A volume de granulat et de pâte constant, on note que la contrainte de compactage diminue lorsque le rapport E/L augmente.

Dans ce cas, l'eau paraît jouer le rôle de lubrificateur des particules de la chènevotte. Plus la quantité d'eau est importante, plus la composition est facile à compacter. Lorsque le rapport E/L est extrêmement faible le mélange frais paraît très sec.

Par ailleurs, le compactage conduit à un écoulement de la pâte entre les granulats. La pâte présente une viscosité et une contrainte seuil d'écoulement qui augmente lorsque le rapport

E/L diminue. Ce dernier point peut aussi expliquer que des contraintes supérieures soient requises pour effectuer le compactage.

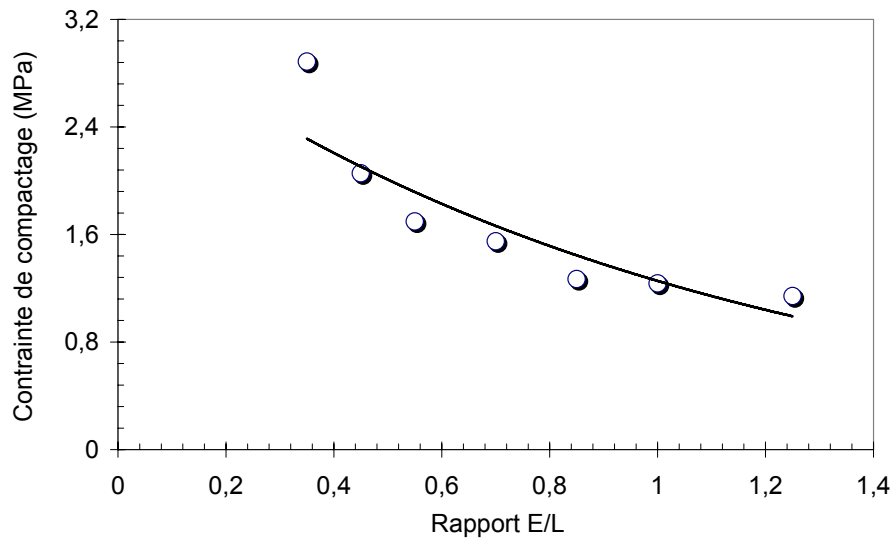


Figure 4-6 : Influence du rapport E/L quand les volumes du granulat et de la pâte sont constants

Il est aussi intéressant d'examiner l'influence de la taille du granulat sur la contrainte de compactage. Cette influence a été étudiée à travers quatre tailles de granulat : T1 (1,25 – 2,5 mm), T2 (2,5 – 3,15 mm), T3 (3,15 – 5 mm) et T4 (>5 mm). On constate que pour une même configuration et un même liant (le Tradical PF70), la contrainte de compactage augmente légèrement avec la taille du granulat. Apparemment, utiliser un calibre plus petit peut permettre au granulat de se réarranger plus facilement sous l'effet de la compaction et ainsi de diminuer la contrainte de compactage.

4.2. Vérification de la masse volumique initiale

Après démoulage, les éprouvettes cylindriques ont été pesées et leurs dimensions ont également été mesurées afin de calculer la masse volumique réelle de l'éprouvette ($\rho_{réelle}$). L'objectif est de comparer cette masse volumique avec la masse volumique initialement ciblée utilisée dans la formulation ($\rho_{initiale}$). La différence entre ces deux masses volumiques $\Delta\rho$ est calculée selon la formule [4-1] :

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{réelle} - \rho_{initiale}}{\rho_{initiale}} \quad [4-1]$$

Notons que pour une composition, la valeur $\rho_{réelle}$ obtenue est une moyenne des mesures réalisées sur quatre éprouvettes. Le Tableau 4-3 donne les valeurs moyennes de la différence

de la masse volumique, on constate que les valeurs sont un peu dispersées. En général, sur la plupart des compositions et pour les deux types de granulat, cette différence est négative. Cela signifie que la masse volumique réelle de l'éprouvette est inférieure à celle initialement ciblée. La raison principale peut être attribuée au gonflement de l'éprouvette après le démoulage. Malgré le confinement pendant 48 heures, nous avons encore observé un gonflement des éprouvettes après démoulage ; la hauteur des éprouvettes est finalement légèrement supérieure à 200 mm. Ensuite, une légère perte de matériau peut se produire que l'on démoule les éprouvettes ou lorsque l'on verse le mélange dans le tube en PVC (Figure 3-4)

N°	Configuration	Liant	Différence de la masse volumique $\Delta\rho$ (%)	
			CP	CF
1	AAA	Tradical PF70	-4,646	-0,797
2	BBB	—	-3,467	-2,757
3	BBA	—	-3,940	-3,410
4	BBC	—	-2,812	0,322
5	ABB	—	-3,947	-2,608
6	CBB	—	-2,197	2,507
7	BAB	—	-2,081	
8	BCB	—	-0,798	
9	CCC	—	-3,517	0,855
10	BAA	—	-3,307	-0,396
11	BAC	—	-3,167	1,474
12	BCA ou EL055	—	-4,390	-1,586
13	BCC	—	-1,946	0,169
14	AAC	—	-3,542	-0,372
15	CAB	—	-0,636	1,627
16	CAA	—	-1,701	0,229
17	CAC	—	0,892	2,188
18	CCA	—	-4,057	-0,501
19	BBB	Ciment CPA 52,5	-1,855	
20	BBB	NHL 2	-3,274	
21	BBB	NHL 3,5Z	-2,606	
22	BBB (T1)	Tradical PF70	-3,030	
23	BBB (T2)	—	-1,766	
24	BBB (T3)	—	-3,120	
25	BBB (T4)	—	-0,897	

Tableau 4-3 : Valeurs moyennes de la différence de la masse volumique $\Delta\rho$

Ces différences demeurent faibles compte tenu de l'imprécision sur la mesure ; la valeur absolue maximum est de 4,6 % dans le cas du granulat CP et 3,4 % dans le cas du granulat CF. Par ailleurs on constate qu'au niveau de valeur absolue, la différence de masse volumique $\Delta\rho$ est inférieure dans le cas du granulat CF que dans celui du granulat CP. Les fibres peuvent entraver le retour élastique ou gonflement dans le cas des granulats CF. Les essais de compactage de la chènevotte mouillée (cf. § 4.1.1) ont aussi montré une moindre résistance au compactage du granulat CF et par conséquent une contrainte de retour élastique probablement aussi plus faible.

4.3. Évolution de la masse des éprouvettes

La masse des éprouvettes d'un certain nombre de compositions a été régulièrement mesurée afin de suivre son évolution dans le temps. La perte de la masse est donnée par :

$$\Delta m = \frac{m(0) - m(t)}{m(0)} \quad [4]$$

D'où $m(0)$ – masse initiale de l'éprouvette

$m(t)$ – masse de l'éprouvette mesurée à l'instant t

Le Tableau 4-4 récapitule les pertes de masse mesurées sur les éprouvettes lorsqu'elles sont placées à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de température et $75 \pm 5\%$ HR pendant 90 jours. Notons que pour chaque composition, un couple d'éprouvettes a été mesuré et les valeurs répertoriées dans ce tableau sont la moyenne de ces deux mesures.

N°	Configuration	Liant	Granulat	Age			
				2 j	10 j	28 j	90 j
1	AAA	Tradical PF70	CP	0,742	7,171	9,644	10,831
			CF	0,692	7,369	9,594	10,781
2	BBB	—	CP	0,532	18,471	23,688	24,905
			CF	0,532	18,479	23,384	24,221
3	BBA	—	CP	0,190	9,943	13,397	14,943
			CF	0,304	9,677	13,523	14,943
4	BBC	—	CP	0,263	20,492	26,724	28,781
			CF	1,618	22,473	28,116	28,480
7	BAB	—	CP	0,198	22,305	25,420	25,025
			CF				
9	CCC	—	CP	0,710	19,787	29,607	31,583
			CF	0,319	20,731	30,317	33,002
10	BAA	—	CP	0,692	12,376	13,452	14,590
			CF	0,544	13,205	14,441	15,134
11	BAC	—	CP	0,593	22,908	26,459	26,162
			CF	0,544	24,293	27,300	26,706
12	BCA	—	CP	0,281	12,242	14,696	15,566
			CF	0,351	11,223	13,695	15,285
13	BCC	—	CP	0,668	18,271	23,261	26,142
			CF	0,703	16,572	23,616	26,388
15	CAB	—	CP	0,643	17,161	17,502	16,073
			CF	0,495	17,310	17,823	16,370
17	CAC	—	CP	1,039	28,239	29,753	28,239
			CF	0,593	29,278	31,024	30,415

Tableau 4-4 : Diminution de la masse des éprouvettes en pourcentage de la masse lors du stockage en atmosphère contrôlée $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $H=75 \pm 5\%$ après 2, 10, 28 et 90 jours.

Pour une même configuration les variations de la masse sont presque équivalentes entre les éprouvettes fabriquées avec le granulat CP et celles avec le granulat CF (Tableau 4-4). La

différence mesurée est souvent inférieure à 2 %. La nature du granulat n'a donc pas d'influence importante sur la variation de la masse.

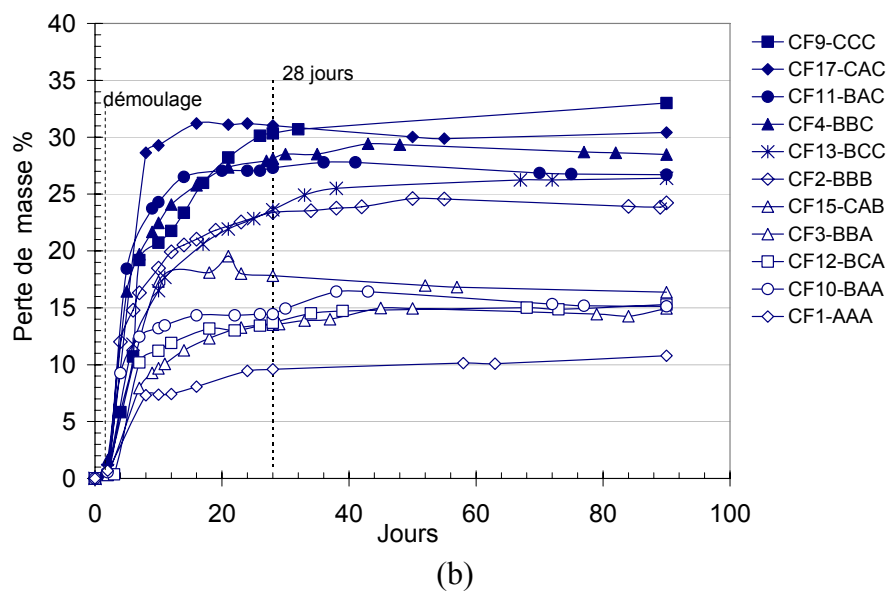
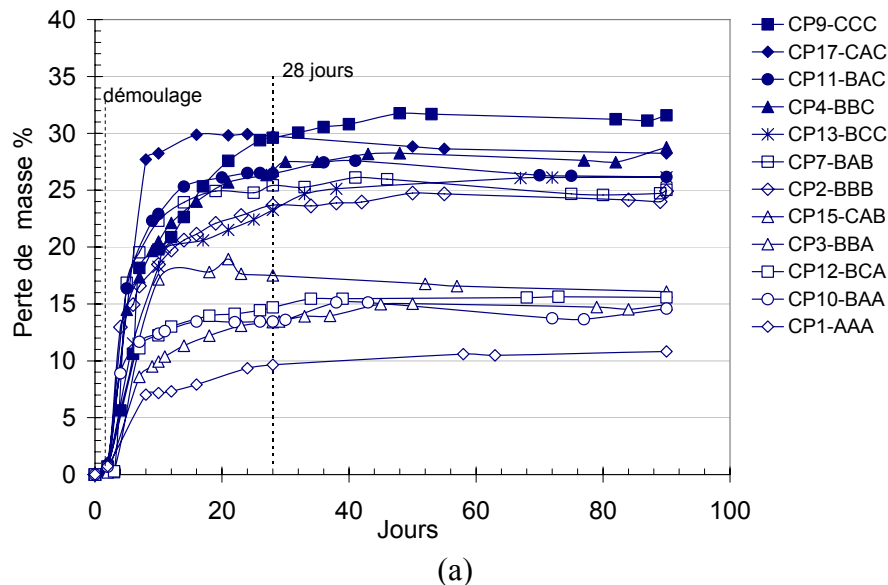


Figure 4-7 : Cinétique de perte de masse des éprouvettes confectionnées avec les granulats CP (a) et CF (b)

Globalement, les variations de masse constatées évoluent entre 10 et 33 % de la masse initiale des éprouvettes. Elles sont présentées dans les Figure 4-7a et b. Un léger gain de masse peut être éventuellement observé après 40 jours. Ce dernier peut être induit par la fin de l'évaporation de l'eau en excès couplée au processus de carbonatation de la fraction de chaux aérienne employée dans le liant. On remarque que les variations de la masse sont très intenses lors de la première semaine après le démoulage et qu'il n'est plus observé de perte de masse notable au-delà de 28 jours.

Bien entendu, les variations de masse augmentent avec le rapport E/L, car un rapport E/L élevé conduit à un excès en eau important. Cet excès d'eau est stocké dans les granulats lors de la confection. La plus grande porosité de la pâte de liant facilite aussi une évaporation de cette eau au cours du temps. Dans une atmosphère de conservation stabilisée, ce rapport a une influence capitale sur la variation de la masse des éprouvettes.

De plus, pour un rapport Eau/Liant élevé, l'effet du troisième paramètre, Liant/Granulat, est amplifié : La Figure 4-8 montre parallèlement que la perte de masse augmente lorsque le rapport L/G augmente, c'est-à-dire lorsque le granulat est moins compacté. Cela confirme le fait que plus le granulat est compacté, moins le stockage d'eau non liée est important, et moins la perte de masse finale est importante.

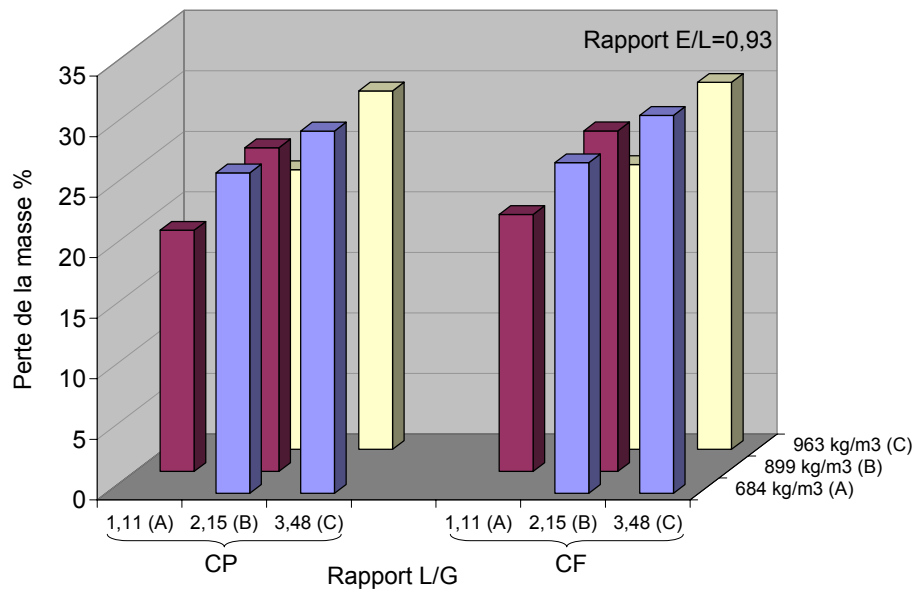
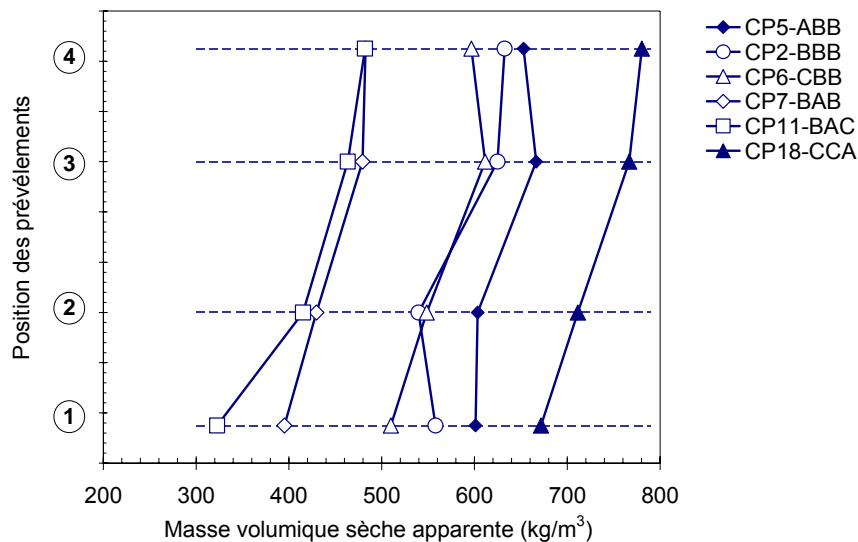


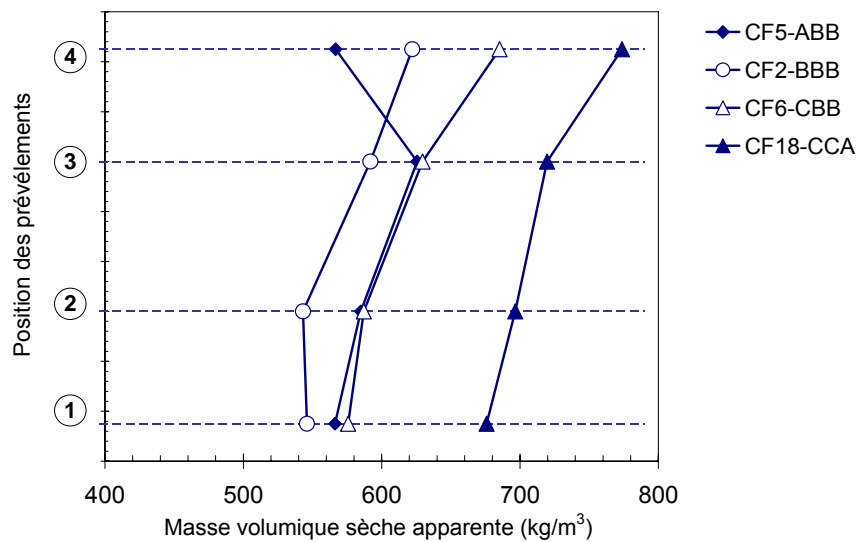
Figure 4-8 : Perte relative de masse des éprouvettes à 28 jours pour un rapport Eau/Liant fixé au niveau intermédiaire

Enfin, on trouve que les variations de la masse du béton de chanvre ne dépendent pas vraiment de la masse volumique initialement ciblée. En théorie, on peut penser que plus cette masse volumique est faible, plus le matériau devrait être poreux et l'évaporation d'eau favorable. Mais pour des rapports L/G et E/L constants, les résultats expérimentaux montrent qu'il n'y a qu'une très faible variation de la masse des éprouvettes quel que soit leur masse volumique initiale.

4.4. Variation du poids volumique au sein d'une éprouvette compactée



(a)



(b)

Figure 4-9 : Répartition de la densité apparente selon la hauteur de prélèvement de l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique. (a) Cas du granulat CP. (b) Cas du granulat CF

Les mesures de la densité sèche apparente des échantillons prélevés dans les éprouvettes cylindriques selon le schéma présenté en Figure 3-9 sont montrées sur la Figure 4-9a et b. Un gradient de densité est bien identifié. Ce gradient est très faible, moins de 2%, sur la demie hauteur supérieure du cylindre (Figure 4-9a et b). Il est cependant non négligeable sur la demie hauteur inférieure puisque compris entre de 8 et 22 %. Dans la plupart des compositions mesurées, la densité du prélèvement n°4 est de 10 à 30 % plus grande que celle du prélèvement n°1. Ces résultats sont tout à fait conformes aux observations de la variation de la déformation longitudinale au cours de l'essai de compression (voir cf. § 5.2). Il est donc

vrai qu'une meilleure répartition de la matière pourrait améliorer considérablement la résistance mécanique des éléments préfabriqués de béton de chanvre.

Cette hétérogénéité est probablement due au frottement entre les particules de la chènevotte et la surface intérieure du moule malgré l'application d'huile avant le compactage. On rappelle que lors du compactage, le mélange à l'état frais est mis en place dans un tube de 600 mm de hauteur. La hauteur initiale du mélange non compacté varie alors de 400 à 600 mm, soit deux à trois fois la hauteur finale (200 mm). Au moment du compactage, les frottements sur la paroi sont plus intenses dans la partie supérieure du dispositif que dans le fond du moule. Le transfert de l'effort de compactage n'est donc pas homogène sur toute la hauteur. La matière plus proche du piston est dès lors plus compactée, la partie inférieure (fond de moule) demeurant elle plus poreuse.

Il semblerait par ailleurs que l'homogénéité relative des éprouvettes soit plus importante lorsque la masse volumique initiale de l'éprouvette augmente. A titre d'exemple, la Figure 4-10 montre que dans le cas de rapports L/G et E/L intermédiaires, la différence de densité diminue alors que la masse volumique initiale augmente.

Contrairement à ce qui pouvait être supposé, une plus faible hauteur de compactage diminuant le trajet d'application du frottement entre les particules de la chènevotte et la surface intérieure du moule, ne conduit pas systématiquement à des éprouvettes plus homogènes (voir Figure 4-10). Encore une fois, le compactage s'avère être une clé importante pour améliorer la performance des éléments préfabriqués de béton de chanvre par une meilleure répartition de la matière.

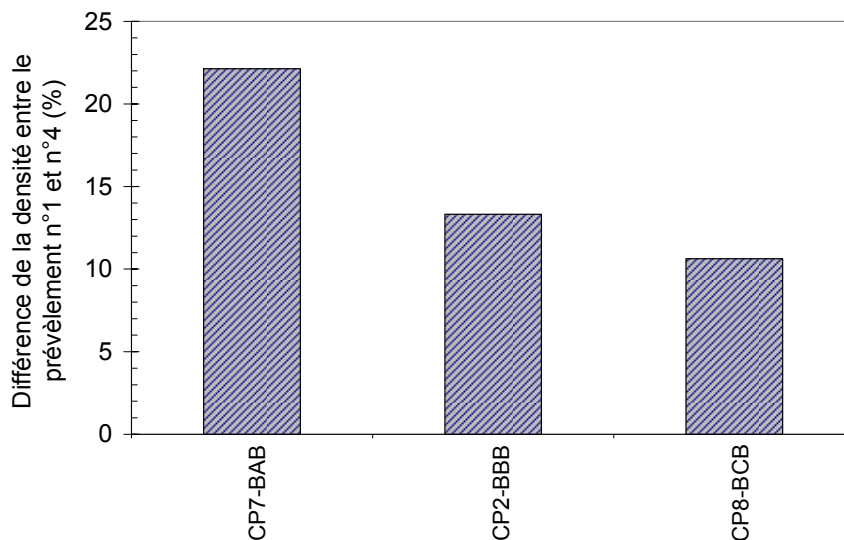


Figure 4-10 : Différence de densité entre les prélèvements n°1 et n°4 de trois configurations de béton de chanvre à différente masse volumique initiale

4.5. Orientation des particules dans l'éprouvette

Le mélange à l'état frais ne présente d'orientation particulière lorsqu'il est versé dans le cylindre. Lors du compactage, sa hauteur est réduite de façon homogène (et unidirectionnelle) d'environ 60%. Ce compactage engendre inévitablement une orientation préférentielles des particules (de formes allongées (cf. § 2.1.5) dans le plan perpendiculaire à la direction de compactage. Pour mettre ce phénomène, nous avons étudié des coupes axiales. Les échantillons prismatique n°2 et n°3 (prélevé dans les sens de la hauteur de l'éprouvette cylindrique) destinés à mesurer la conductivité thermique transversale ont été observés. Pour la configuration intermédiaire (voir. Figure 4-11a), il apparaît effectivement une orientation préférentielles, qui est encore plus marquée lorsque le dosage en granulat augmente (L/G diminue) (voir. Figure 4-11b). En conséquence, cette orientation induit inévitablement une anisotropie du matériau.

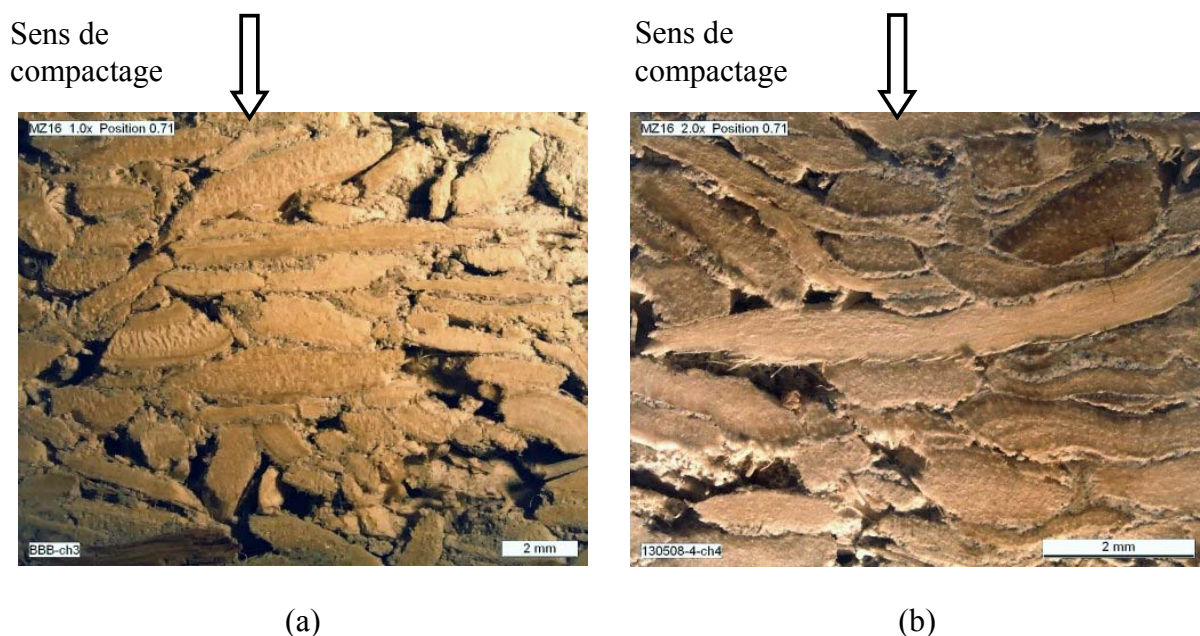


Figure 4-11 : Observation des coupes verticales du béton de chanvre : (a) Composition CP2-BBB, (b) Composition CP5-ABB

4.6. Conclusion

Les essais de compactage de la chènevotte mouillée ont montré que ces granulats manifestent une grande déformabilité, même sous de faibles sollicitations. Cependant, il faudrait mener des études plus poussées sur cette question afin de mieux connaître le comportement de la chènevotte, notamment sa réorganisation structurale, si on souhaite réellement optimiser le compactage des éléments préfabriqués de béton de chanvre.

Pour le compactage de béton de chanvre à l'état frais, la contrainte de compactage augmente significativement avec la masse volumique initiale ciblée, mais le paramètre le plus important

est le dosage en granulat par volume unitaire. Il apparaît que le dosage en granulat de 250 kg/m^3 est la limite pour le compactage avec le dispositif en PVC dans notre étude.

La contrainte de compactage dans notre configuration peut varier de 0,1 à 2,9 MPa en fonction de composition et aussi de la nature du granulat. En générale, la contrainte de compactage appliqué est nettement plus faible pour les éprouvettes fabriquées avec le granulat CF que celle fabriquées avec le granulat CP.

Le rapport L/G et E/L ont aussi une conséquence sur la contrainte de compactage : plus ces rapports diminuent, plus la contrainte de compactage augmente. En effet, la diminution de ces rapports entraîne à une augmentation du dosage en granulat pour atteindre une masse volumique initiale donnée.

La différence entre la masse volumique réelle des éprouvettes est celles initiales ciblées ont été vérifiées. On constate que cette différence est très faible (maximum 4,5% dans le cas du granulat CP et 3,6% dans le cas du granulat CF).

Le procédé de compactage induit des frottements du matériau à la paroi du cylindre, Le transfert de l'effort de compactage n'est pas homogène sur toute la hauteur. Le volume le plus proche du piston est dès lors plus compacté que celui proche du fond de moule immobile. Ceci conduit à un gradient de la masse volumique le long de l'axe de l'éprouvette. Ce gradient est faible sur la demie hauteur supérieure de l'éprouvette (moins de 8%) et il est plus significatif sur la demie hauteur inférieure (jusqu'à 20%). Les différences relatives de masses volumiques après séchage entre les deux extrémités de l'éprouvette sont comprises entre 10 et 30 %.

Enfin, le compactage n'as pas d'incidence sur l'évolution de la perte de masse des éprouvette stockées à 20°C et 75% HR. C'est le rapport E/L qui influe principalement sur l'amplitude de la perte de masse. Plus le dosage en eau initial est élevé, plus la perte de masse (séchage par évaporation) est importante.

Chapitre 5. Caractérisation mécanique

La porosité très importante des granulats (supérieur à 90% à l'état en vrac) confère au béton de chanvre une moins bonne résistance mécanique en comparaison des autres bétons légers. De plus, la structure très poreuse du granulat conduit aussi à un comportement mécanique atypique de ce matériau de construction.

Pour pouvoir mieux connaître le comportement mécanique du béton de chanvre, une campagne d'essai a été effectuée. Deux types de comportement mécanique ont été étudiés : compression et flexion.

Pour le comportement en compression, des essais uniaxiaux ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques $\text{Ø}100 \times 200$ mm. Nous verrons dans un premier temps le protocole utilisé pour ces essais et examinerons le comportement du béton de chanvre, qui est différent des bétons hydrauliques usuels. L'analyse paramétrique décrite dans le chapitre 3 sur les propriétés mécaniques en compression sera développée par la suite.

Le comportement en flexion est étudié sur des plaques de dimensions 300×400 mm. Pour ce type d'essai, nous allons nous intéresser principalement à l'influence du compactage et des fibres végétales.

5.1. Essais de compression uniaxial

5.1.1. Mode opératoire

Pour l'essai de compression, le béton de chanvre pose quelques difficultés que l'on doit prendre en compte :

- Premièrement, ce matériau présente souvent des hétérogénéités de surface qui seront d'autant plus importantes que la déformation longitudinale augmente. Ceci ne nous permet pas d'utiliser les dispositifs classiques de mesure comme les jauges de déformation.
- Deuxièmement, l'importante déformation avant rupture dans la plupart des cas n'est pas favorable aux configurations offertes par les dispositifs et appareils d'essai.

Dans cette étude, les essais de compression sont menés à l'aide d'une presse hydraulique à commande numérique de type Zwick HB 250 dont la capacité maximale est de 250 kN (Figure 5-1a). La charge est appliquée sur des plateaux qui ne sont pas rotulés. La force et le déplacement de la traverse sont enregistrés.

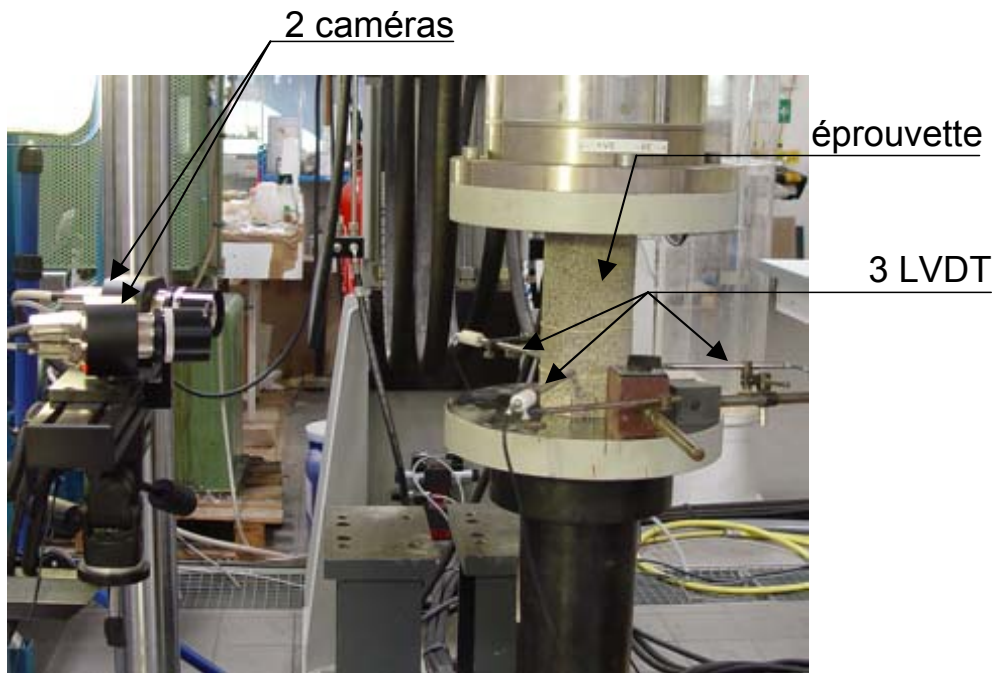
Afin d'évaluer les contraintes axiales appliquées aux éprouvettes, la déformation radiale de l'éprouvette a été mesurée par des capteurs de déplacement latéraux (LVDT) (voir Figure 5-1b). Le signal de ces capteurs est récupéré à l'aide d'un dispositif d'acquisition (utilisant le logiciel CATMAN).

Un autre système de mesure de déformation peut être utilisé, c'est le système de mesure optique ARAMIS utilisant un traitement d'images. Pendant l'essai, les images de l'éprouvette sous charge sont enregistrées par deux caméras à haute résolution. L'intervalle entre deux enregistrements consécutifs est de 5 secondes. Le rôle de ces caméras est de mesurer les déformations, mais sans contact. Grâce à des algorithmes de calcul mathématiques, un modèle précis de la surface de l'éprouvette est créé par ajustement des faisceaux, de la position des caméras et de la distorsion optique des objectifs. Les coordonnées mesurées sont ensuite organisées en un maillage rectangulaire reflétant la topologie de l'éprouvette.

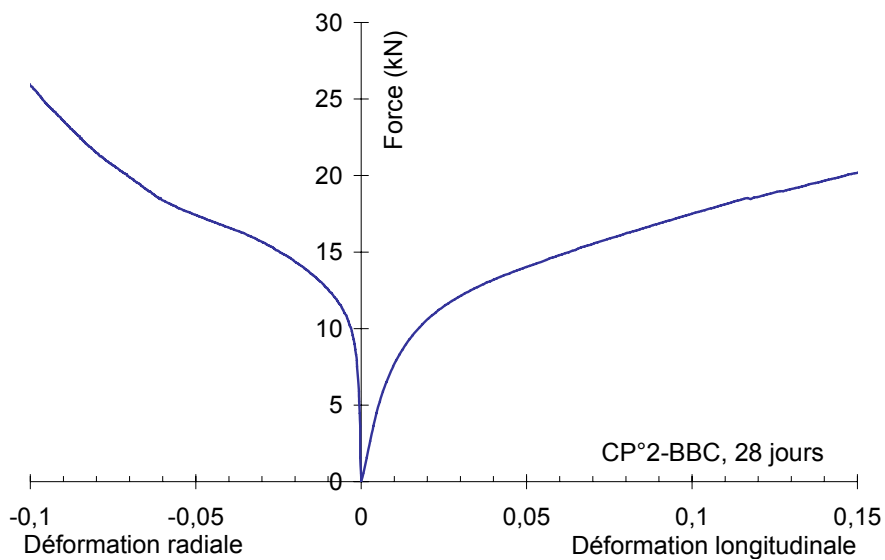
Une projection des déplacements sur la surface de l'objet permet de calculer les déformations subies par l'éprouvette au cours de l'essai. Les déplacements et les déformations sont alors visualisés à l'aide d'une cartographie en couleur et en 3D.

Malheureusement, les modifications de la surface des éprouvettes au cours du chargement défavorisent un fonctionnement correct du système ARAMIS. En fait, les caméras peuvent juste suivre la déformation de l'éprouvette lorsqu'elle est petite et que la surface de l'éprouvette reste encore relativement homogène.

L'emploi du système ARAMIS lors de un essai de compression est donc limité à la visualisation de la déformation du béton de chanvre dans les premières phases de la compression. Ensuite, lorsque la déformation longitudinale est supérieure à 7 %, des granulats se détachent, et la cartographie des déformations ne peut plus être établie.



(a)



(b)

Figure 5-1 : Montage des dispositifs de l'essai de compression (a). Evolution de la déformation radiale et longitudinale (b)

Les essais sont pilotés en déplacement dans le cas du chargement monotone, la vitesse de chargement étant de 0,1 mm /seconde. Le chargement cyclique est piloté en déplacement pour le chargement, à différentes vitesses, mais est piloté en force pour le déchargement à 0,2 kN /s (voir l'illustration dans la Figure 5-2).

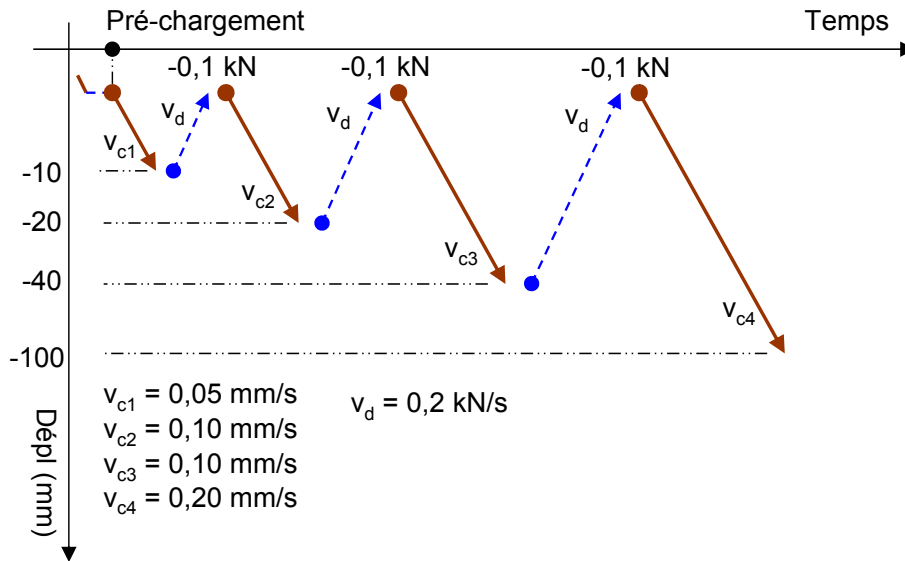


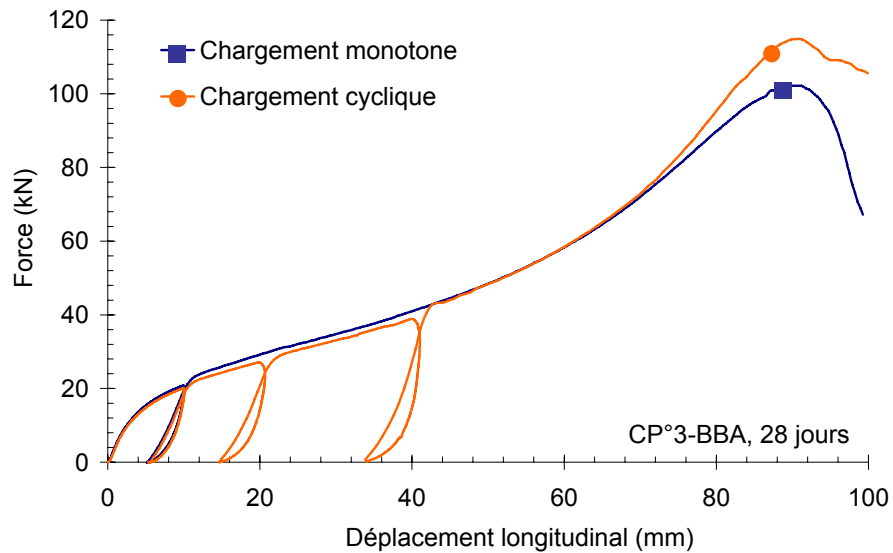
Figure 5-2 : Essai de chargement cyclique : Cycles de chargement - déchargement

5.1.2. Reproductibilité des essais de compression.

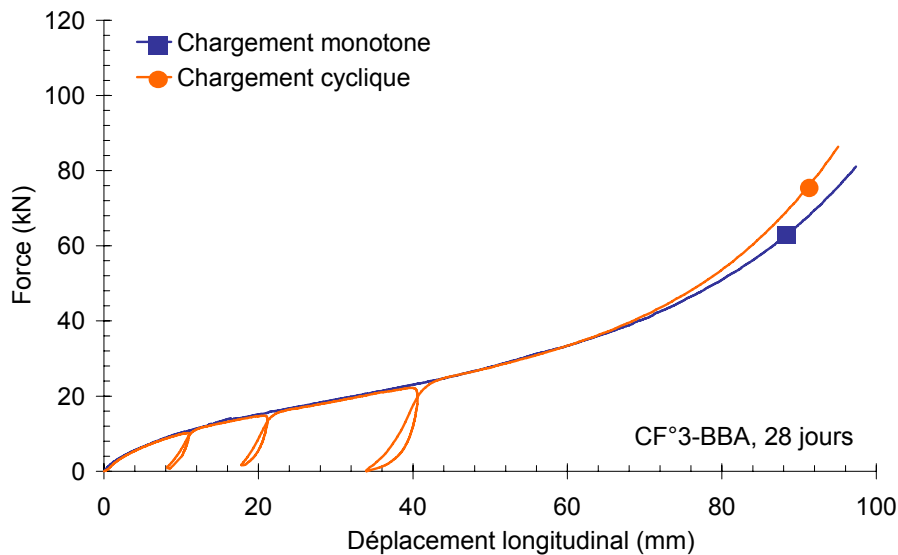
Au minimum, deux éprouvettes identiques sont systématiquement testées en compression pour chaque composition à une échéance donnée (à 28 jours ou à 90 jours). L'une est testée en chargement monotone et l'autre avec des cycles de chargement – déchargement afin d'évaluer l'endommagement du matériau.

Les deux courbes force – déplacements obtenues sont superposées pour vérifier la reproductibilité, autrement dit la validité des caractéristiques mécaniques mesurées (Figure 5-3a et b). On constate globalement une bonne reproductibilité des essais de compression. Pour presque toutes les compositions, les deux courbes (monotone et cyclique) sont très proches, voire superposées. Une dispersion juste avant la rupture est cependant observée, ce qui souligne l'influence des conditions aux limites de l'éprouvette qui peut être légèrement variable.

Cependant, une dispersion plus importante apparaît pour quelques configurations telles que CAC ou CCC dont le compactage est faible. Cet écart peut aussi provenir de la différence de réarrangement des particules végétales dans le volume de l'éprouvette au cours des cycles de chargement.



(a)



(b)

Figure 5-3 : Courbes force–déplacement obtenues lors de l’écrasement des éprouvettes 100×200 mm de béton de chanvre pure, CP (a) et fibré CF (b)

5.2. Comportement en compression

Dans le cas d’un béton hydraulique usuel, quel que soit la composition, le comportement mécanique en compression sera fragile. Dans le cas du béton de chanvre, ce comportement est plus complexe. Ce matériau présente globalement un comportement très ductile et il n’apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte – déformation (Figure 5-4). On note que la ductilité devrait être liée au dosage en liant. Plus ce dosage est important, plus le matériau est fragile. Les courbes contrainte– déformation présentent le profil décrit dans la Figure 5-4.

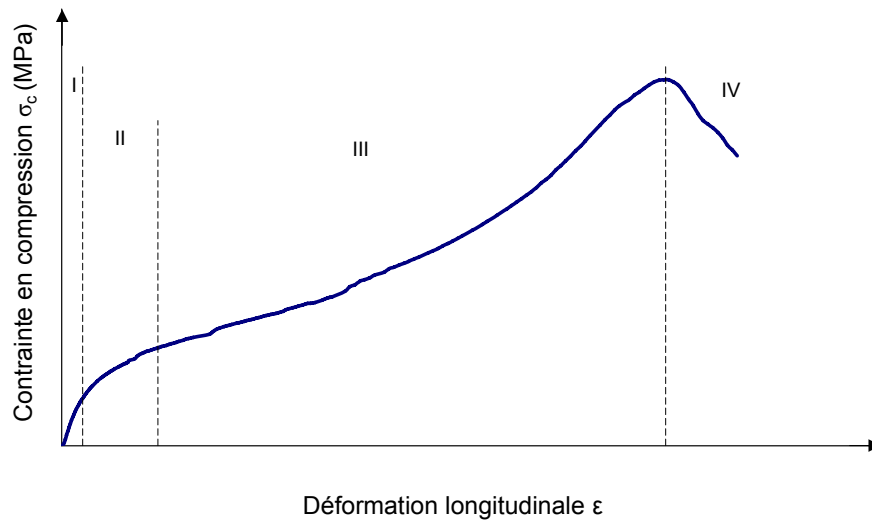
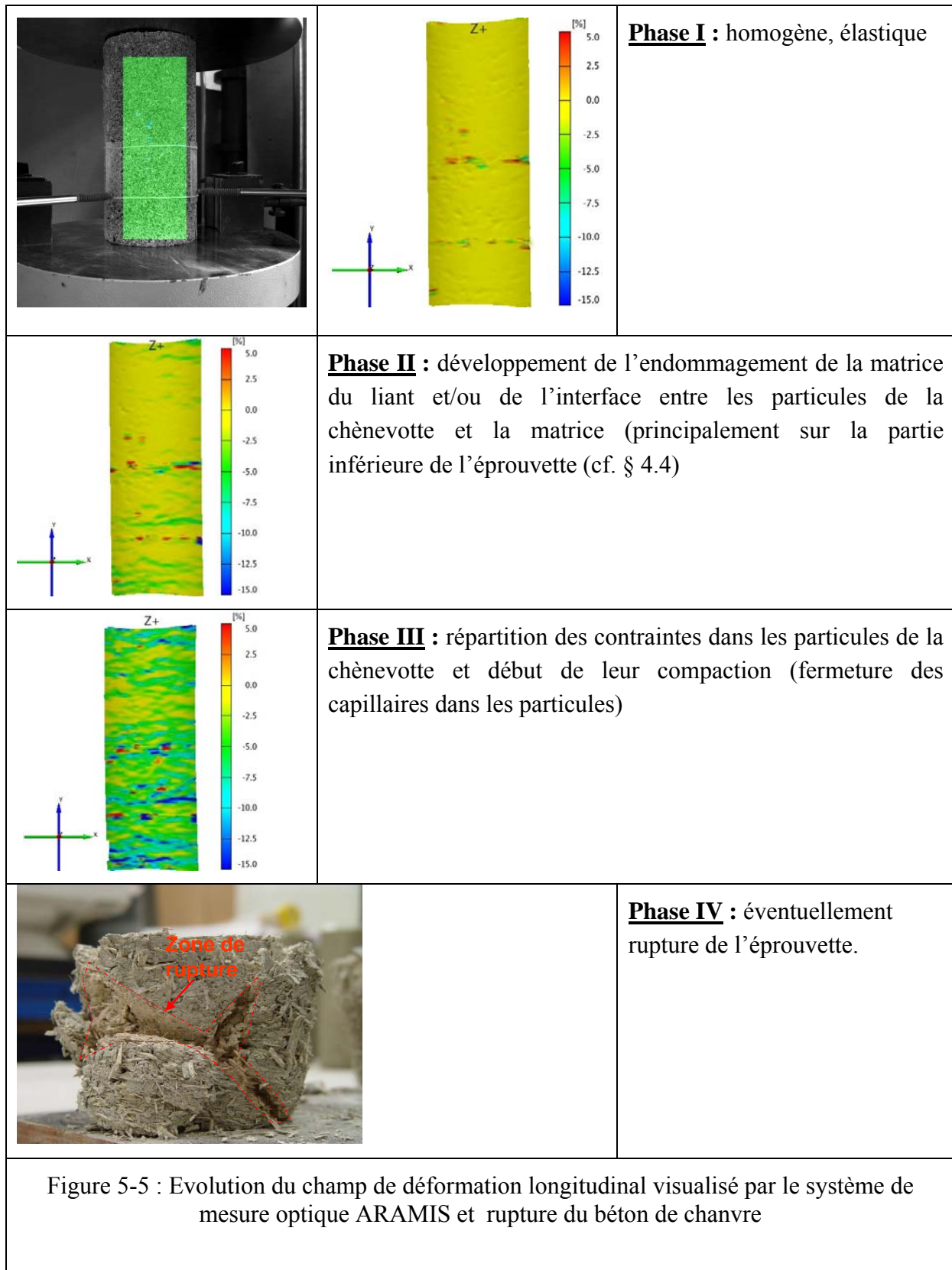


Figure 5-4 : Schéma de la courbe contrainte – déformation du béton de chanvre

Pour mieux comprendre son comportement on utilise la corrélation entre les courbes de compression et la visualisation du champ de déformations par le système de mesure optique ARAMIS (voir Figure 5-5).

Une zone de mesure est déterminée sur la surface de l'éprouvette, la variation du champ de déformation étant suivie par les deux caméras à haute définition du système ARAMIS. Les résultats sont illustrés dans la Figure 5-5.



On peut distinguer les quatre phases suivantes :

- **La Phase I** se caractérise par une relation assez linéaire entre la contrainte et la déformation, elle correspond au domaine élastique du comportement du matériau. Le champ des déformations longitudinales observées par le système de mesure optique

ARAMIS est très homogène (Figure 5-5). En fait, lors de cette phase, c'est la matrice du liant qui reprend la plus grande partie de la sollicitation. Elle est d'autant plus restreinte que le dosage en liant diminue.

- **La Phase II**, dites phase élasto-plastique, correspond à l'endommagement de la matrice du liant mais aussi des interfaces entre le liant et les particules. A la fin de cette phase, la matrice du liant ne joue plus le rôle de porteur des sollicitations. Les visualisations de la déformation longitudinale par ARAMIS montrent que l'endommagement se produit à priori dans la zone située à la base de l'éprouvette. Ce phénomène est lié au compactage du béton de chanvre, (cf. § 4.4).
- **La Phase III** se distingue par une augmentation de la contrainte et de la déformation de façon quasi linéaire. Dans cette phase, les particules de la chènevotte reprennent la plus grande partie des contraintes. Le développement des déformations plastiques se produit au sein des granulats. Pourtant l'augmentation de la contrainte n'entraîne pas la rupture totale du matériau, mais bien la compaction de ces particules, du fait de leur grande déformabilité, et la densification de l'éprouvette. C'est pourquoi, cette phase est nettement plus étendue que les autres. Globalement, elle se termine lorsque la déformation atteint au moins 40 % et que la courbe contrainte – déformation atteint son pic. Cependant, on remarque que ce pic n'est pas toujours observable malgré une déformation supérieure à 50 %, notamment pour les compositions à fort dosage en granulat ou de jeune âge.
- **La Phase IV** est la phase de rupture du matériau et correspond au maximum de contrainte et à la partie descendante de la courbe contrainte – déformation. Mais cette phase n'a pas été observée pour toutes les compositions testées.

Pour pouvoir comparer les matériaux élaborés, deux déformations axiale ou longitudinales (réduction relative de hauteur) de référence sont considérées : 1,5 % et 7,5 % (Figure 5-6). Conventionnellement la première caractérise le début de la phase II et la deuxième caractérise le début de la phase III à partir de laquelle la contrainte augmente quasi linéairement avec la déformation. Les contraintes mesurées pour ces déformations sont alors notées respectivement $f_{c,0,015}$ et $f_{c,0,075}$. Lorsqu'un maximum de contrainte est observé avant l'une de ces deux déformations de référence, c'est cette valeur maximale qui est considérée. Cela a parfois été le cas pour $f_{c,0,075}$.

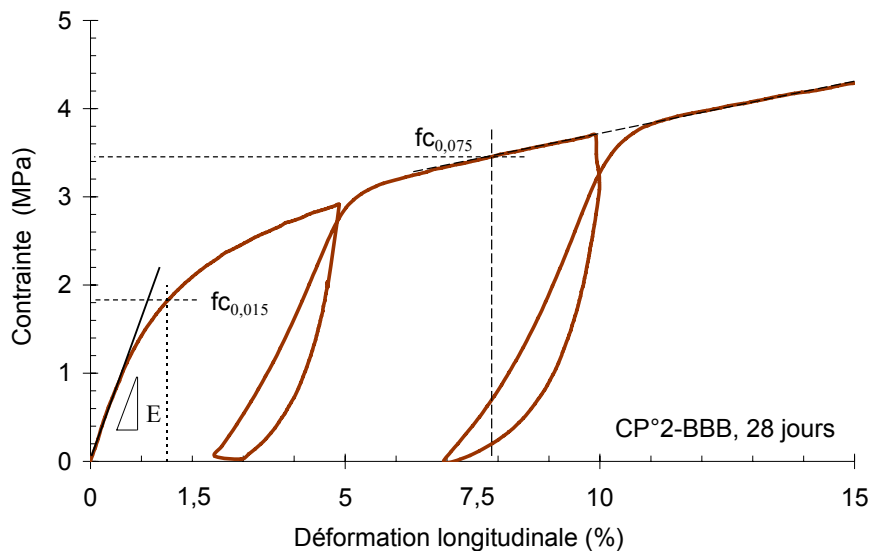


Figure 5-6 : Caractéristiques mécaniques extraites à partir de la courbe contrainte – déformation du béton de chanvre

Ces déformations de référence permettent de caractériser de manière satisfaisante le comportement mécanique des matériaux sur une plage de déformation limitée (0 – 15%). Elles sont relativement importantes en comparaison des matériaux de construction usuels, notamment ceux de structure, mais peuvent être envisageables dans le cadre d'un mode constructif adapté.

Le module d'Young, E , des éprouvettes est calculé en fonction du plus fort accroissement du rapport contrainte/déformation enregistré au début des sollicitations (voir Figure 5-6). Bien que les éprouvettes soient rectifiées avant l'essai, une brève phase de mise en contact est parfois observée et doit être corrigée.

5.3. Influence des paramètres sur les caractéristiques mécaniques de compression

5.3.1. Influence de la nature du liant

Dans le cas du béton de chanvre, la chènevotte ne joue pas le rôle de squelette solide comme dans le cas des granulats minéraux du béton hydraulique. De ce fait, c'est le liant qui produit le squelette rigide et la cohésion entre granulats déformables. L'emploi d'un liant de résistance importante peut donc augmenter la résistance mécanique, à condition que sa prise ne soit pas compromise par l'absorption d'eau par la chènevotte.

Pour la configuration intermédiaire (compactage et rapports L/G et E/L intermédiaires, niveau B), différents liants ont été utilisés. Les résultats sont présentés dans la Figure 5-7. Globalement, pour un taux de compactage relativement élevé qui a été appliqué pour produire des éprouvettes de 900 kg/m^3 au démoulage, le comportement mécanique global du matériau produit à 28 jours est peu modifié (Figure 5-7).

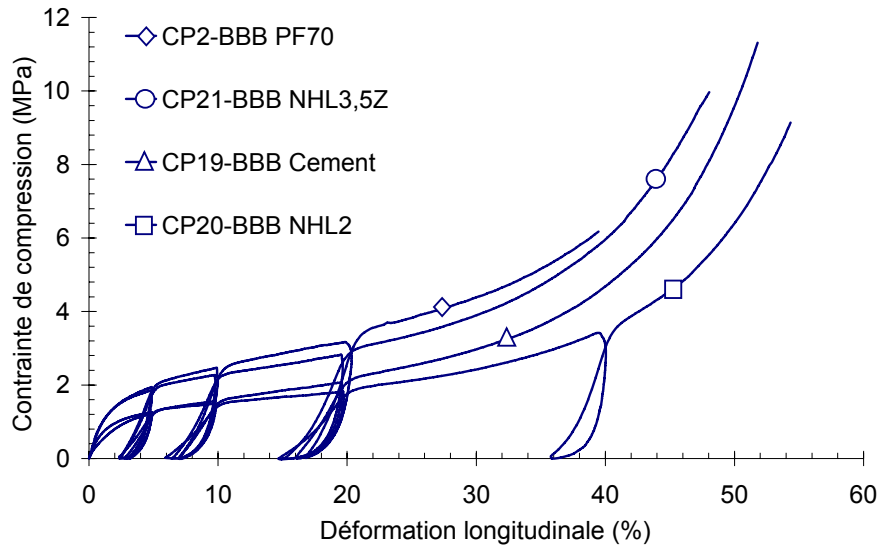
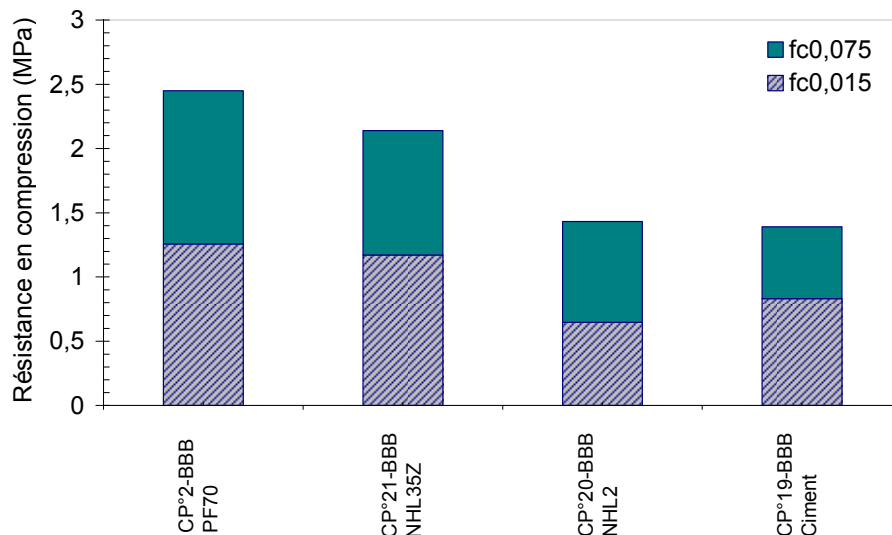


Figure 5-7 : Comportement mécanique en compression à 28 jours d'éprouvettes de même composition et masse volumique initiale, confectionnées avec différents liants

A 28 jours, on constate que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues avec des chaux hydrauliques ou des mélanges contenant en plus des pouzzolanes : Tradical PF70 et NHL 3,5Z (Figure 5-8). Les éprouvettes contenant du ciment présentent une faible résistance en compression et un faible module d'Young. Ce résultat peut s'expliquer par une mauvaise hydratation, perturbée par l'absorption d'eau par le granulat. Le comportement plus fragile de la pâte de ciment peut conduire aussi à de plus faible résistance pour des déformations importantes, et une plus faible accroche sur des granulats déformables.



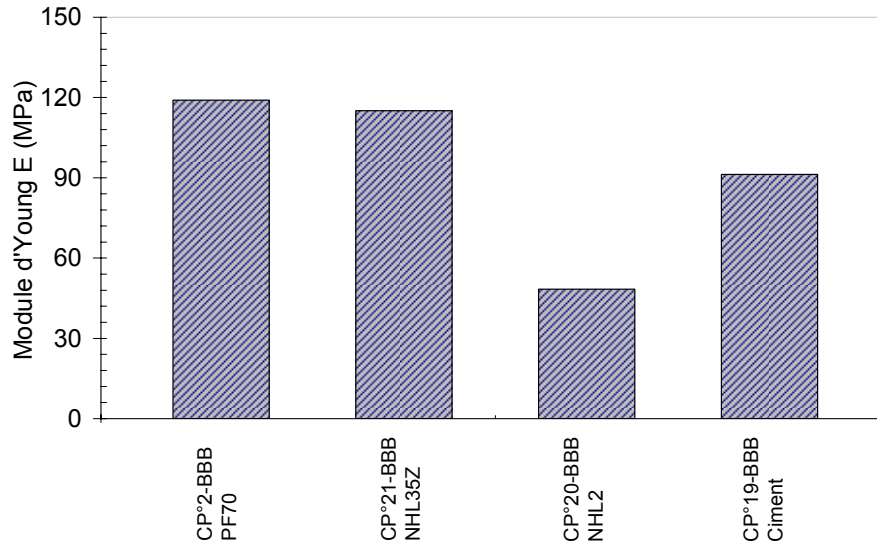


Figure 5-8 : Résistance en compression et module d'Young à 28 jours des éprouvettes fabriquées avec différents liants

A 90 jours, il nous paraît intéressant de noter que les valeurs de résistance en compression des éprouvettes fabriquées avec les trois chaux sont proches (Figure 5-9). L'écart de résistance entre elles n'est plus aussi sensible que celui observée après 28 jours. Une augmentation considérable des résistances en compression des éprouvettes fabriquées avec la chaux NHL 2 et NHL 3,5Z a été observée. Apparemment, le durcissement entre le 28^{ème} et le 90^{ème} jour de séchage de ces deux chaux est plus significatif que celui du liant Tradical PF70. Pourtant, leur module d'Young reste encore faible par rapport à celui des éprouvettes fabriquées avec le Tradical PF70 (Figure 5-9). Dans le programme expérimental, ce liant avait été choisi comme liant principal pour la fabrication des éprouvettes. Les résultats qui seront présentés dans les paragraphes suivants seront ceux obtenus avec les éprouvettes fabriquées avec ce liant. Dans le futur, il faudrait réaliser des analyses plus détaillées sur la question d'un " liant spécifique au béton de chanvre ", notamment sur les interactions chimiques et physiques entre le liant et la chènevotte.

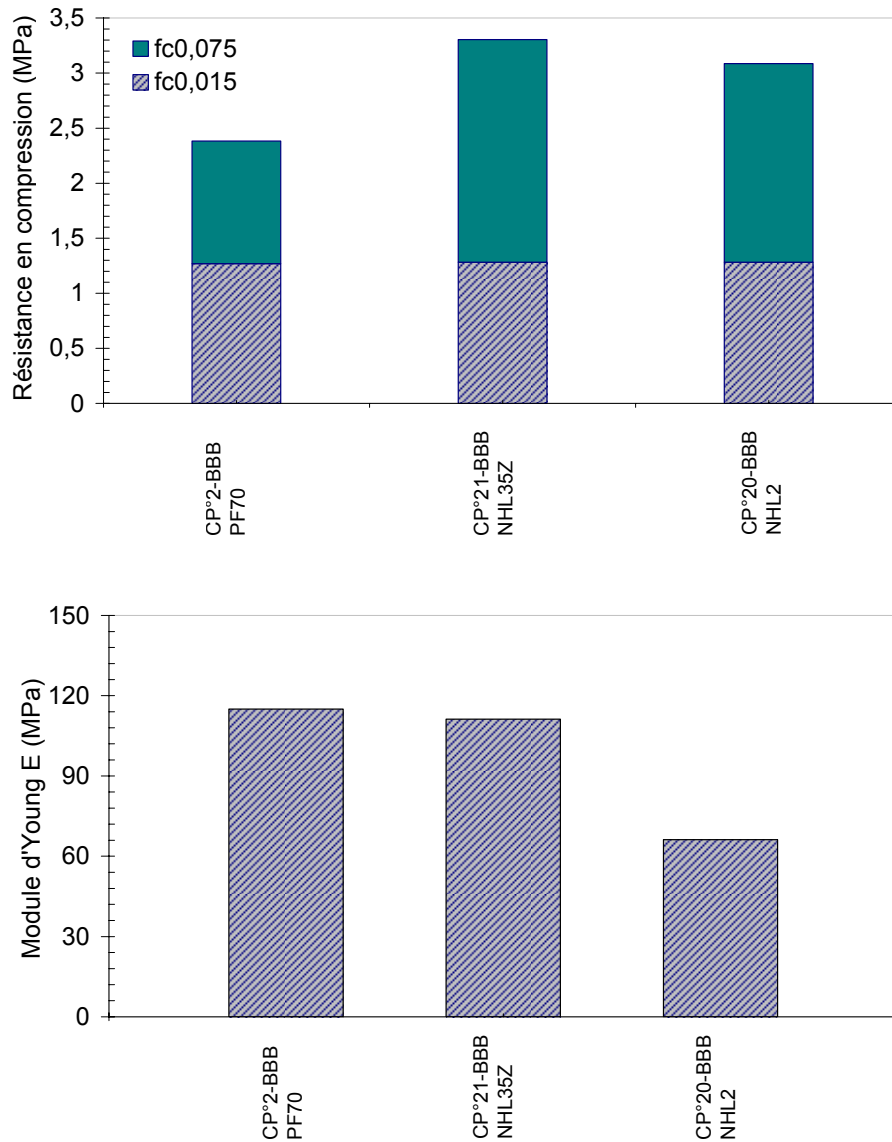


Figure 5-9 : Résistance en compression et module d'Young à 90 jours des éprouvettes fabriquées avec différents liants

5.3.2. Influence de la taille du granulat

On s'intéresse également à l'effet de la taille du granulat sur les caractéristiques mécaniques. Une série d'éprouvettes fabriquées avec quatre granulométries différentes a été réalisée pour la configuration intermédiaire BBB (Figure 5-10).

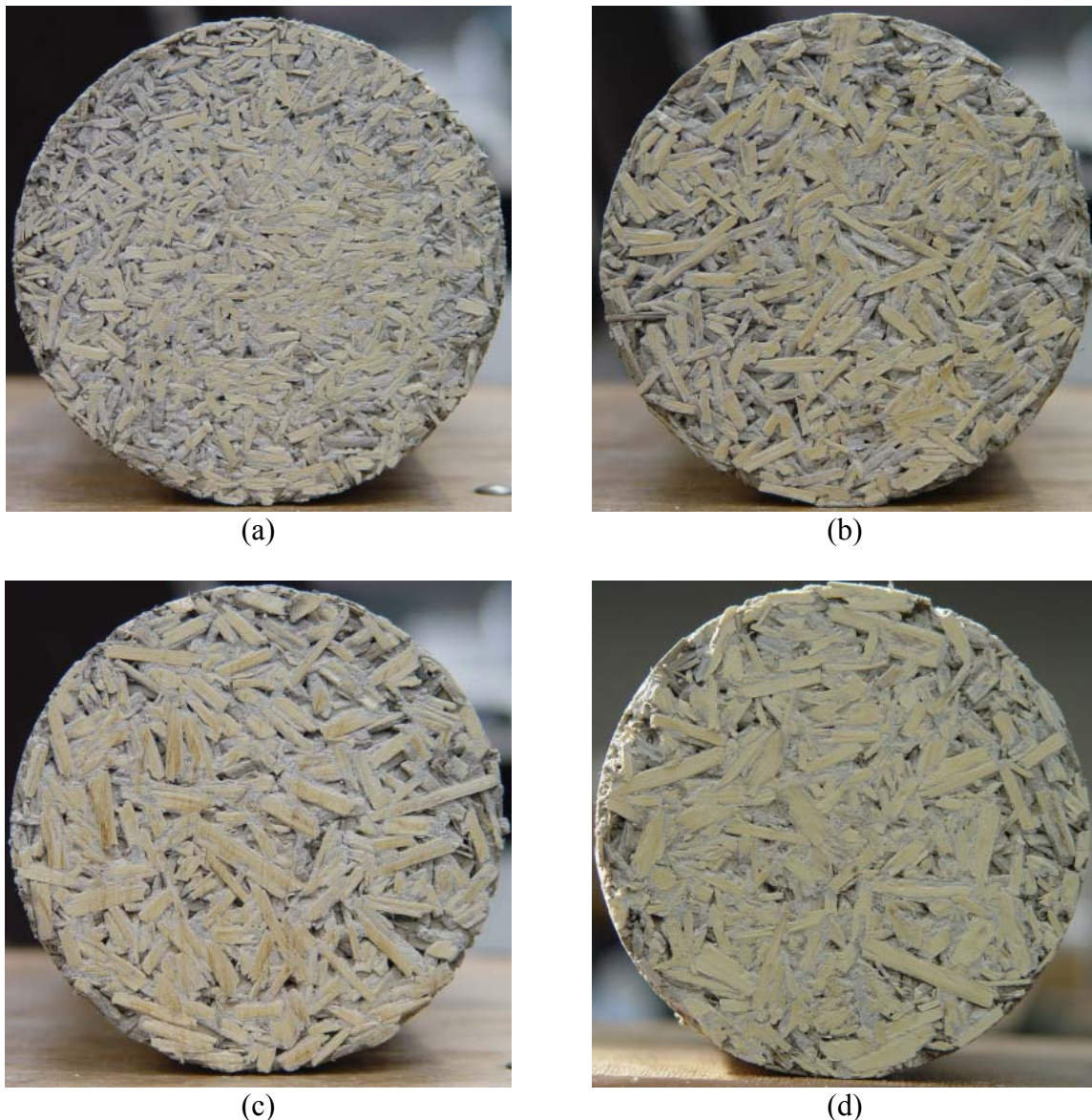


Figure 5-10 : Béton de chanvre fabriqué avec le granulat CP à différente taille. (a) 1,25 - 2,5 mm. (b) 2,5 – 3,15 mm. (c) 3,15 – 5 mm. (d) >5 mm

Les résultats des tests de compression sont présentés dans les Figure 5-11 et Figure 5-12. On constate qu'après 28 jours, le granulat ayant la plus grosse taille est celui qui obtient la meilleure performance mécanique en compression. A 90 jours, cette constatation est plus difficile à faire. Nous n'avons pas d'explications claires sur ce phénomène, mais il est probablement à relier avec la façon dont s'effectue l'enrobage des particules de la chènevotte par la pâte de la chaux. Plus la taille du granulat est importante, plus sa surface spécifique diminue. Autrement dit cela pourrait conduire à un meilleur enrobage des particules du granulat.

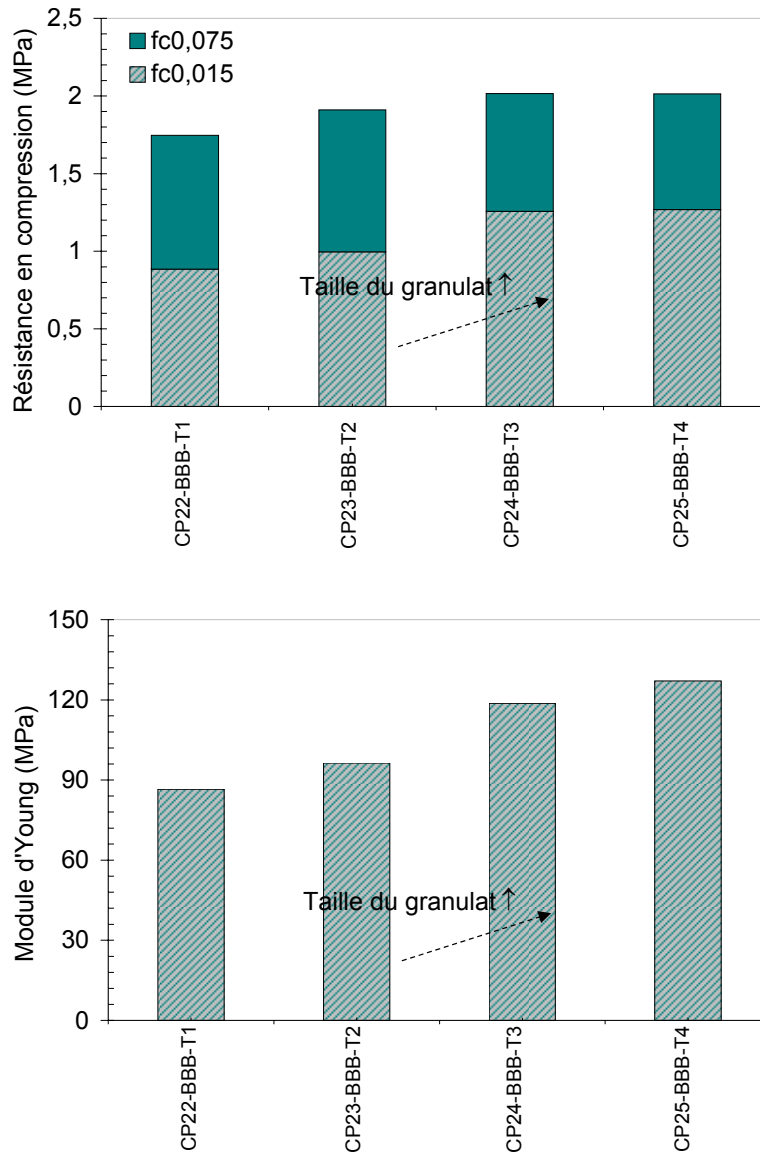


Figure 5-11 : Influence de la taille du granulat sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours

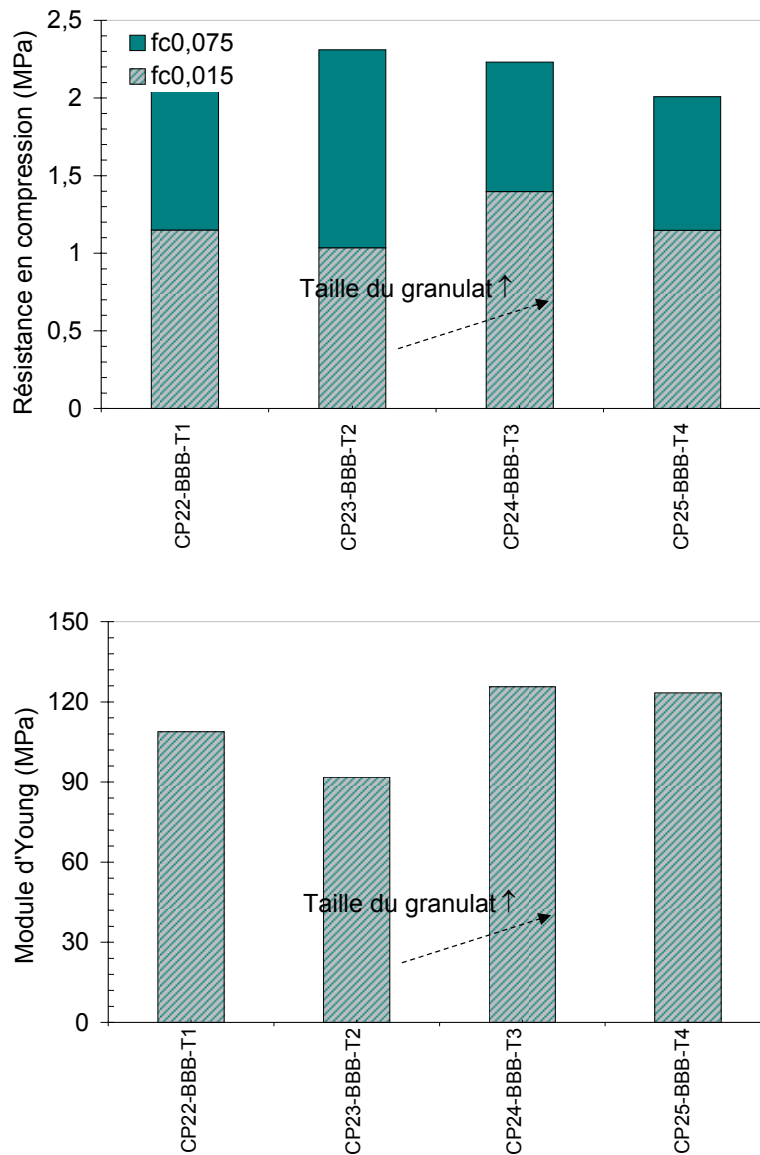
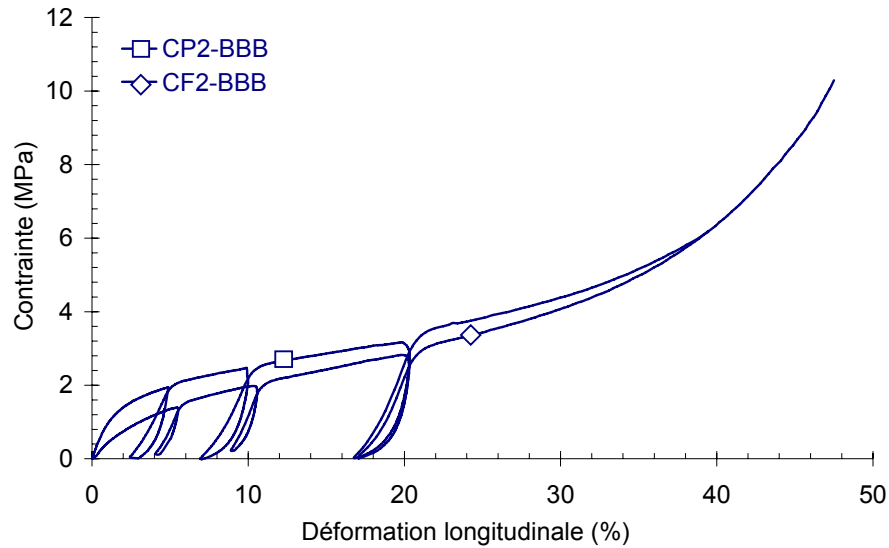


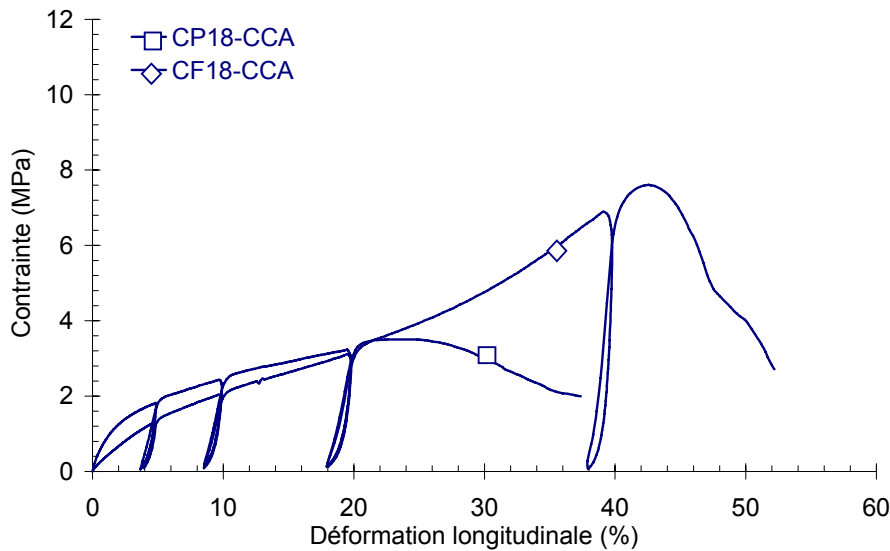
Figure 5-12 : Influence de la taille du granulat sur les caractéristiques mécaniques en compression à 90 jours

5.3.3. Influence des fibres végétales

Des dizaines de configurations ont été élaborées à la fois pour le granulat CP et le granulat CF afin de mettre en évidence l'influence de la nature du granulat sur les propriétés du béton de chanvre. A titre d'illustration, nous ne présentons ici que trois exemples de comparaison du comportement en compression du béton fabriqué avec le granulat CP et avec le granulat CF (Figure 5-13). En générale, la courbe contrainte – déformation du béton fabriqué avec le granulat CF est plus plate qu'avec le granulat CP : Pour des déformations peu importantes, les contraintes sont légèrement inférieures et la pente à l'origine (raideur) est plus faible.



(a)



(b)

Figure 5-13 : Comportement mécanique en compression à 28 jours du béton de chanvre confectionné avec différents granulats. (a) Dans le cas d'un faible dosage en liant. (b) Dans le cas d'un fort dosage en liant

Pour la plage de masse volumique des matériaux élaborés, les éprouvettes présentent un comportement mécanique comparable quel que soit le granulat employé. Il est à noter que suite au compactage effectué, il existe une orientation préférentielle des fibres et des granulats dans le plan horizontal, qui est plutôt favorable étant donnée la configuration des essais, et qui devrait amplifier les éventuels effets sur le comportement mécanique du matériau. Les fibres maintiennent la structure de l'éprouvette sous la charge et l'empêchent de se désagréger comme les éprouvettes fabriquées avec le granulat CP (voir la Figure 5-14). Cependant, pour des déformations moins importantes (inférieure à 20 %), aucune amélioration n'est apportée.

Au contraire, une plus faible résistance en compression, ainsi qu'un plus faible module d'Young des éprouvettes fabriquées avec le granulat CF sont généralement observés. Cette différence entre les deux bétons est notable, et les raisons en sont multiples :



(a)



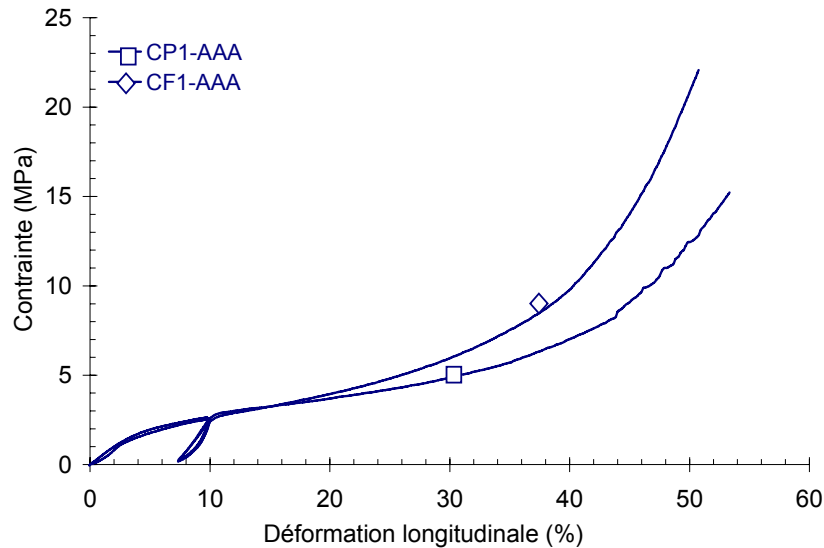
(b)

Figure 5-14 : Rupture d'une éprouvette fabriquée avec le granulat CP sous la compression (a) et d'une autre avec le granulat CF (b)

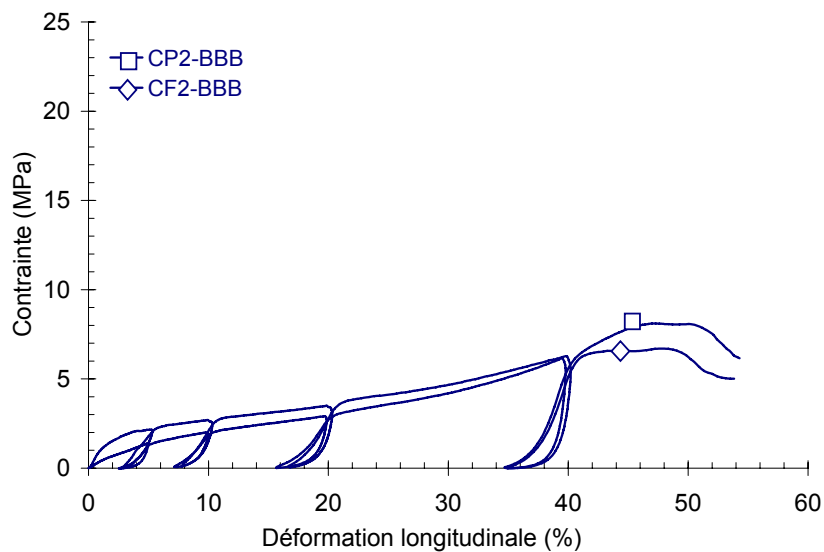
- Etant donné que la masse volumique de la fibre végétale (approximativement 1400 kg/m^3) est beaucoup plus élevée que celle d'une particule de la chènevotte (256 kg/m^3), pour une masse et un volume donnés, le compactage des granulats CF est plus faible. C'est à dire que sa porosité inter – granulaire est plus importante.
- La taille moyenne du granulat CF est inférieure à celle du granulat CP (cf. § 2.1.5). Dans le paragraphe § 5.3.2, il est noté que plus la taille moyenne des granulats est petite, plus la résistance en compression diminue.
- L'adhésion de la pâte du liant aux fibres du granulat CF est probablement assez faible, plus faible que son adhésion à chènevotte. De plus, dans le cas de CF, les fibres

couvrent en partie la surface de la chènevotte (Figure 2-3), ce qui peut diminuer l'adhérence globale du liant à chènevotte.

A 90 jours, l'influence de la nature du granulat sur les propriétés mécaniques du béton de chanvre (Figure 5-15) est identique. Ce résultat confirme que la nature du granulat influence fortement les caractéristiques mécaniques en compression du béton de chanvre.



(a)



(b)

Figure 5-15 : Comportement mécanique en compression à 90 jours du béton de chanvre confectionné avec différents granulats. (a) Dans le cas d'un faible dosage en liant. (b) Dans le cas d'un dosage moyen en liant

Par la suite dans ce chapitre, nous interpréterons uniquement les résultats pour les matériaux confectionnés avec le granulat CP, les remarques sur l'influence des paramètres observés sur

ceux confectionnés avec le granulat CF étant identiques. Elles seront résumées dans en Annexe II.

5.3.4. Influence du compactage

En principe, le compactage implique une force de compression sur le matériau lors de sa mise en œuvre, il diminue sa porosité et entraîne en même temps une augmentation de sa masse volumique apparente. Par conséquent, 3 paramètres dépendent directement de celui-ci :

- La masse volumique initiale de l'éprouvette, obtenue à l'issue de la mise en œuvre.
- La contrainte de compactage appliquée à la mise en œuvre.
- Le dosage en granulat dans le matériau compacté, traduisant la quantité du granulat compressible mis en œuvre par volume unitaire de matériau.

5.3.4.1. Influence de la masse volumique du matériau

La Figure 5-16 montre le comportement mécanique en compression à 28 jours du béton de chanvre pour différentes masses volumiques initiales (cas de la configuration intermédiaire). On constate que pour un rapport L/G et E/L dont le niveau est moyen, la performance mécanique du béton de chanvre augmente avec le compactage.

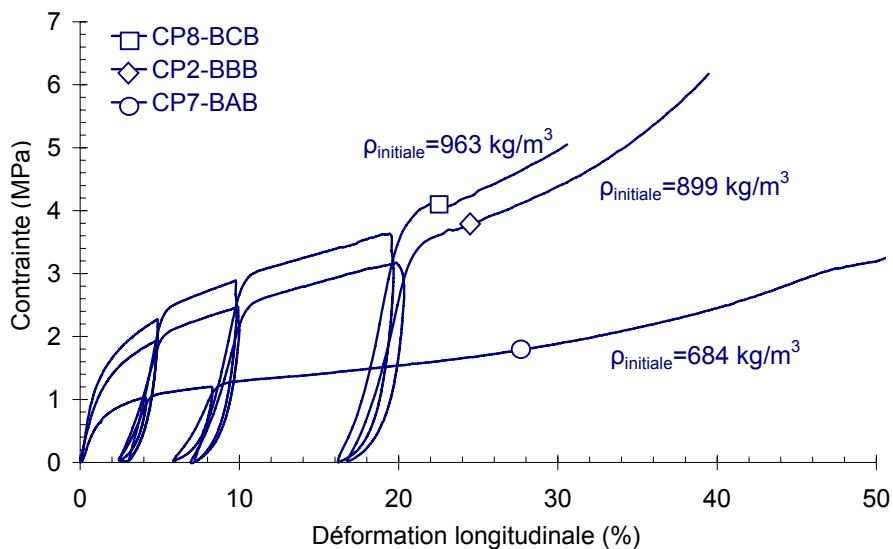
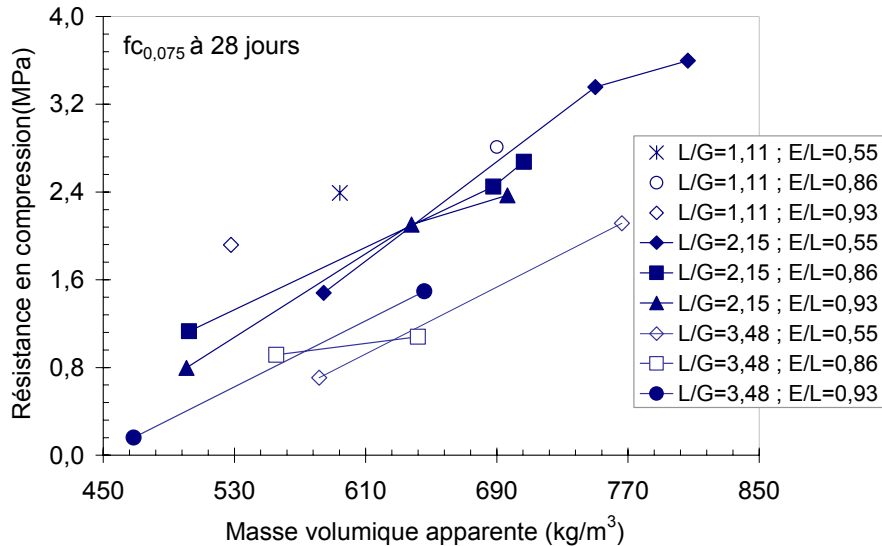


Figure 5-16 : Influence du compactage sur le comportement mécanique en compression à 28 jours

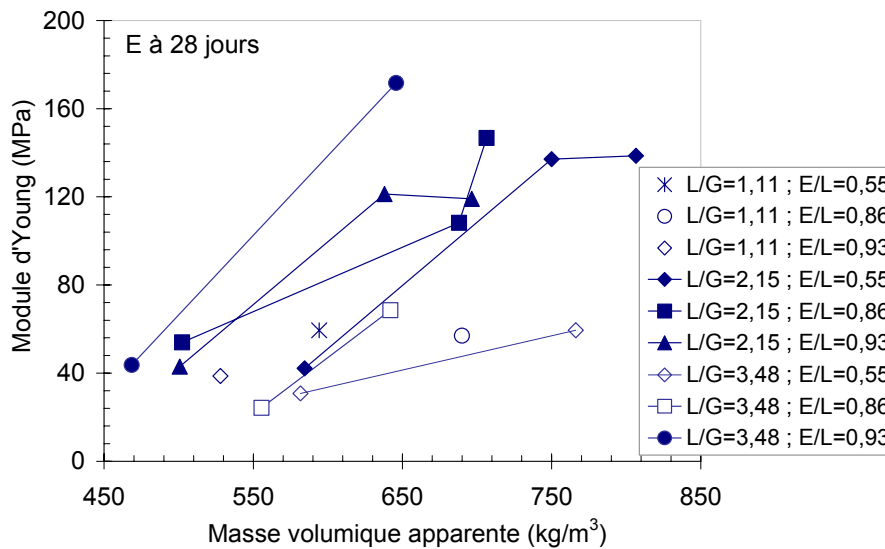
Pour tous les autres niveaux du rapport L/G et E/L, l'influence de la masse volumique apparente de éprouvettes sur leur résistance en compression est illustrée dans la Figure 5-17 (à 28 jours) et la Figure 5-21 (à 90 jours). Dans ces graphiques, les compositions dont le rapport L/G et E/L sont identiques sont reliées. On remarque qu'à 28 jours la relation est assez

linéaire pour un rapport L/G et E/L donné entre la masse volumique apparente à 28 jours (ρ_a) (cf. § 3.2.2.2) et résistance en compression pour 1,5% de déformation (Figure 5-17a), pour 7,5% de déformation (Figure 5-17b).

Le gain de résistance en fonction de la masse volumique apparente est moins important lorsque le rapport L/G est élevé. Par contre, ce gain est moins sensible avec le rapport E/L.



(a)



(b)

Figure 5-17 : Influence du compactage sur la résistance en compression (a) et module d'Young (b) à 28 jours du béton de chanvre confectionné avec le granulats CP

Les mêmes effets de la masse volumique apparente sur les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre à 90 jours sont observés. Il semble donc que l'augmentation de ρ_a , traduisant une plus grande compacité des granulats, conduit indéniablement à une amélioration de la résistance mécanique du béton de chanvre.

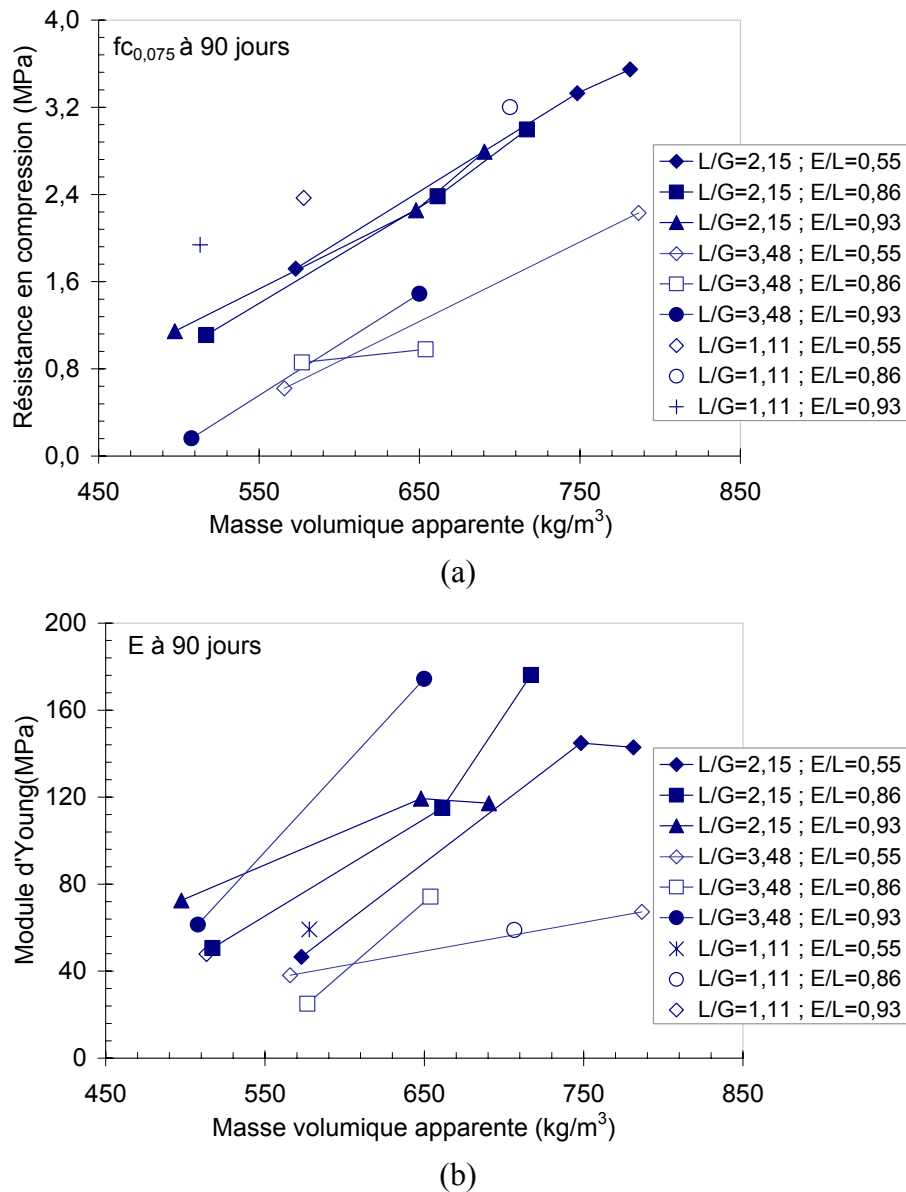


Figure 5-18 : Influence du compactage sur la résistance en compression (a) et module d'Young (b) à 90 jours du béton de chanvre confectionné avec le granulats CP

5.3.4.2. Influence de la contrainte de compactage

Il est également très intéressant d'établir la corrélation entre les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours et la contrainte de compactage, elle est présentée dans la Figure 5-19. Il est logique que la résistance en compression ou le module d'Young du béton de chanvre augmente avec la contrainte de compactage sauf dans le cas d'un faible rapport L/G (1,11). Dans ce cas précis, une chute de la résistance en compression et notamment du module d'Young a en effet été observée. Ce résultat s'explique par le fait qu'avec un rapport L/G trop faible, le squelette solide de liant autour des particules ne peut se former correctement.

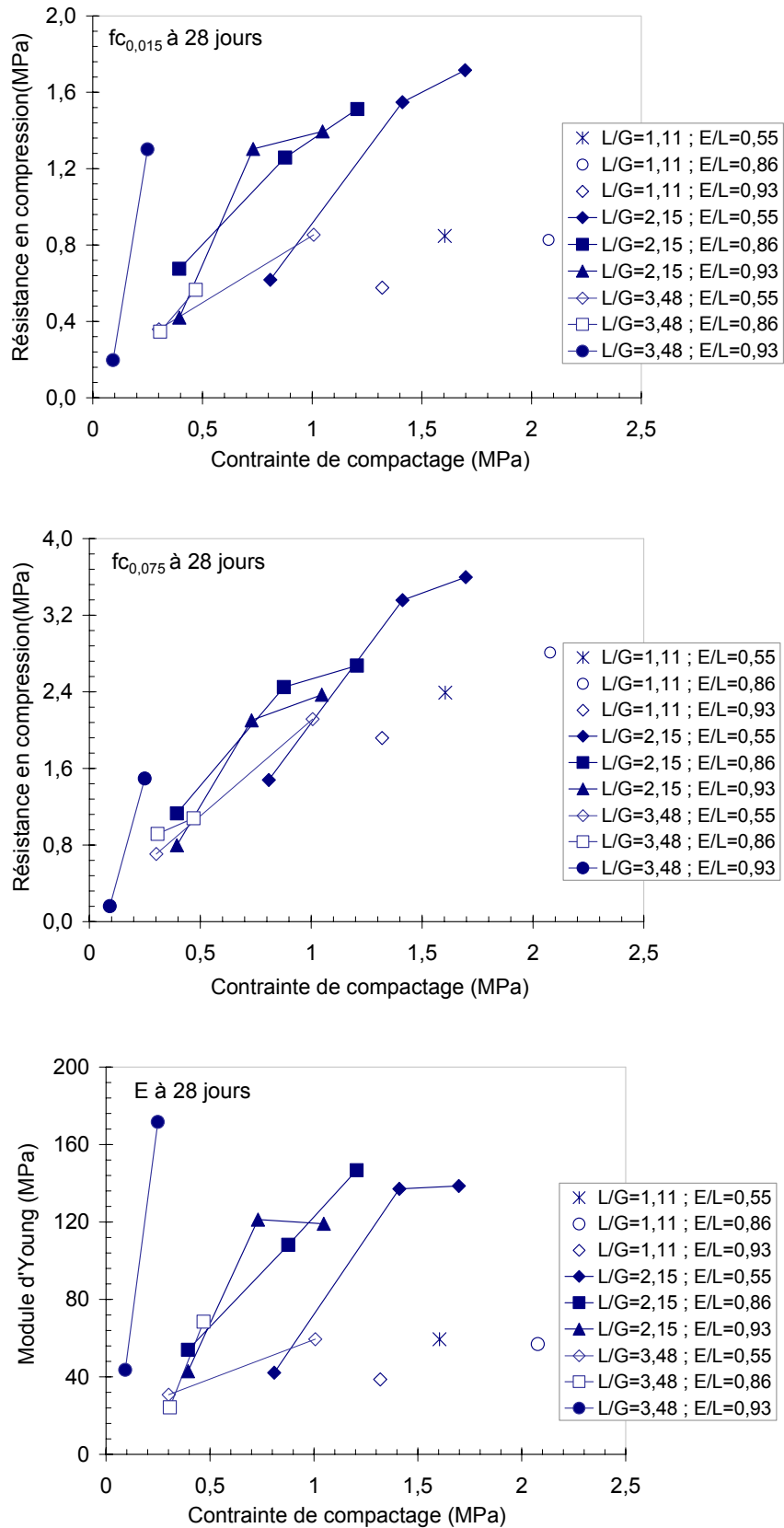


Figure 5-19 : Corrélation entre les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours et la contrainte de compactage

Il est indispensable de créer une bonne matrice de liant dans le béton de chanvre afin d'avoir de meilleures performances mécaniques. En effet, les particules déformable de la chènevotte ne peuvent pas assurer seules la résistance mécanique du composite, et ce malgré un fort compactage. Le compactage ne présente plus alors le même avantage s'il n'y a pas une quantité suffisante de liant pour assurer la cohésion du matériau.

5.3.4.3. Influence du dosage en granulat

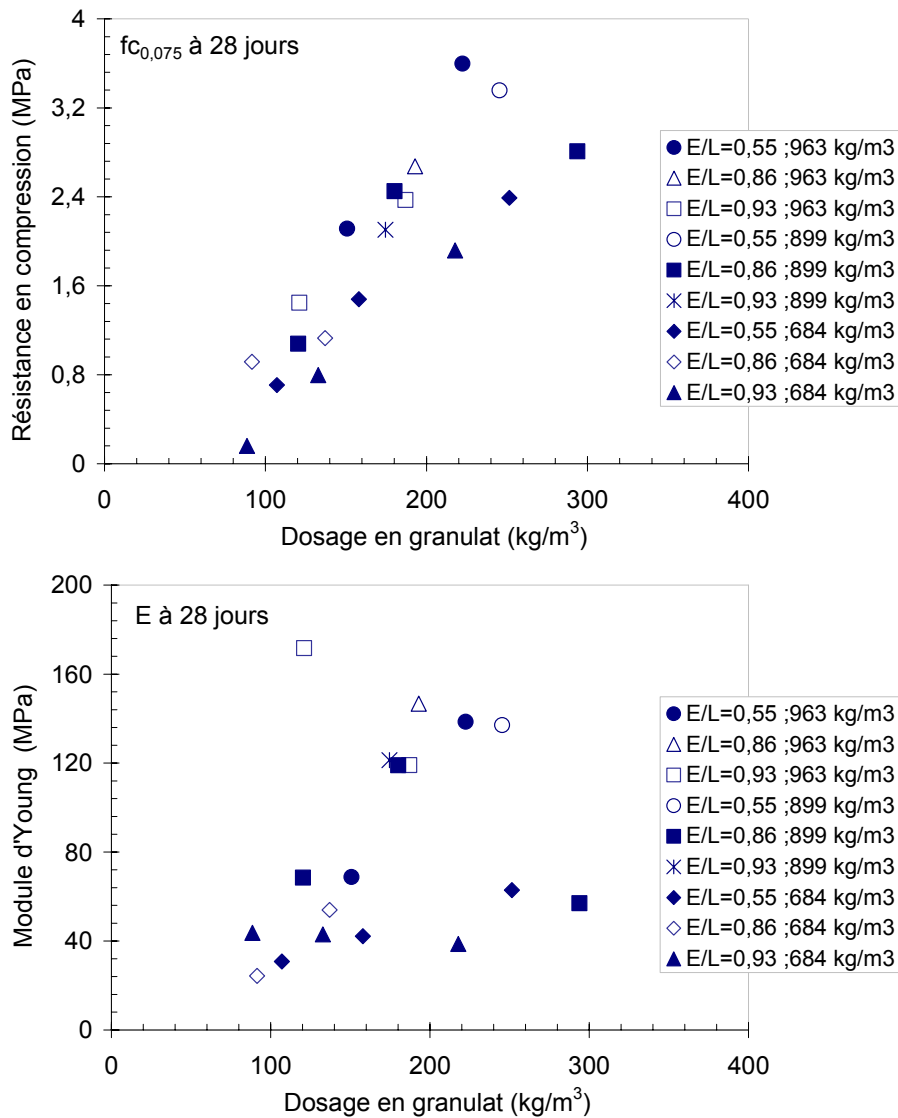


Figure 5-20 : Evolution des caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours en fonction du dosage en chènevotte

Comme il a été évoqué au Chapitre 4, l'augmentation de la contrainte de compactage entraîne une augmentation du dosage en granulat, qui constitue la partie compressible du matériau à l'état frais. De ce fait, les paramètres mécaniques définis, $fc_{0,015}$, $fc_{0,075}$ et E sont liés au dosage en granulat (Figure 5-20). Cette constatation est particulièrement valable pour la résistance $fc_{0,075}$ mais elle est moins nette pour la résistance $fc_{0,015}$ et le module d'Young E . En fait, $fc_{0,075}$ correspond au début de la phase III de la courbe contrainte – déformation à

partir de laquelle les particules de chènevotte supportent presque à elles seules les sollicitations. Le comportement en compression du béton de chanvre est alors à partir de ce stade de déformation celui du granulat compacté. En revanche, la contrainte $f_{c0,015}$ et le module d'Young E caractérisent davantage la phase élastique de la courbe contrainte – déformation pendant laquelle il faut tenir compte du rôle de la matrice formée par le liant. Dans ce cas, le comportement mécanique du matériau ne dépend pas uniquement du dosage en granulat, mais aussi de celui de la pâte de liant durcie.

5.3.5. Influence du rapport L/G

Les résultats expérimentaux confirment que les caractéristiques mécaniques en compression du béton de chanvre diminuent avec le rapport L/G. A titre d'illustration, la Figure 5-21 montre le comportement en compression du béton de chanvre à différents niveaux du rapport L/G mais toujours pour la même masse volumique initiale et le même rapport E/L.

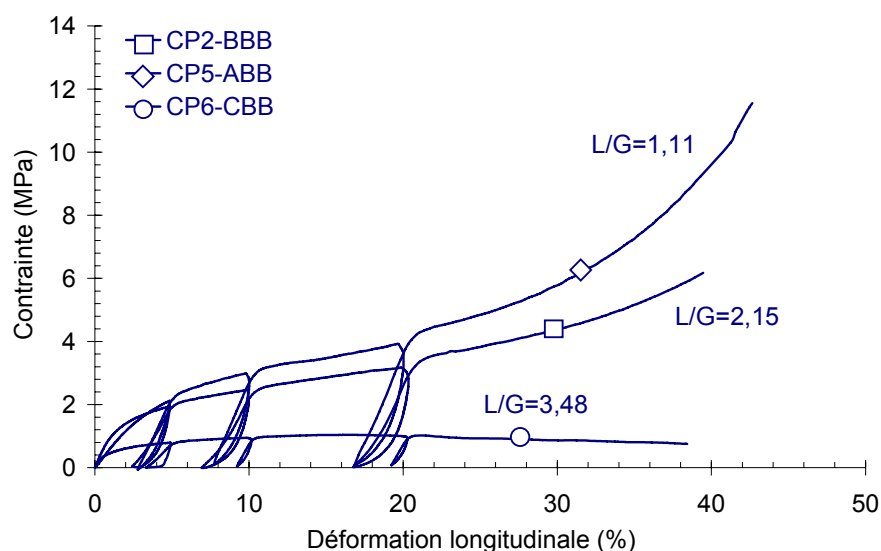


Figure 5-21 : Comportement en compression de trois bétons de chanvre de même configuration confectionnés avec différents niveaux du rapport L/G

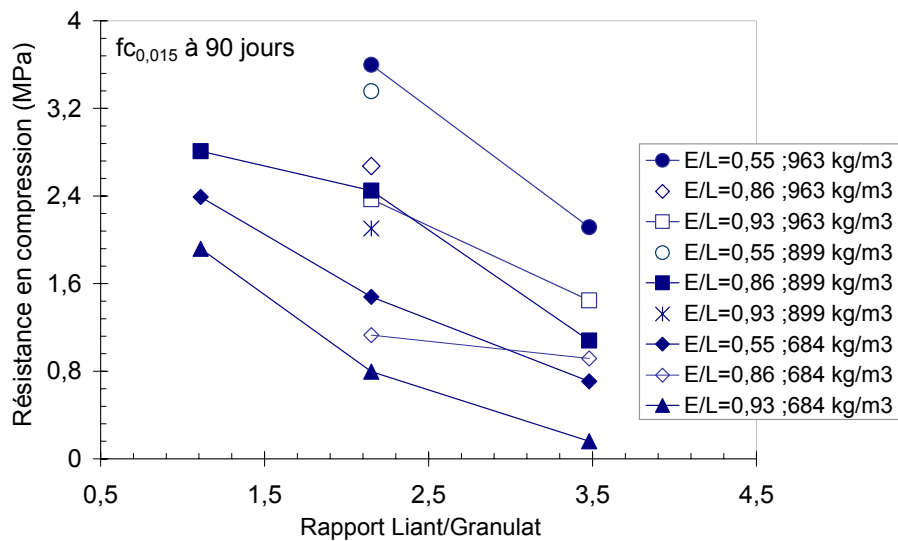
Vis-à-vis des autres configurations, l'influence du rapport L/G sur les caractéristiques mécaniques en compression est présentée dans la Figure 5-22 pour l'essai à 28 jours et dans la Figure 5-23 pour l'essai à 90 jours. Là encore, les compositions ayant le même rapport E/L et la même masse volumique initiale sont reliées.

On observe que plus le rapport L/G augmente, plus la résistance en compression diminue. Cette tendance est relativement nette pour les résistances $f_{c0,075}$ à 28 jours et 90 jours (Figure 5-22a, Figure 5-23a). Pour le module d'Young du matériau, E , la même constatation globale peut être faite, avec cependant une incertitude de mesure plus importante conduisant à des données un peu plus dispersées. (Figure 5-22b et Figure 5-23b).

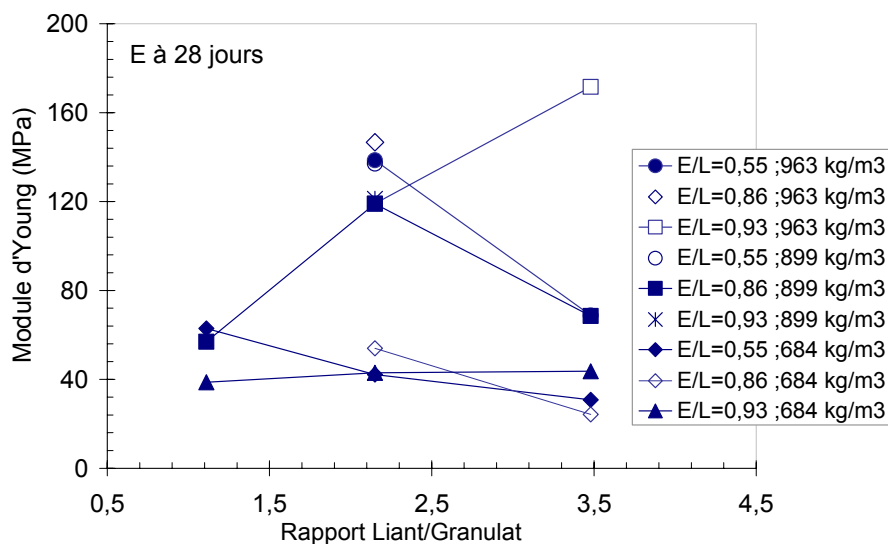
Comme nous l'avons signalé dans le Chapitre 4, pour un même $\rho_{initial}$, et rapport E/L, lorsque le rapport L/G est faible, la compacité du granulat est plus importante. Une force de

compactage plus importante est d'ailleurs nécessaire à la mise en œuvre. Par conséquent, on obtient globalement une meilleure résistance mécanique du béton de chanvre comme illustré dans la Figure 5-20 qui exprime l'évolution des caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours en fonction du dosage en granulat.

De cette constatation, nous déduisons qu'il existe probablement un optimum de dosage en liant. Une suppression totale de liant, entraînant une annulation de la cohésion entre les granulats, conduirait à de plus faibles résistances mécaniques. Il est vrai que pour quelques compositions cet optimum est observé concernant la résistance $f_{c,0,015}$ et le module d'Young, notamment dans le cas du granulat CF (voir Annexe II).

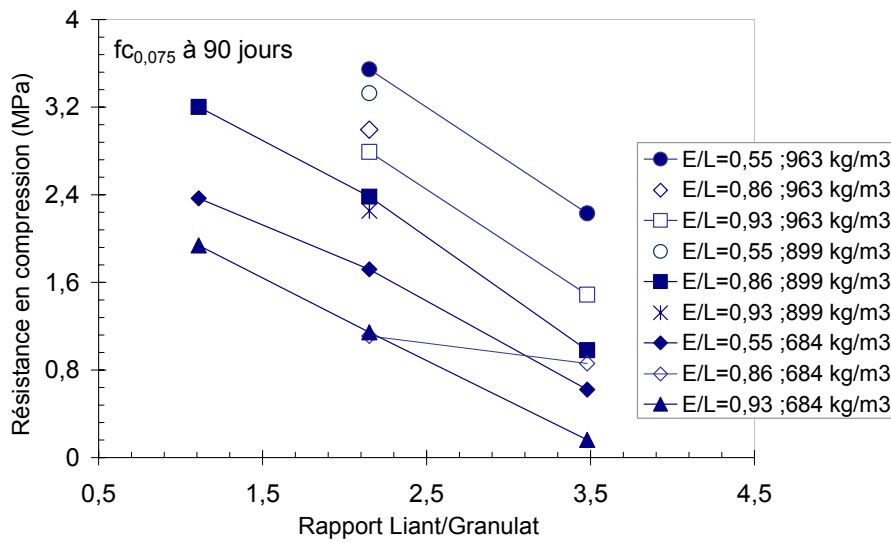


(a)

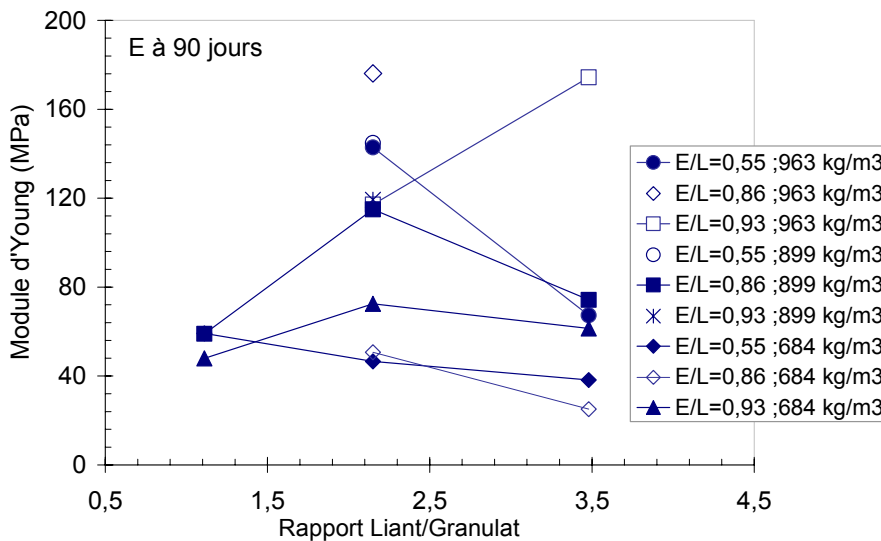


(b)

Figure 5-22 : Influence du rapport L/G sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours Telles que : (a) la résistance en compression $f_{c,0,075}$, (b) le module d'Young



(a)



(b)

Figure 5-23 : Influence du rapport L/G sur les caractéristiques mécaniques en compression à 90 jours telles que (a) la résistance en compression $f_{c0,075}$, (b) le module d'Young

5.3.6. Influence du rapport E/L

L'influence du rapport E/L sur la configuration intermédiaire est montrée dans la Figure 5-24. Il apparaît une diminution significative de la résistance mécanique avec l'augmentation du rapport E/L.

L'étude plus générale de ce paramètre sur $f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$, et le module d'Young est présentée sur les Figure 5-25 et Figure 5-26 pour le béton de chanvre fabriqué avec le granulat CP et

dans l'Annexe II pour celui avec le granulat CF. Globalement, plus le dosage en eau est élevé, et plus les résistances $f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$ sont faibles, (pour un ρ_{initial} et un rapport L/G donné).

Les analyses de l'influence du rapport E/L est compliquée du fait que la chènevotte, avec sa capacité d'absorption en eau, a tendance à concurrencer l'hydratation du liant, L'augmentation de la performance mécanique du béton de chanvre par diminution du rapport E/L peut s'expliquer par deux raisons :

- La première est l'augmentation du dosage en granulat lorsque l'on diminue le rapport E/L. Cette raison est exactement la même que celle de l'influence du rapport L/G sur la résistance en compression du béton de chanvre (cf. § 5.3.4.3).
- La deuxième explication est à relier au fait qu'un rapport E/L plus élevé engendre une plus grande porosité de la pâte de chaux et par conséquent une résistance et une déformation à la rupture plus faible.

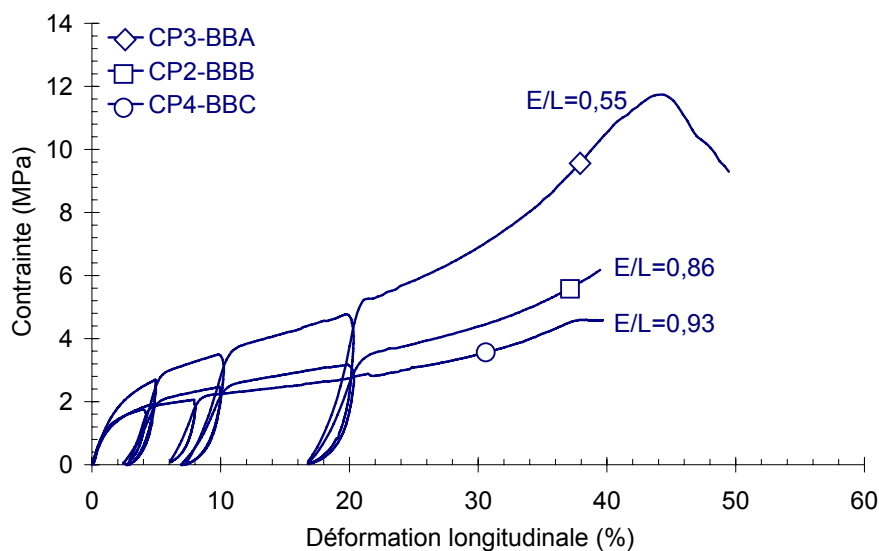
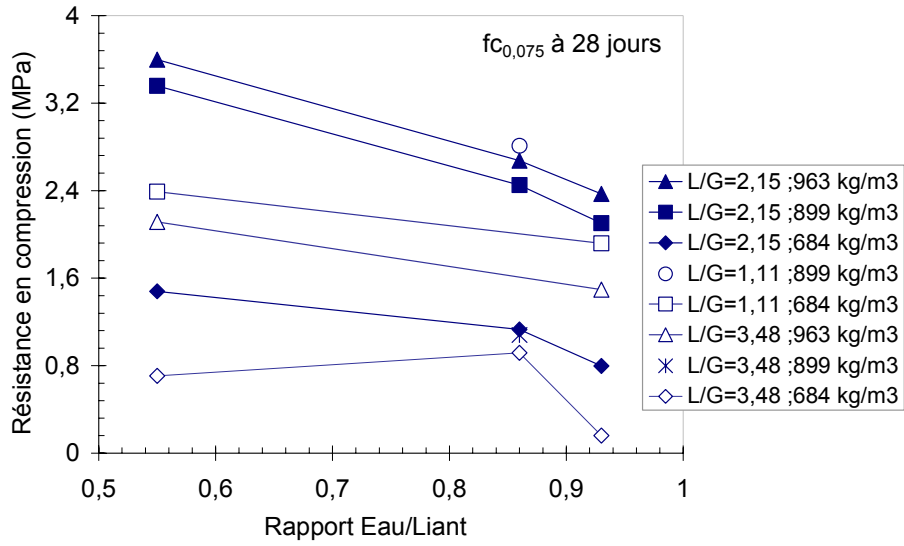
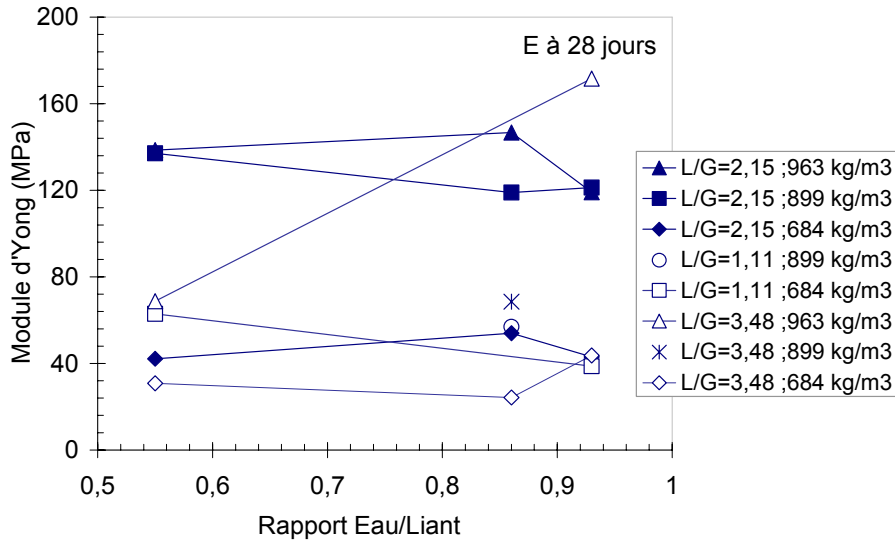


Figure 5-24 : Comportement en compression à 28 jours de trois bétons de chanvre de configuration identique confectionnés avec différents rapports E/L



(a)



(b)

Figure 5-25 : Influence du rapport E/L sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours telles que : (a) la résistance en compression $f_{c_{0,075}}$, (b) le module d'Young

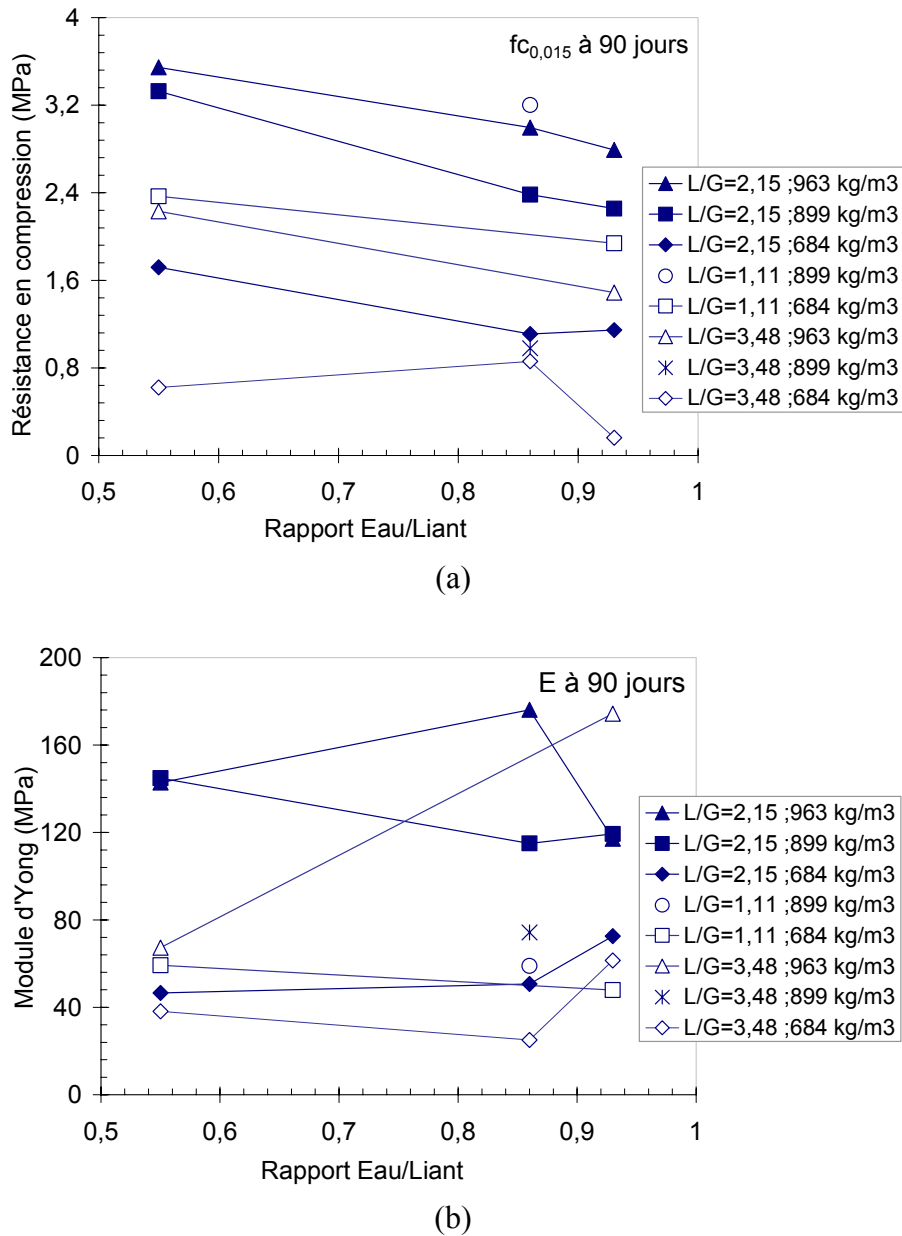


Figure 5-26 : Influence du rapport E/L sur les caractéristiques mécaniques en compression à 90 jours telles que : (a) la résistance en compression et $f_{c0,075}$, (b) le module d'Young

On constate que l'influence du rapport E/L sur la performance mécanique en compression du béton de chanvre est moins significative que celle du compactage ou encore que celle du rapport L/G.

Dans certains cas, (rapport L/G égal à 3,48 par exemple) on observe un effet inverse sur le module d'Young E par rapport à la tendance générale. Cela peut être associé à l'hydratation du liant qui serait dans ces cas favorisée par un rapport E/L plus élevé. Lorsque le rapport L/G est élevé, la part d'eau absorbée par les granulats diminue. La compétition entre absorption et hydratation est réduite et une meilleure prise du liant peut se produire, induisant un module d'Young plus élevé dans ces cas.

Dans les limites de notre étude qui s'oriente vers les éléments compactés, les caractéristiques mécaniques en compression du béton de chanvre sont donc moins sensibles à la variation du rapport E/L qu'à celle du compactage et du rapport L/G.

5.3.7. Etude à rapport volumique constant

Globalement, le volume de pâte de liant a été ajusté pour essayer de remplir l'ensemble du volume de vides accessibles dans une éprouvette compactée. Ce volume doit correspondre à un dosage optimal mais il est difficile à prédire exactement étant donnée la déformation importante des granulats. Le procédé de fabrication amène parfois à quelques éjections de surplus de liant lors du compactage à la mise en œuvre (cf. § 3.2.2.1). C'est le cas des configurations n°8 BCB et n°12 BCA (voir Tableau 3-2) qui présentent d'ailleurs les plus fortes contraintes à l'écrasement pour 1,5% de déformation. Dans ces cas, la pâte de liant sature l'éprouvette.

La composition avec le rapport L/G minimal, la masse volumique initiale maximal et le rapport E/L minimal n'a pas pu être réalisée, c'est-à-dire la composition ACA puisque les contraintes de compactage excède la capacité de notre dispositif (cf. § 3.2.2.1)

Afin d'affiner la composition offrant le maximum de résistance mécanique, nous avons étudié différentes compositions s'appuyant sur la configuration BCA, qui présente les caractéristiques mécaniques les plus élevées. Le dosage en granulat et le volume de pâte ont été conservés constants afin de pouvoir réaliser le compactage, mais différents rapports E/L ont été testés.

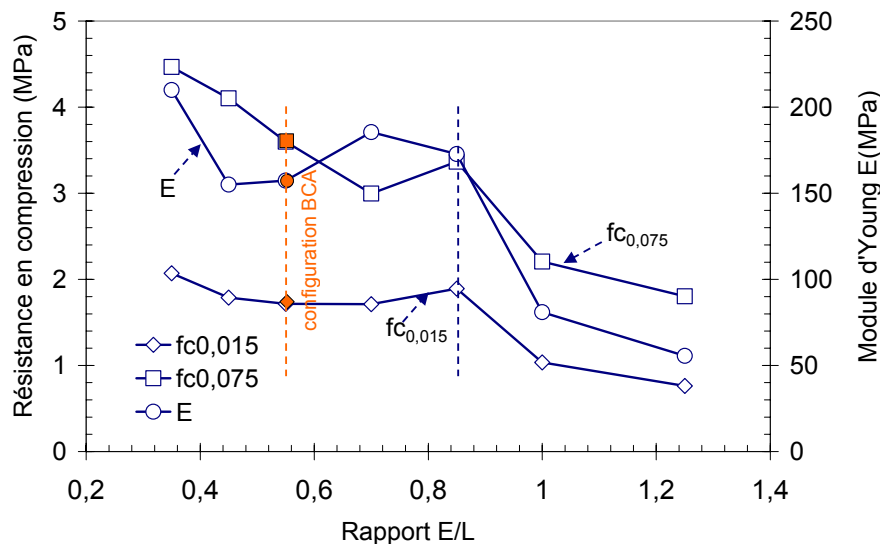


Figure 5-27 : Influence du rapport E/L sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours dans le cas où volume de la chènevotte et de la pâte sont constants

Sept compositions ont été élaborées dans ce cadre, en faisant varier le niveau E/L entre 0,35 et 1,25, c'est-à-dire autour de la valeur minimale de l'étude précédente, fixé à $E/L = 0,55$. Les résultats sont présentés dans la Figure 5-27.

Lors que le rapport E/L passe de 0,35 à 0,85, nous ne voyons pas de tendance marquée de l'influence du rapport E/L (Figure 5-27). Au niveau de la résistance $f_{c0,015}$, peu de variations peuvent être observées. Au-delà de $E/L = 0,85$, les caractéristiques mécaniques diminuent brusquement. Cette diminution s'explique par une matrice du liant ou la quantité d'eau entraîne une pâte de liant plus poreuse, de moindre résistance mécanique.

En ce qui concerne le module d'Young, après une chute lorsque le rapport E/L passe de 0,35 à 0,45, il s'accroît légèrement avec ce rapport.

Etant donné que les forces de compactages diminuent lorsque E/L augmente (cf. § 4.1.2), et que la vitesse de maturation des éprouvette augmente également lorsque E/L augmente (cf. § 5.3.8) le rapport $E/L = 0,85$ apparaît donc comme optimal dans le cadre d'un processus de préfabrication.

5.3.8. Evolution de la résistance en compression en fonction du temps

Il convient de rappeler que les essais de compression ont été réalisés à 28 jours et à 90 jours pour presque toutes les compositions et éventuellement à 21 et 180 jours pour étudier la maturation du béton de chanvre à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et 75 ± 5 HR.

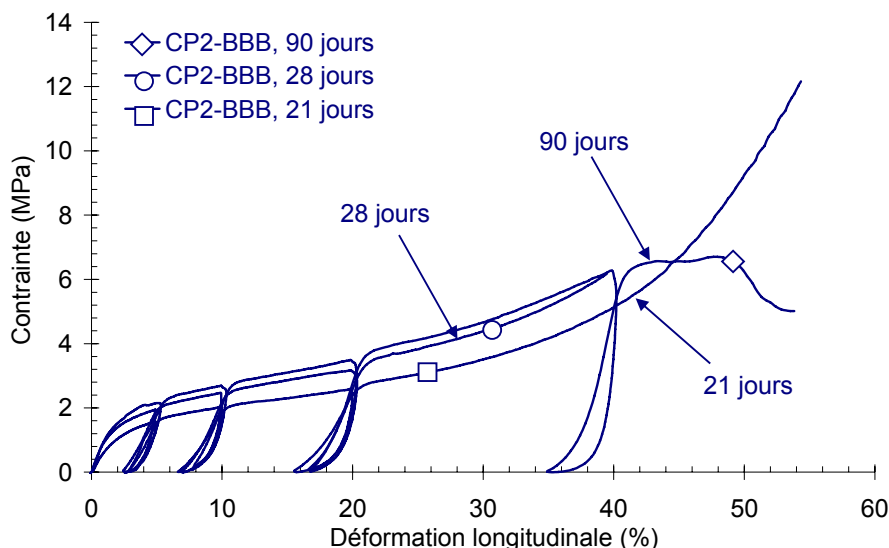


Figure 5-28 : Comportement en compression du béton de chanvre à différents âges

La Figure 5-28 présente l'évolution du comportement en compression de la composition CP2-BBB à 21, 28 et 90 jours. Un net écart entre les courbes contraintes-déformation à 21 jours et celle à 28 jours est observable, mais pas entre celles à 28 jours et 90 jours. De plus, à jeune

âge la courbe contrainte – déformation ne présente pas de pic de contrainte. Par contre, un tel pic est observable sur la courbe contrainte – déformation à 90 jours.

Pour les autres compositions, l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques en compression est rassemblée dans les Tableau 5-1, 2.

N°	Configuration	Liant	Résistance en compression $f_{c_{0,015}}$ (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		0,847	0,768	0,911
2	BBB	—	0,864	1,258	1,270	
3	BBA	—		1,548	1,609	
4	BBC	—		1,303	1,240	1,883
5	ABB	—		0,827	0,829	
6	CBB	—		0,565	0,574	
7	BAB	—	0,204	0,675	0,675	
8	BCB	—		1,513	1,750	
9	CCC	—		1,301	1,319	
10	BAA	—		0,618	0,667	
11	BAC	—	0,300	0,419	0,625	
12	BCA	—		1,716	1,700	
13	BCC	—		1,395	1,651	
14	AAC	—		0,577	0,671	0,604
15	CAB	—		0,346	0,367	
16	CAA	—		0,359	0,348	
17	CAC	—		0,197	0,217	
18	CCA	—		0,853	0,981	
20	BBB	NHL 2		0,647	0,873	
21	BBB	NHL 3,5Z		1,171	1,283	

Tableau 5-1 : Evolution de la résistance $f_{c_{0,015}}$ des différentes configuration de béton de chanvre fabriquées avec le granulat CP

N°	Configuration	Liant	Résistance en compression $f_{c0,075}$ (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		2,391	2,368	2,288
2	BBB	—	1,857	2,450	2,383	
3	BBA	—		3,357	3,327	
4	BBC	—		2,103	2,255	2,927
5	ABB	—		2,810	3,202	
6	CBB	—		1,080	0,980	
7	BAB	—	0,939	1,130	1,110	
8	BCB	—		2,674	2,995	
9	CCC	—		1,495	1,489	
10	BAA	—		1,480	1,719	
11	BAC	—	0,605	0,797	1,146	
12	BCA	—		3,598	3,546	
13	BCC	—		2,370	2,791	
14	AAC	—		1,918	1,938	1,878
15	CAB	—		0,916	0,859	
16	CAA	—		0,707	0,621	
17	CAC	—		0,161	0,162	
18	CCA	—		2,115	2,231	
20	BBB	NHL 2		1,431	2,676	
21	BBB	NHL 3,5Z		2,139	3,305	

N°	Configuration	Liant	Module d'Young E (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		62,895	59,190	60,458
2	BBB	—	70,817	118,989	115,010	
3	BBA	—		137,080	144,851	
4	BBC	—		121,290	119,340	137,724
5	ABB	—		56,936	58,968	
6	CBB	—		68,523	74,257	
7	BAB	—	34,770	54,000	50,685	
8	BCB	—		146,707	176,143	
9	CCC	—		171,651	174,389	
10	BAA	—		42,169	46,581	
11	BAC	—	35,943	42,999	72,519	
12	BCA	—		138,571	142,870	
13	BCC	—		119,095	117,175	
14	AAC	—		38,694	47,890	38,671
15	CAB	—		24,285	25,070	
16	CAA	—		30,778	38,165	
17	CAC	—		43,675	61,436	
18	CCA	—		68,754	67,321	
20	BBB	NHL 2		48,355	66,193	
21	BBB	NHL 3,5Z		115,053	111,250	

Tableau 5-2 : Evolution de la résistance $f_{c0,075}$ et E des différentes configuration de béton de chanvre fabriquées avec le granulats CP

Globalement, le durcissement du béton de chanvre est très rapide jusqu'à 21 jours et continue largement d'augmenter jusqu'à 28 jours. Cependant, au delà de 28 jours, les caractéristiques mécaniques évoluent avec des amplitudes faibles.

Bien entendu, le durcissement du béton de chanvre est associé au mécanisme d'hydratation du liant utilisé dans le matériau et celui-ci est encore mal connu. Pour les compositions dont le dosage en liant est faible, par exemple CP1-AAA ou CP14-AAC, la résistance en compression ne change pas entre 28 jours et 180 jours. Pour les compositions dont le dosage en liant est plus élevé, par exemple CP4-BBC, la résistance en compression n'évolue pas entre 28 jours et 90 jours mais plus significativement entre 90 jours et 180 jours. Ceci indique un durcissement assez long pour les compositions comportant le moins de liant et le moins d'eau.

Entre 28 jours et 90 jours, nous ne voyons pas de conséquence du compactage sur l'évolution de la résistance du béton de chanvre mais il n'en est pas de même pour le rapport E/L, autrement dit la teneur en eau. L'évolution des résistances est d'autant plus importante que le dosage en eau est fort (voir les compositions CP12-BCA, CP8-BCB, CP13-BCC). Un rapport E/L élevé peut être favorable à l'évolution de la résistance du béton de chanvre.

5.4. Essai de flexion trois points sur les plaques de béton de chanvre

5.4.1. Mode opératoire

Le mode opératoire de cet essai diffère légèrement de celui décrit dans la Norme NF EN 520 pour s'adapter à la machine disponible dans le laboratoire (voir Figure 5-29).

Les essais de flexion trois points ont été réalisés sur des plaques de béton de chanvre en s'inspirant de la Norme NF EN 520. Leur surface est de ce fait de 300×400 mm et leur épaisseur varie de 17 à 20 mm. Elles sont découpées à partir des plaques initiales de 400×600 mm fabriquées au laboratoire. Il est important de noter que le gonflement de l'épaisseur des éprouvettes est considérable même lorsqu'elles restent confinées dans leur moule pendant une semaine (cf. § 3.2.4). Le gonflement est d'ailleurs d'autant plus important que la force de compactage est grande (le retour élastique des particules de chènevotte engendre une force d'autant plus grande que la compression a été importante). Leur épaisseur peut être de 2 à 5 mm plus importante que l'épaisseur désirée (15 mm). L'épaisseur de la plaque de béton de chanvre à compacter doit donc être prise en compte lors du compactage.

Les plaques sont placées sur deux appuis cylindriques parallèles dont les centres sont espacés de 350 mm. Le chargement est piloté en déplacement et est appliqué au centre entre les deux appuis, la vitesse est de 0,01 mm/s et la cellule de charge a une capacité de 5 kN.

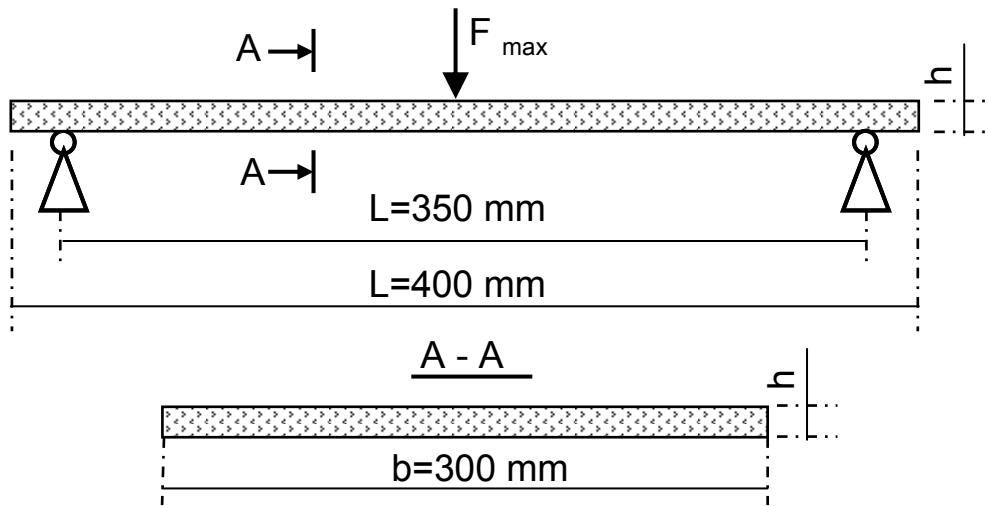


Figure 5-29 : Schéma et montage de l'essai de flexion trois points sur une plaque de béton de chanvre

La charge appliquée et la flèche sont enregistrées toutes les 2 secondes pour pouvoir tracer la courbe force – flèche. La résistance à la rupture en flexion est calculée selon la formule suivante :

$$f_t = \frac{3F_{\max}L}{2bh^2} \quad [4-1]$$

- D'où
- f_t – résistance à la rupture en flexion (MPa)
 - F_{\max} – charge maximale, ou charge de rupture (N)
 - L – distance entre axes des appuis cylindriques (mm)
 - b – largeur de la plaque (mm)
 - h – épaisseur de la plaque (mm)

N°	Configuration	Liant	Contrainte de rupture en flexion (MPa)		Masse volumique apparente (kg/m ³)	
			CP	CF	CP	CF
2	BBB	Tradical PF70	0,599	0,246	507,04	565,10
6	CBB	—	0,374	0,139	535,35	568,54
7	BAB	—	0,247	0,061	419,18	452,21
15	CAB	—	0,136		425,24	

Tableau 5-3 : Résistance à la rupture en flexion des compositions testées

Pour une même composition, deux plaques identiques de béton de chanvre sont testées après 40 jours de conservation dans une atmosphère à $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et 75 ± 5 HR. Les résultats sont résumés dans le Tableau 5-3. On remarque que les plaques de la composition CF15-CAB présentent une très faible rigidité puisqu'elles se cassent sous leur propre poids.

5.4.2. Influence de la nature du granulat

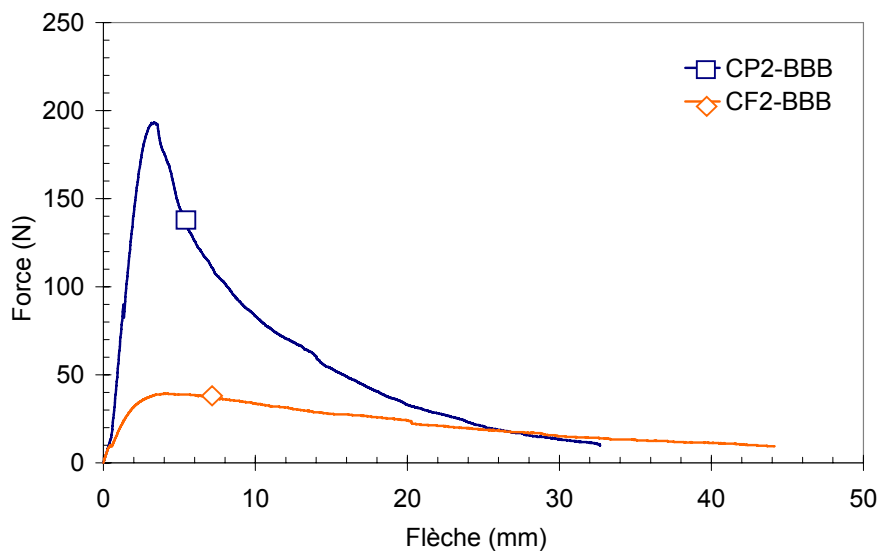
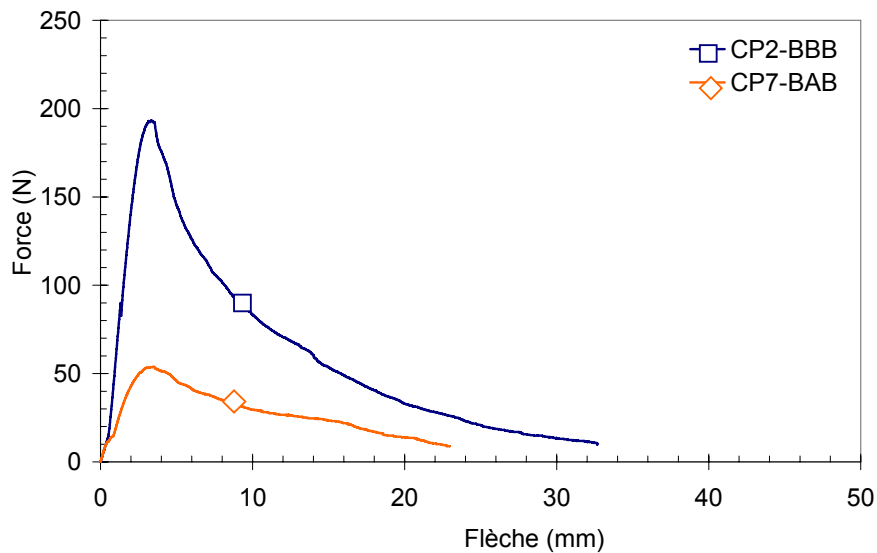


Figure 5-30 : Comportement en flexion des plaques du béton de chanvre confectionnées avec les deux types de granulat.

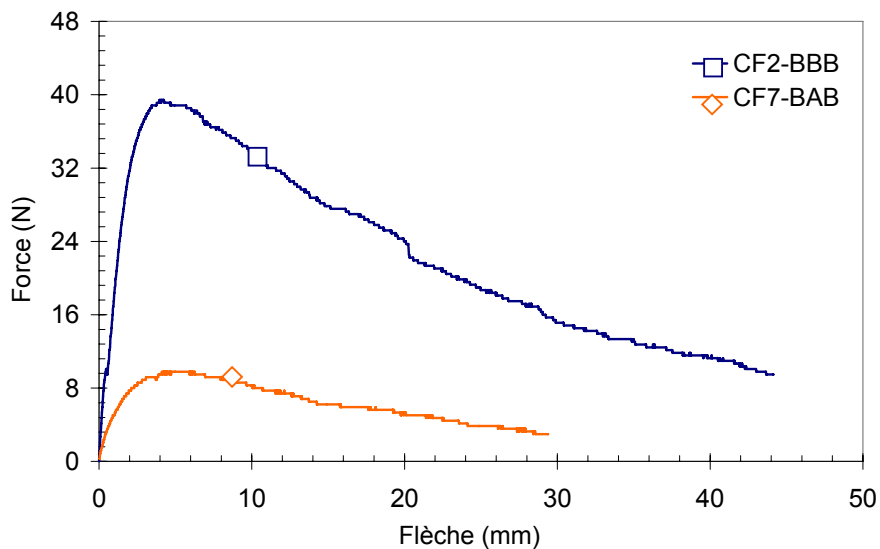
Le premier but de l'essai de flexion est de connaître l'influence des fibres végétales sur la résistance en flexion, proportionnelle à la résistance en traction du béton de chanvre. Après avoir obtenu des résistances en compression plus faibles avec le granulat CF, nous attendions cette fois-ci une meilleure contribution des fibres végétales au comportement en flexion des bétons fabriqués avec ce granulat, puisque la résistance en traction des fibres de chanvre est très élevée (Thygesen, 2006). Or les résultats expérimentaux aboutissent aux conclusions inverses (voir Figure 5-30). Les plaques fabriquées avec la chènevotte pure présentent

clairement une résistance en compression plus importante que celles obtenues avec le granulat CF. Cela provient principalement, à notre avis, d'une moins bonne adhérence de la pâte au granulat CF qu'au granulat CP (cf. § 5.3.3), car nous observons que dans l'essai de flexion, la rupture de la plaque est simplement due au détachement des particules de la chènevotte, et non à leur rupture. Le rôle des fibres n'intervient que pour des déformations importantes et change le comportement en flexion après le pic de résistance.

5.4.3. Influence du compactage



(a)

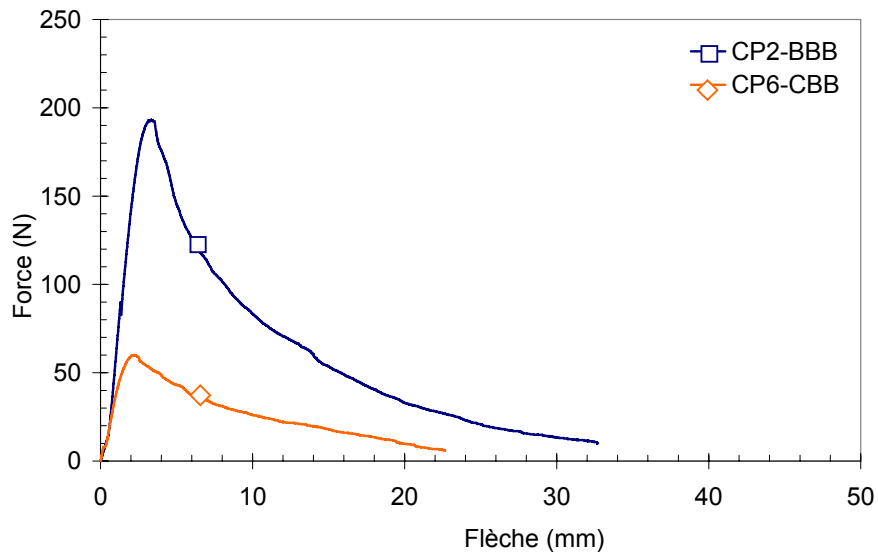


(b)

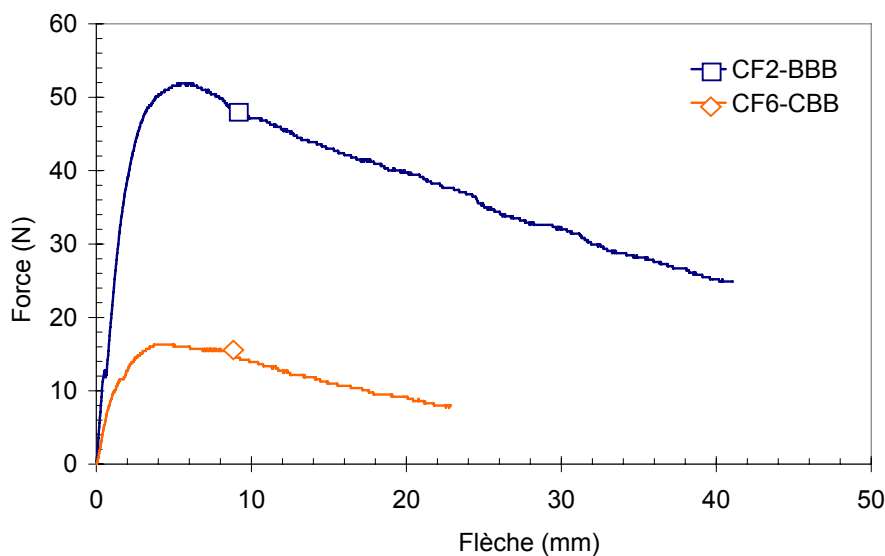
Figure 5-31 : Influence du compactage sur le comportement en flexion du béton de chanvre.
(a) Dans le cas du granulat CP. (b) Dans le cas du granulat CF

La Figure 5-31 présente l'influence du compactage sur le comportement en flexion du béton de chanvre. On remarque que la résistance en flexion est fortement influencée par le compactage quel que soit le granulat utilisé. Dans le cas des plaques fabriquées avec le granulat CP, la résistance en flexion est doublée lorsque la masse volumique apparente passe de 420 à 500 kg/m³. Pour celles fabriquées avec le granulat CF, la résistance en flexion est multipliée par 4. L'apport du compactage sur les propriétés de résistance en flexion paraît donc plus significatif dans ce cas que pour les propriétés de résistance en compression.

5.4.4. Influence du rapport L/G



(a)



(b)

Figure 5-32 : Influence du rapport L/G sur le comportement en flexion du béton de chanvre. (a) Dans le cas du granulat CP. (b) Dans le cas du granulat CF

Les résultats expérimentaux montrent que la résistance en flexion du béton de chanvre diminue avec le rapport L/G (Figure 5-32). L'explication est identique à celle donnée à

l'influence de ce rapport sur la résistance en compression (cf. § 5.3.4.3). Pour une masse volumique initiale donnée, la diminution du rapport L/G entraîne à une légère augmentation du dosage de granulat. En conséquence, l'éprouvette est plus compactée pour la composition dont le rapport L/G est plus faible.

5.5. Conclusion

En raison de la faible rigidité de la chènevotte, le béton de chanvre possède un comportement mécanique très ductile en compression ainsi qu'en flexion.

D'une manière générale, la résistance en compression $f_{c0,075}$ à 28 jours obtenue dans cette étude varie de 0,2 à 3,6 MPa et la résistance en flexion de 0,06 à 0,6 MPa en fonction du granulat utilisé, du compactage et de la composition. Le module d'Young est encore modeste si on le compare aux autres matériaux de construction puisqu'il est inférieur à 170 MPa.

En ce qui concerne le granulat, on constate que la résistance en compression du béton de chanvre fabriqué avec le granulat CF est plus faible que celui fabriqué avec le granulat CP. Malgré la présence des fibres de chanvre dont la résistance en traction est élevée dans le granulat CF, la résistance en flexion est aussi plus faible pour les éprouvettes fabriquées avec ce granulat. Une porosité inter-granulaire plus élevée que celle du granulat CF couplée à une moins bonne adhérence avec la pâte de la chaux en serait responsable. Il faudrait cependant effectuer des analyses plus détaillées sur l'interaction entre les particules de la chènevotte et la pâte de la chaux pour pouvoir expliquer ce résultat.

Les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre augmentent significativement avec le compactage en réduisant le volume des pores dans le matériau. Notamment la résistance en flexion, elle est doublée lorsque la masse volumique apparente passe qui est de 400 à 500 kg/m³. Mais il faut noter que, dans notre étude, le choix du compactage est à coupler avec le dosage du granulat car plus ce dosage est important, plus le compactage est difficile. On note par exemple qu'à partir d'un dosage de 250 kg/m³, le compactage n'accroît plus de manière significative $f_{c0,015}$ et E.

Le rapport L/G a une grosse influence sur la résistance en compression et aussi bien la résistance en flexion du béton de chanvre. L'étude a montré que plus ce rapport diminue, meilleures sont les caractéristiques. En fait, à masse volumique constante, lorsque L/G augmente, le dosage en granulat diminue. Pourtant, un rapport L/G trop faible n'assure pas d'enrobage minimal des particules de la chènevotte et entraîne de moins bonnes caractéristiques mécaniques. Dans les limites de cette étude, il paraît vraisemblable qu'un optimum de ce rapport se situe autour de 2,15.

L'influence du rapport E/L sur les performances mécaniques en compression de béton de chanvre semble moins significative que celle des autres paramètres. Cela provient sans doute de la particularité d'absorption d'eau du granulat, la diminution du rapport E/L ne conduisant pas à une nette amélioration de la résistance en compression comme dans le cas du béton hydraulique. Cependant, ce rapport présente une influence plus marquée sur le durcissement.

On observe une évolution plus nette au cours du temps de la résistance en compression pour les compositions dont le rapport E/L est important. Remarquons également qu'en atmosphère de conservation à 20°C et 75% HR, l'essentiel de la maturation du béton de chanvre fabriqué avec le Tradical PF70 s'effectue jusqu'au 28^{ème} jour. Au delà de 28 jours, les caractéristiques mécaniques du matériau n'évoluent plus de manière significative.

Chapitre 6. Caractérisation thermique

Dans cette étude la mesure de la conductivité thermique des bétons de chanvre élaborés a été mesurée en utilisant la méthode de la plaque chaude gardée. Des études préalables ont montré que le béton de chanvre présente une faible conductivité thermique (Cérézo, 2005) (Collet, 2007), car la chènevotte a une structure très poreuse. Cependant, le compactage appliqué aux éprouvettes vise à obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques mais diminue cette porosité et risque de compromettre les qualités d'isolation thermique de ce matériau. La partie traitée dans ce chapitre a pour objectif d'évaluer les conséquences du compactage sur l'augmentation de la conductivité thermique du béton de chanvre. Par ailleurs, on s'intéressera également à l'influence d'autres paramètres sur la conductivité thermique tels que les rapports L/G et E/L, l'effet d'orientation des particules de la chènevotte,...

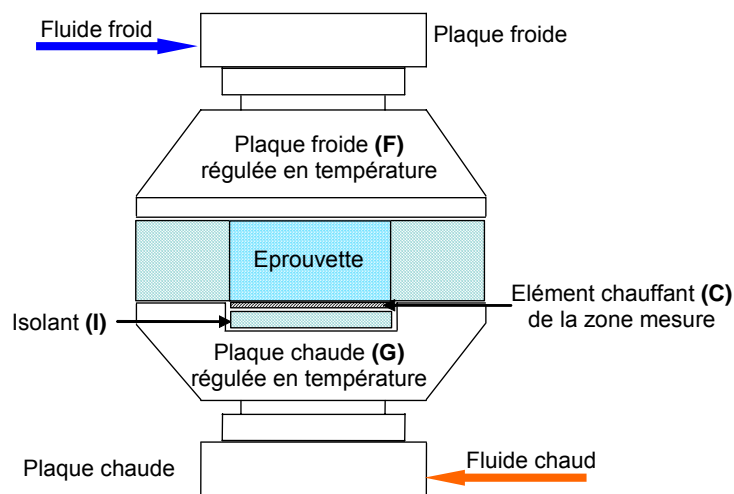
6.1. Mesure de la conductivité thermique

Celle-ci est mesurée en régime stationnaire dans une plage de température proche de 20°C selon la technique de plaque chaude gardée (De Ponte & Klarsfeld, 2002). Le dispositif utilisé a été développé au laboratoire (Carré & Le Gall, 1990), il est illustré sur la Figure 6-1a et b. La cellule de mesure est constituée d'une plaque froide (F), d'un élément chauffant (C), et d'une garde arrière (G). Celle-ci permet de s'assurer que l'intégralité de la puissance dissipée dans l'élément chauffant pénètre dans l'échantillon.

Afin d'assurer une bonne homogénéité des températures, les éléments F et G sont usinés dans du cuivre massif. L'élément chauffant (C) est constitué d'une plaque de cuivre de 2 mm d'épaisseur sur laquelle est collé un film chauffant, il est isolé de la garde arrière par 8 mm d'isolant (I).



(a)



(b)

Figure 6-1 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique (a) et schéma de la cellule de mesure par la méthode de plaque chaude gardée (b)

Ce dispositif expérimental accepte des échantillons parallélépipédiques de 13 cm de côté et d'épaisseur variable. Le flux traversant l'échantillon est mesuré au niveau de l'élément chauffant central de 6×6 cm. Des dimensions latérales de l'échantillon supérieures à celles de l'élément chauffant permettent de limiter l'influence des effets tridimensionnels sur la zone de

mesure, la partie externe de l'échantillon jouant le rôle de garde latérale. Dans le cas contraire une garde latérale est disposée autour de l'échantillon.

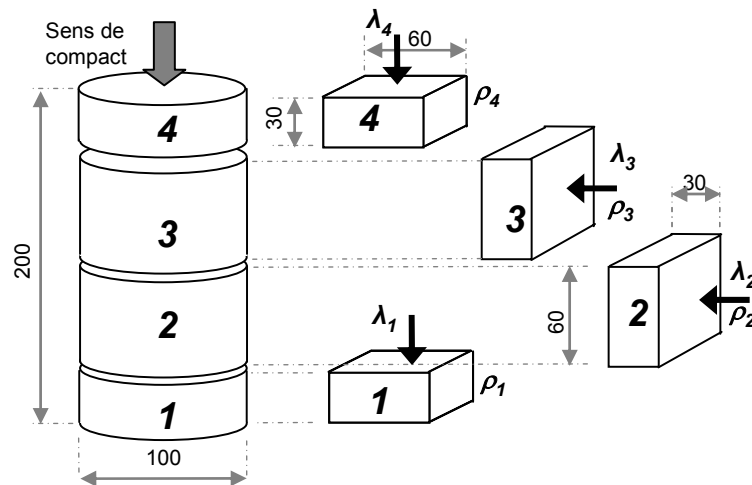


Figure 6-2 : Découpage des échantillons et définition des orientations des mesures de la conductivité thermique

Une modélisation tridimensionnelle des champs de températures dans les échantillons permet de définir les conditions de températures à respecter pour que l'erreur induite par l'approximation du modèle monodimensionnel soit négligeable. De plus les températures des plaques chaude et froide (G et F) encadrent la température ambiante avec une différence de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ respectivement afin de limiter au maximum les échanges avec l'extérieur. C'est-à-dire, environ 25°C pour l'élément chauffant et 15°C pour la plaque froide. Dix thermocouples sont disposés à la surface de la plaque froide (F) et de l'élément chauffant (C) et ils permettent de suivre l'évolution de la température en fonction du temps. La conductivité thermique λ est déduite selon l'expression [5-1]

$$\lambda = -\frac{\Phi/S}{\frac{dT}{dx}} \quad (\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}) \quad [5-1]$$

D'où Φ - quantité de chaleur

S – surface de l'échantillon ($0,0036 \text{ m}^2$)

Il est prévisible que le compactage à la mise en œuvre induise une orientation préférentielle des particules de la chènevotte selon le plan horizontal (perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette) cf. § 4.5. Le découpage des échantillons et la définition des orientations de mesure de la conductivité thermique sont présentés dans la Figure 6-2. La mesure de la conductivité thermique est effectuée selon deux directions :

La direction du compactage (direction axiale ou verticale), cas des échantillons n°1 et n°4 dont la conductivité thermique est respectivement λ_1 et λ_4 . La valeur moyenne de ces deux mesures sera considérée comme la conductivité thermique verticale λ_v , c'est-à-dire selon l'axe du compactage.

Une direction perpendiculaire à la direction de compactage (horizontale), cas des échantillons n°2 et n°3 dont la conductivité thermique est respectivement λ_2 et λ_3 . La valeur moyenne de ces deux mesures sera considérée comme la conductivité thermique horizontale λ_h , c'est-à-dire selon l'axe perpendiculaire au compactage.

Les échantillons préparés sont séchés à 80°C jusqu'à masse constante avant les mesures.

6.2. Influence des paramètres sur la conductivité thermique

6.2.1. Influence de la nature du liant

La Figure 6-3 présente les conductivités thermiques λ_v et λ_h du béton de chanvre fabriqué avec les liants Tradical PF70, NHL 2 et NHL 3,5Z dans le cas de la configuration intermédiaire BBB. Apparemment, il n'y a pas de différence significative entre ces bétons. Ces résultats sont logiques, car la mesure de la conductivité thermique sur les différentes pâtes de liant a montré qu'elles sont sensiblement équivalentes ($0,37 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) pour une masse volumique sèche apparente $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$. La différence peut venir de l'imprécision de la mesure.

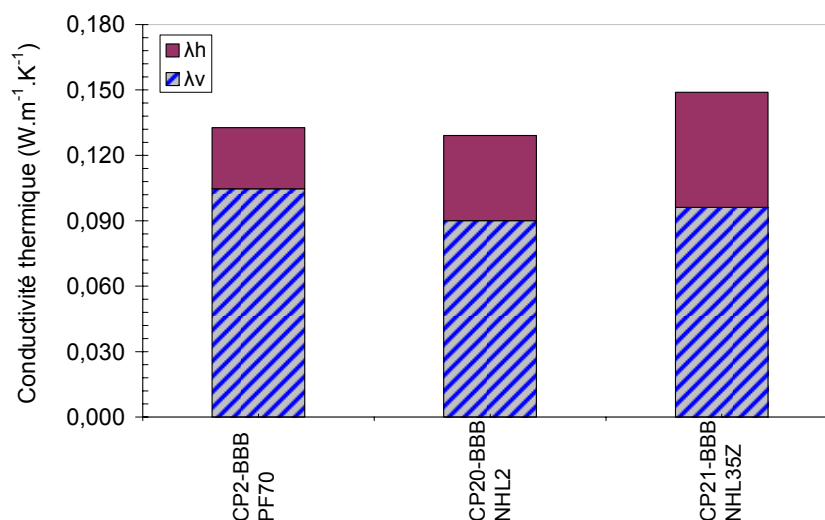


Figure 6-3 : Conductivité thermique du béton de chanvre fabriqué avec différents liants

Par ailleurs, comme nous avons signalé dans le paragraphe § 5.3.1, la résistance en compression augmente nettement avec celle du liant. Donc, il est possible d'améliorer la résistance mécanique du béton de chanvre par un choix judicieux de liant sans sacrifier pour autant sa propriété spécifique d'isolation (Figure 6-4).

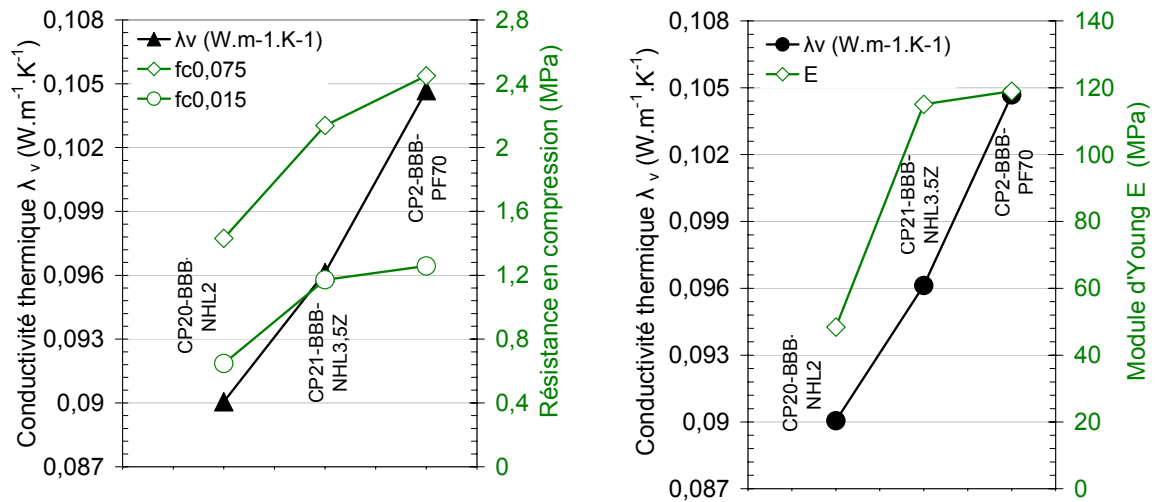


Figure 6-4 : Influence du type de liant sur la résistance en compression et sur la conductivité thermique mesurée dans le sens vertical λ_v pour un matériau dans la configuration intermédiaire.

Rappelons que les résultats présentés dans la suite de ce chapitre sont ceux des bétons de chanvre fabriqués avec le liant Tradical PF70 uniquement.

6.2.2. Influence des fibres

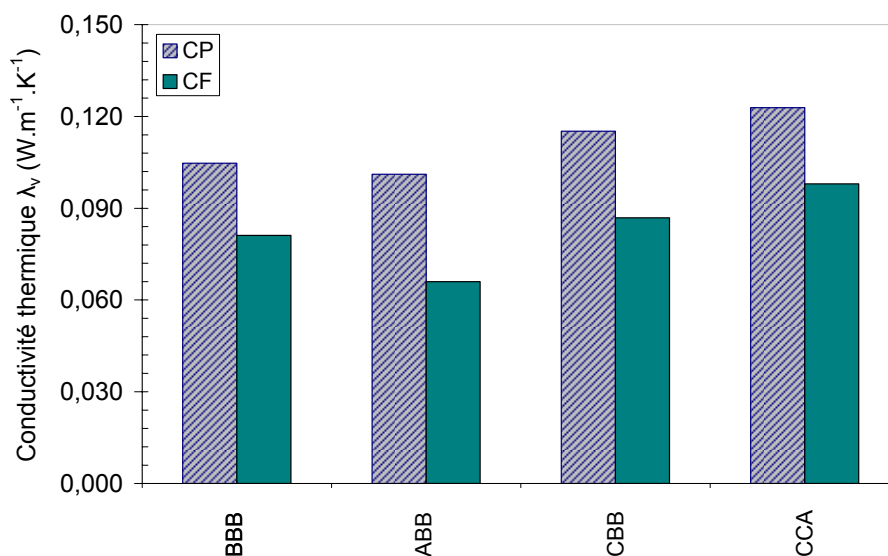


Figure 6-5 : Conductivités thermiques mesurée dans le sens vertical λ_v de certaines configuration de bétons de chanvre confectionnés avec le granulat CP ou CF

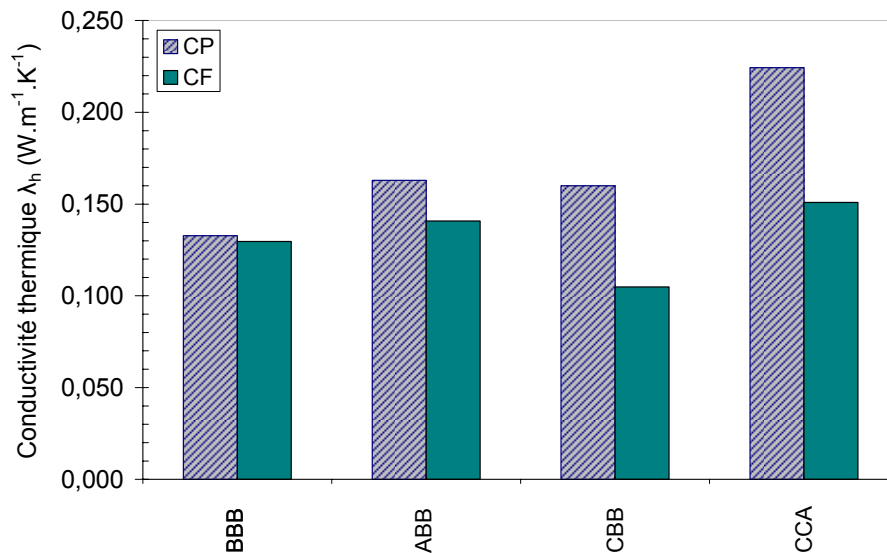


Figure 6-6 : Conductivités thermiques mesurée dans le sens horizontal λ_h de certaines configuration de bétons de chanvre confectionnés avec le granulat CP ou CF

La Figure 6-5 et Figure 6-6 montre quelques comparaisons de la conductivité thermique entre les bétons de chanvre confectionnés avec le granulat CP et le granulat CF. Pour toutes les configurations, la conductivité thermique est plus importante pour les échantillons confectionnés avec le granulat CP que celles avec le granulat CF. Il faut noter que cette constatation est valable pour les deux types de conductivité thermique λ_v et λ_h .

On remarque aussi que l'écart de la conductivité thermique entre les bétons de mêmes configurations élaborées avec chacun des granulats est significatif dans le cas de la configuration ABB dont le dosage en granulats est le plus important dans cette étude.

En effet, la présence des fibres végétales permet au granulat CF d'avoir une porosité inter – granulaire plus grande que celle du granulat CP pour une même masse et un même volume d'échantillon. Cela engendre logiquement une plus faible conductivité thermique des échantillons confectionnés. Cependant, en dehors de ce point, nous ne pouvons pas nous prononcer sur l'influence de la présence des fibres quant au mode de transfert de chaleur par conduction au sein du matériau.

Dans la suite de ce chapitre, nous ne présenterons encore une fois que les résultats obtenus avec les matériaux confectionnés avec le granulat CP, ceux obtenus avec le granulat CF étant résumés en Annexe III.

6.2.3. Influence du compactage

Bien entendu, le compactage augmente la conductivité thermique du béton de chanvre en augmentant sa masse volumique. La Figure 6-7 présente l'influence du compactage sur la conductivité thermique λ_v dans le cas du granulat CP. En général, elle varie de 0,07 à

0,12 W.m⁻¹.K⁻¹ lors que la masse volumique sèche apparente passe de 440 à 730 kg/m³. On remarque que les valeurs obtenues sont assez cohérentes avec celles de Cérézo (2005) qui mesurait des conductivités thermiques comprises entre 0,06 et 0,19 W.m⁻¹.K⁻¹ pour des masses volumiques allant de 200 à 840 kg/m³ (voir Figure 6-8).

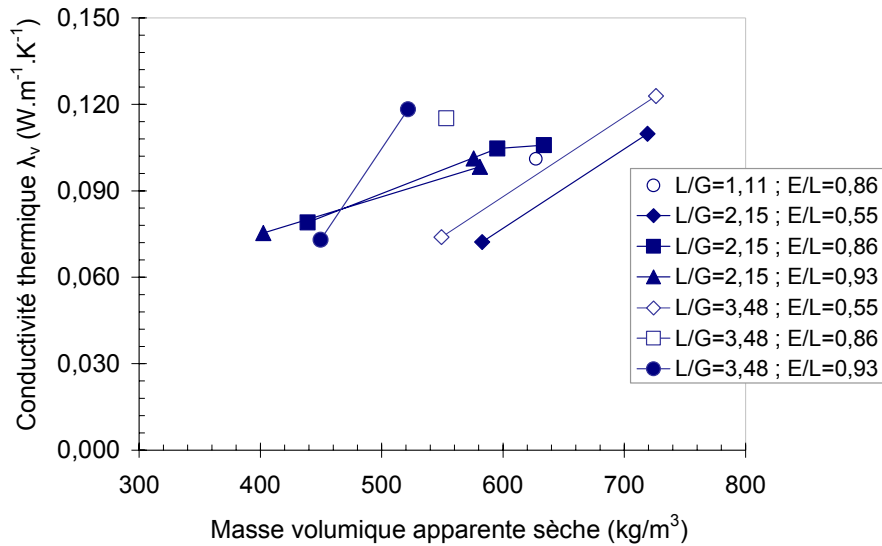


Figure 6-7 : Influence du compactage sur la conductivité thermique du béton de chanvre fabriqué avec le granulats CP

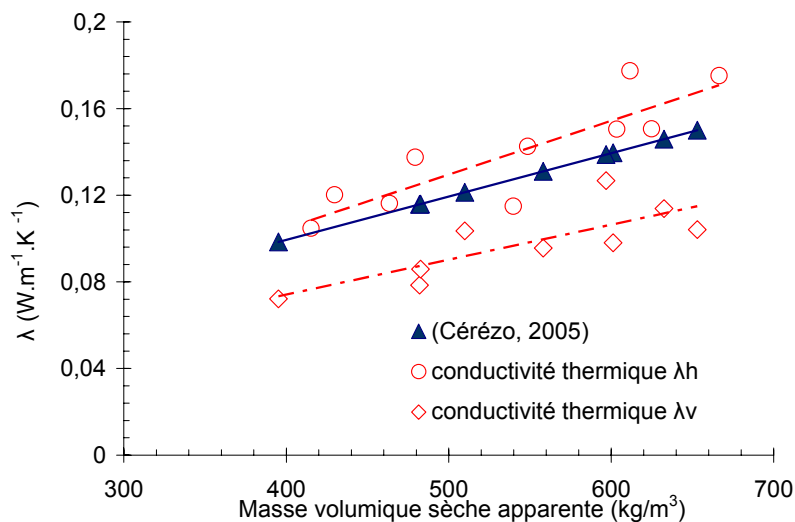


Figure 6-8 : Comparaison des résultats de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche du béton de chanvre

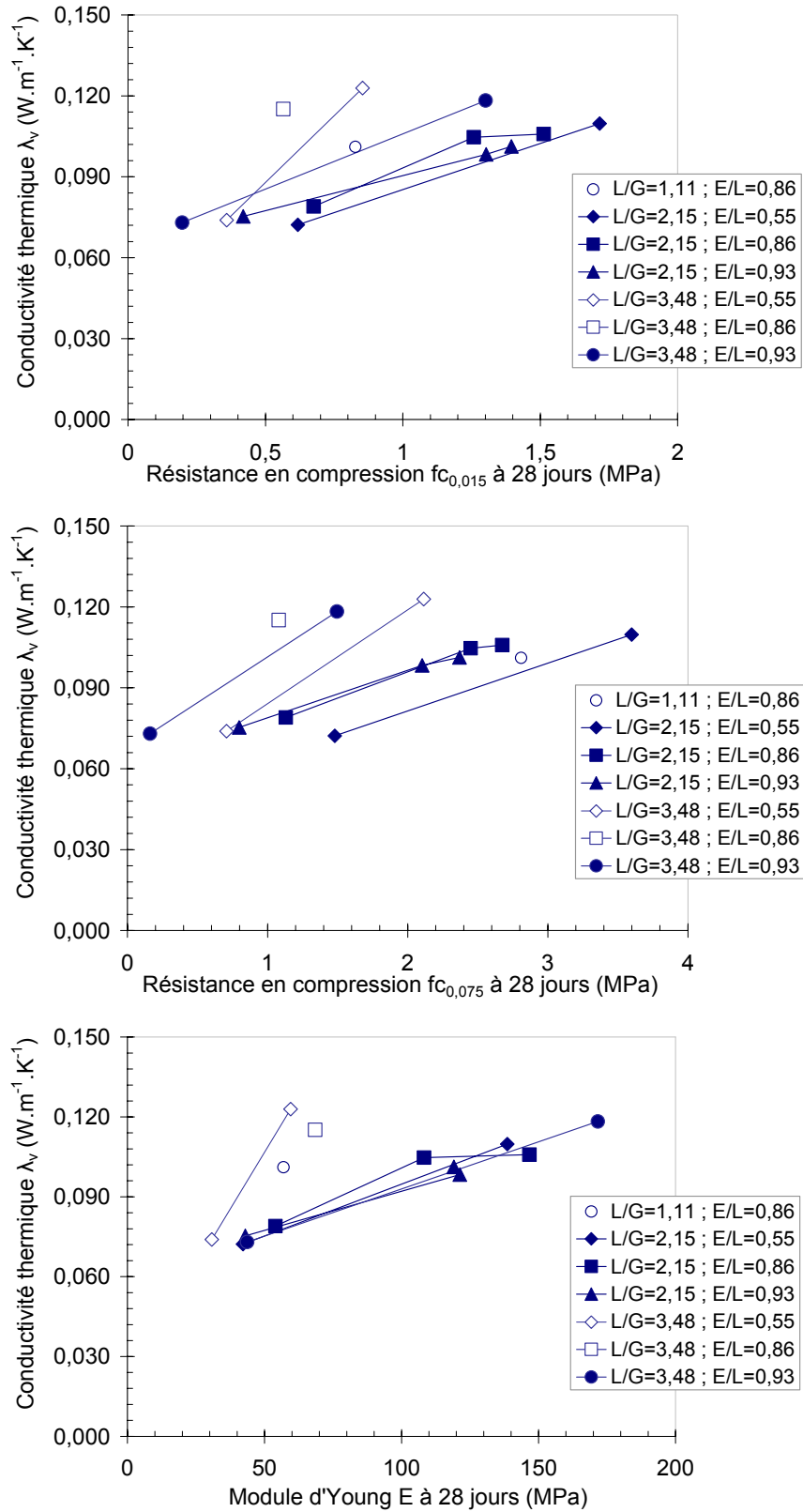


Figure 6-9 : Corrélation entre la conductivité thermique et les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours

On peut aussi remarquer des corrélations entre la conductivité thermique et les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours. Elles sont présentées dans la Figure 6-9.

Globalement, on observe que le compactage engendre des gains de résistance en compression ou de module d'Young qui sont nettement plus importants au regard de l'augmentation de la conductivité thermique du matériau. Les résistances $f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$ sont généralement doublées ou triplées tandis que l'augmentation de conductivité thermique λ_v n'excède pas 40 %. Cette constatation est très importante, elle souligne l'intérêt du compactage sur les performances globales du béton de chanvre utilisé en matériau de construction.

Le compactage améliore significativement les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre mais il ne modifie pas gravement la performance thermique du béton de chanvre.

6.2.4. Influence du rapport L/G

Il semblerait logique que la conductivité thermique du béton de chanvre augmente avec le rapport L/G, puisque l'augmentation de ce rapport entraîne une augmentation du volume du liant, qui est le plus conducteur dans le matériau. Il est à noter que les mesures montrent que la conductivité thermique des liants (Tradical PF70 dans ce cas, cf. § 2.2.2) est beaucoup importante que celle de la chènevotte. Or les résultats obtenus semblent ne pas confirmer une grosse influence de ce rapport sur la conductivité thermique, celle-ci augmentant seulement légèrement avec le rapport L/G (Figure 6-10).

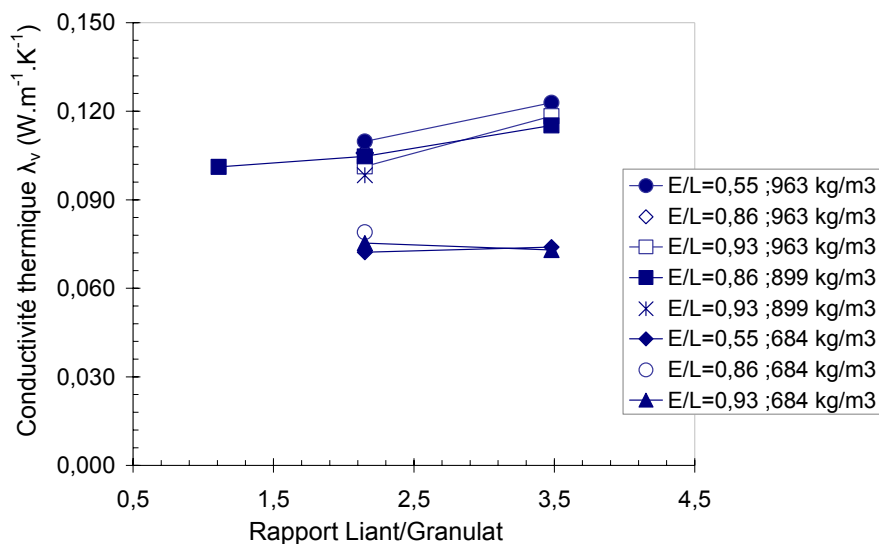


Figure 6-10 : Influence du rapport L/G sur la conductivité thermique du béton de chanvre (cas du granulat CP)

Effectivement, cette légère augmentation provient encore une fois du compactage pour une masse volumique visée : lorsque le rapport L/G diminue, le volume du liant diminue mais le

dosage en granulat augmente. Autrement dit, l'effet de la diminution du rapport L/G sur l'augmentation de la conductivité thermique est compensé en partie par un dosage en granulat plus important, qui nécessite une plus grande compression de celui-ci.

On peut mieux distinguer l'effet de la quantité du liant sur la conductivité thermique dans la Figure 6-11 où l'on observe que plus le dosage en liant est élevé, plus la conductivité thermique du matériau est importante. On remarque une augmentation assez nette de la conductivité thermique en fonction du dosage en liant dans le cas du béton de chanvre fabriqué avec le granulat CF (Annexe III)

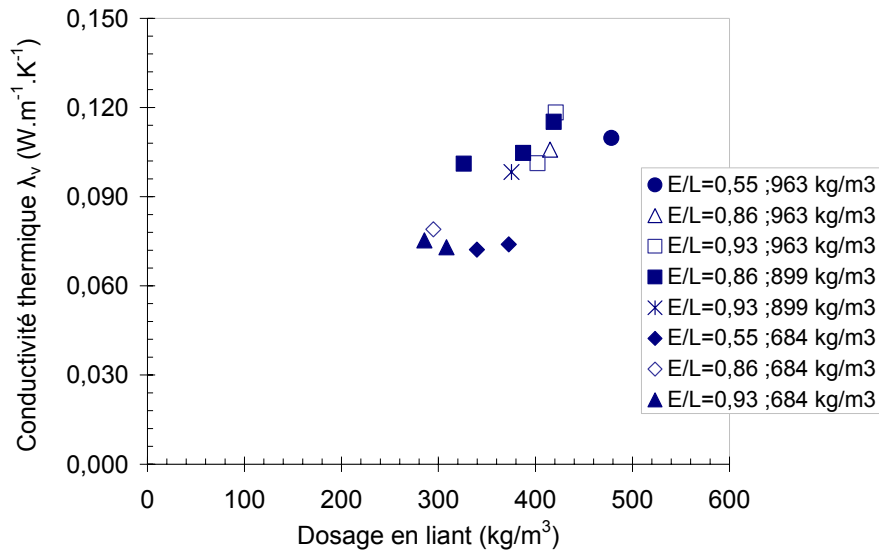


Figure 6-11 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en liant

6.2.5. Influence du rapport E/L

La Figure 6-12 montre l'effet du rapport E/L sur la conductivité thermique λ_v du béton de chanvre. Globalement, elle diminue légèrement avec ce rapport, mais il aurait pu être supposé que la plus grande porosité de la pâte de liant engendré par l'ajout d'eau dans la pâte fasse diminuer significativement la conductivité thermique de la pâte et donc la conductivité thermique globale du matériau. Cependant, les variations engendrées sont moins significatives que celles engendrées par la diminution du compactage, dont la plage de variation est assez importante dans notre étude.

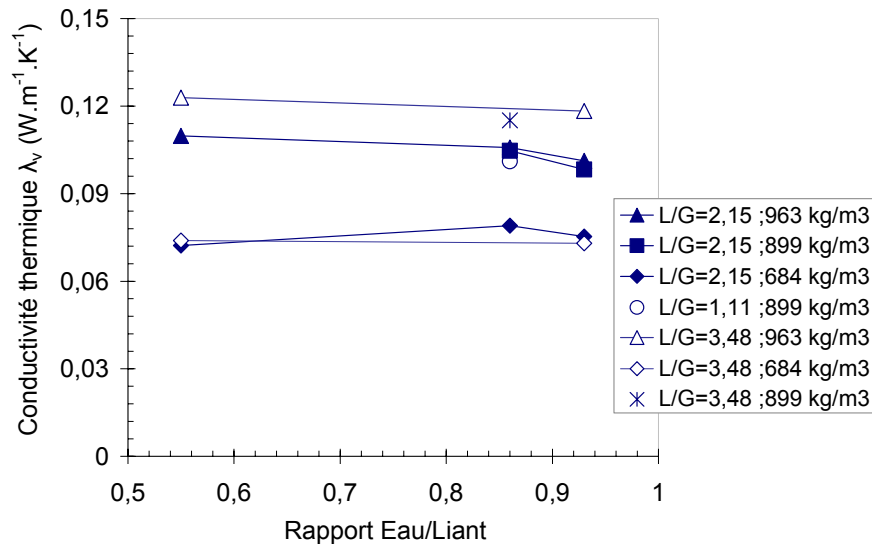


Figure 6-12 : Effet du rapport E/L sur la conductivité thermique des bétons de chanvre confectionnés avec le granulat CP

6.2.6. Anisotropie thermique – Effet d’orientation des particules

Dans le cadre de cette thèse, quelques compositions ont été choisies pour mesurer la conductivité thermique dans deux sens différents : celui vertical (sens de compactage) et celui horizontal (perpendiculaire au sens de compactage). Les résultats sont présentés dans la Figure 6-13 pour les bétons de chanvre fabriqués avec le granulat CP et dans Annexe III pour ceux fabriqués avec le granulat CF.

On observe une nette différence des conductivités thermiques mesurées dans le sens de compactage (λ_v) et dans le sens perpendiculaire au compactage (λ_h). Quel que soit le granulat et le liant utilisé, la conductivité thermique λ_h est toujours plus grande que celle de λ_v , le rapport λ_h / λ_v s’étalant de 1,2 à 1,8 en fonction de la composition.

Cette anisotropie est liée à la géométrie et à la structure capillaire de la chènevotte. En effet, la granulométrie par analyse d’images a révélé la forme allongée de la chènevotte (granulat CP). Les particules de chènevottes sont anisotropes du fait de la structure capillaire de la partie boisée de la tige dont elles sont issues. Dans le bois par exemple, la conductivité thermique longitudinale (parallèle aux capillaires) est plus grande que celle transversale, cette remarque a été vérifiée dans les études de Carré & Le Gall (1990) et de Suleiman *et al.* (1999). À l’échelle d’une particule de chènevotte, la conductivité thermique est donc certainement plus grande dans le sens longitudinal que dans le sens transversal.

Sous l’effet de compactage les particules de chènevotte vont présenter une orientation préférentielle dans le plan horizontal, perpendiculaire au sens du compactage (cf § 5.3). Donc, le béton de chanvre présente généralement une structure stratifiée.

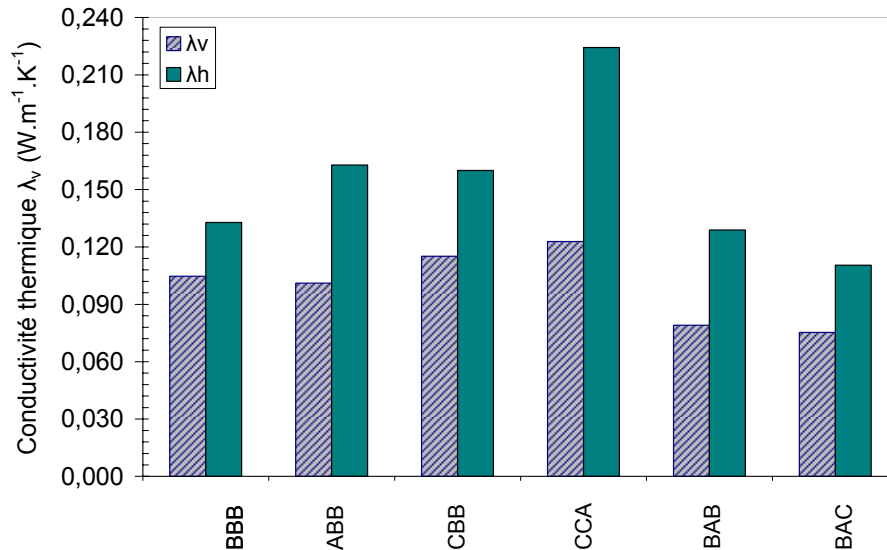


Figure 6-13 : Comparaison entre la conductivité thermique verticale et horizontale dans le cas de bétons de chanvre fabriqués avec le granulat CP.

Cette anisotropie thermique devrait certainement être couplée avec une autre d'ordre mécanique. Il serait extrêmement utile de vérifier la différence entre les caractéristiques mécaniques dans le sens du compactage et celles perpendiculaires au compactage. Cela permettrait d'optimiser l'usage du béton d'éléments préfabriqués par compactage de telle façon à avoir une résistance mécanique aussi grande que possible et une conductivité thermique minimale dans les directions souhaitées.

6.3. Conclusion

Le compactage a une influence sur la conductivité thermique du béton de chanvre mais l'augmentation générée ne présente pas un inconvénient en regard du gain de résistance mécanique induit par ce procédé de mise en œuvre. Pour les autres paramètres tels que les rapports L/G et E/L, l'influence sur la conductivité thermique n'apparaît pas significative.

Les résultats obtenus ont montré des performances thermiques intéressantes, qui sont principalement liées à la structure poreuse du granulat utilisé. Les conductivités thermiques mesurées dans le sens de compactage λ_v sont comprises entre 0,072 et 0,118 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pour une plage de masse volumique sèche apparente s'étalant de 440 à 730 kg/m^3 . Cependant, la conductivité thermique mesurée dans le sens perpendiculaire au compactage λ_h est en moyenne 50 % plus élevée en raison de l'orientation des particules de la chènevotte qui conduit à une structure de type stratifiée.

Cette anisotropie devrait être prise en compte selon l'orientation dans la construction des éléments préfabriqués de béton de chanvre qui sont souvent compactés (bloc, brique,

parpaing). On remarque aussi que la conductivité thermique des matériaux confectionnés avec le granulats CF est un peu plus faible que celle des bétons utilisant le granulats CP.

Conclusions et perspectives

Cette thèse est une contribution à l'étude de l'influence des paramètres de composition et de mise en œuvre de bétons de chanvre sur leurs caractéristiques mécaniques et thermiques.

L'objectif de cette recherche est d'optimiser la formulation et le procédé de réalisation d'éléments préfabriqués pour améliorer la résistance mécanique du matériau. L'idéal serait d'aboutir à la fabrication d'éléments structurels avec une faible conductivité thermique.

La première étape de la formulation consiste à définir les matériaux employés. Il n'existe pas d'outil pour caractériser la chènevotte. Nous avons utilisé, en plus des méthodes de tamisage classique, des méthodes par analyse d'image plus adaptée étant donné la forme allongée et le faible poids des particules pour établir sa granulométrie. Les deux types de granulats employés (chènevotte pure, CP et chènevotte fibrée, CF) ont des tailles comparables, mais la deuxième contient une proportion massique de fibre d'environ 12 %.

Le béton de chanvre possède naturellement des caractéristiques thermiques intéressantes de par la structure poreuse du granulat. La chènevotte, issue de la partie boisée de la tige possède une structure capillaire orientée dans le sens de la tige, qui laisse présager des propriétés (mécaniques et thermiques) anisotropes à l'échelle du granulat. Lors de sa mise en œuvre, elle contribue à une forte capacité d'absorption d'eau (jusqu'à 400%) et une grande déformabilité de la chènevotte. Celle-ci conduit à une porosité très variable selon le compactage du mélange et rend difficile le dosage en pâte de liant et en eau.

Etant donné le nombre important de paramètres intervenant dans la réalisation de béton de chanvre, un plan d'expériences a été établi afin d'obtenir le maximum d'informations avec nombre d'essais limité.

Lors du compactage à la mise en œuvre, la contrainte appliquée au matériau est essentiellement influencée par le dosage en granulat par volume unitaire. Toutefois, cette contrainte a tendance à augmenter lorsque le dosage en eau diminue, et ce quel que soit le type du granulat. Le mélange à l'état frais subi des frottements à la paroi du cylindre qui

s'opposent au mouvement descendant de l'ensemble du matériau. Un gradient de masse volumique le long de l'éprouvette a d'ailleurs été constaté. Le compactage induit également une orientation préférentielle des particules dans le plan perpendiculaire à la direction de compactage. Celle-ci a été observée sur des coupes axiales. Cette orientation préférentielle est plus marquée lorsque le dosage en granulat est important. Elle laisse présager des caractéristiques (mécaniques et thermiques) anisotropes du matériau qui a été compacté lors de sa mise en œuvre.

Le béton de chanvre présente un comportement mécanique très ductile en compression ainsi qu'en flexion. Un comportement élasto-plastique correspondant à une longue phase de densification apparaît souvent avant la rupture. Pour quelques configurations, AAA, ABB, la déformation longitudinale peut atteindre jusqu'à 50% sans rupture visible. Cette propriété de forte déformabilité en ferait d'ailleurs un matériau particulièrement adapté aux constructions en zone fortement sismique.

La nature du liant a une influence sur la résistance en compression du béton de chanvre. Un liant hydraulique comme le ciment n'est pas adapté à un mélange avec la chènevotte qui est fortement déformable et hydrophile. Concernant les chaux, l'ajout de pouzzolane augmente la résistance mécanique au jeune âge.

Globalement, les caractéristiques des granulats employés influencent notablement les caractéristiques mécaniques du béton produit.

Plus taille moyenne des granulats employée est importante, plus les résistances mécaniques augmentent. Dans le cas du granulat fibré CF, la taille moyenne des particules de chènevotte est plus faible que dans le cas du granulat CP. Par ailleurs, la masse volumique spécifique des fibres végétales (1400 kg/m^3) est beaucoup plus élevée que celle des particules de chènevotte (256 kg/m^3). Donc pour une masse volumique visée, le compactage du granulat CF est plus faible et sa porosité inter-granulaire est plus importante. Ces raisons peuvent expliquer les différences observées : les résistances en compression et en flexion ainsi que le module d'Young des éprouvettes confectionnées avec les granulats CF apparaissent plus faibles que celles confectionnées avec le granulat CP. Dans le cas de grandes déformations seulement (supérieures à 20%), les fibres, dont la résistance en traction est élevée, peuvent maintenir la structure de l'éprouvette et inverser cette tendance. L'adhésion de la pâte de chaux aux fibres de chanvres mériterait d'être étudié plus en détail pour en connaître l'avantage.

Le compactage augmente très significativement les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre en réduisant le volume des pores dans le matériau. Cependant, on note par exemple qu'à partir d'un dosage en granulat supérieur 250 kg/m^3 , le compactage n'accroît plus de manière significative les caractéristiques mécaniques. Pourtant, le module d'élasticité du béton de chanvre produit reste encore modeste, la valeur maximale obtenue dans notre étude atteignant 220 MPa.

Le rapport L/G a une influence importante sur les résistances en compression et en flexion. L'étude a montré que plus ce rapport diminue, meilleures sont les caractéristiques. En fait, à masse volumique constante, lorsque L/G diminue, le dosage en granulat augmente. Pourtant,

un rapport L/G trop faible n'assure pas d'enrobage minimal des particules de la chènevotte et entraîne de moins bonnes caractéristiques mécaniques. Dans les limites de cette étude, il paraît vraisemblable qu'un optimum de ce rapport se situe autour de 2,15.

L'étude permet de montrer que les propriétés mécaniques du béton de chanvre sont moins influencées par le rapport E/L que par le rapport L/G ou le compactage. Une évolution plus rapide des résistances mécaniques jusqu'à 28 jours a néanmoins été observée dans le cas des rapports E/L plus important. De manière générale, avec le liant utilisé, les caractéristiques mécaniques du matériau n'évoluent plus de manière significative au delà de 28 jours.

Pour optimiser la résistance mécanique, il faut ajuster le volume de pâte de liant pour que celui-ci remplisse au maximum le volume des vides. De manière générale, la pâte de chaux devrait être en excès lors du compactage. Ensuite, un rapport optimal de E/L est à déterminer. Au dessus de ce rapport, l'eau est en excès pour hydrater la composante hydraulique du liant et entraîne plus de porosité dans la pâte de liant. En dessous de ce rapport, la quantité d'eau rend la contrainte de compactage trop élevée et/ou la quantité d'eau disponible trop faible pour que le liant puisse totalement faire prise. Dans notre étude, cet optimum de rapport E/L apparaît aux alentours de 0,85.

La conductivité thermique est particulièrement influencée par le compactage, le dosage du liant et l'orientation préférentielle des particules. Le compactage appliqué dans notre étude conduit à une augmentation de la conductivité thermique de 50% au maximum. Dans un même temps, la résistance mécanique a été multipliée par facteur compris entre 2 et 3. L'augmentation relative de conductivité thermique est donc bien plus faible que celle de la résistance mécanique. Le procédé de fabrication par compactage permet donc de fabriquer des éléments de structure en béton de chanvre tout en préservant l'intérêt d'isolation thermique d'un tel matériau. Une marge de progression probablement encore importante demeure dans cette voie d'amélioration.

Le procédé par compactage nécessite par contre la prise en compte de l'orientation des particules qui a été produite. Celle-ci conduit à une anisotropie de la conductivité thermique : elle est supérieure d'environ 50% dans le sens perpendiculaire au compactage à celle dans le sens de compactage.

Ce travail de thèse orienté vers les éléments préfabriqués a permis d'approfondir les connaissances sur le béton de chanvre à travers un mode de mise en place précis. Ce matériau possède encore probablement de grandes possibilités d'amélioration en vue de son utilisation pour la construction et l'élargissement de son application en matériau de structure. Nous proposons ici trois axes de réflexion importants pour de futures recherches :

- L'étude de l'influence de l'anisotropie sur les propriétés mécaniques et thermique des éléments préfabriqués du béton de chanvre, en vue d'optimiser la conception et l'orientation des éléments dans la structure.
- L'étude mécanique du matériau à l'état frais durant le compactage, en vue d'optimiser le procédé, et d'étudier les possibles effets d'échelle.

- L'étude de l'interaction physico-chimique, et mécanique aux interfaces entre le liant et la chènevotte, afin de mieux appréhender le comportement mécanique du matériau, et d'évaluer sa durabilité en condition d'utilisation.

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Etude de marché des nouvelles utilisations des fibres végétales, *ADEME Edition*, 2005, 39 p

AFNOR, *Ciments et chaux. Partie 2.2 : Chaux de construction. NF EN 459-2*. Paris: AFNOR, 2003, 548 p

Arnaud L., Mechanical and Thermal properties of Hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches. *In: Bioresource Hemp 2000 & other fibre crops*, 13 – 16 September 2000, Wolfsburg, 10 p

Bevan R., Woolley T., *Hemp lime construction – A guide to building with hemp lime composites*. Building Research Establishment, 2008, 110 p

Bouloc P., Allegret S., Arnaud L., *Le chanvre industriel : production et utilisations*. Paris : France Agricole, 2006, 431 p

Boutin M.P., Flamin C., Quinton S., Gosse G., *Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*. Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2006, 60 p

Bruijn P.B., *Hemp concrete: Mechanical properties using both shives and fibres*. Licentiate Thesis , Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences Alnarp, Swedish University of Agricultural Sciences, 2008, 75 pp

Bruijn P.B., Jeppsson K.H., Sandin K., Nilsson C., Mechanical properties of lime – hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems Engineering*, vol. 103, 2009, pp. 474 – 479

Bütschi P.-Y., *Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction*. Thèse de Génie Civil. Moncton : Département de Génie Civil, Faculté d'ingénieur, Université de Moncton, Canada, Mai 2004, 107 p

Bütschi P.-Y., Deschenaux B., Miao B., et Srivastava N.K., Caractérisation d'une maçonnerie composée d'éléments en aggloméré de chanvre. *Canada Journal of Civil Engineering*, vol. 31, n°3, 2004, pp. 526-529

- Bütschi P.-Y., Miao B., et Srivastava N.K., Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction. In : Bâtir notre civilisation. *Comptes rendus, 31e Congrès annuel de la société canadienne de génie civil*, Moncton, 4 – 7 Juin, Société canadienne de génie civil, Montréal (Québec), pp. 336-1 – 366-6
- Carré P., Le Gall, R., Définition et détermination des conductivités thermiques dans la structures multicouches C.V.R. – balsa. *Revue générale de thermique*, n°340, 1990, pp. 211 – 215
- Cerezo V., *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse Génie Civil. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, 242 p
- Cerny R., Kunca A., Tydlitát V., Drachalova J., Rovnakikova P., Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, vol. 20, 2006, pp. 849 – 857
- Chervalier J., *Analyse du cycle de vie. Application dans le secteur de la construction*. G 5 850, 2009, 11 p
- Collet F., Bart M., Serres L., Miriel J., Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2007, pp. 1271-1280
- Collet F., Comparaison hydrique et thermique de matériaux naturels à des matériaux de construction usuels. *XXXIII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Grenoble 26 -27 Mai 2007, 8 p
- Collet F., *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de Génie Civil à faibles impacts environnementaux*. Thèse Génie Civil. Rennes : Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, décembre 2004, 220 p
- Constatinos A.B., Athina G.G., Elena G., Sevastianos M., Yiannis S., Dimitris P.L., European residential buildings stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment*, vol. 42, 2007, pp. 1298 – 1314
- De Herde., A Evrard., Béton et utilisation rationnelle de l'énergie. *Bulletin de FEBELCEM (Fédération de l'Industrie Cimentière Belge)*, n 35, 2005, 27p
- De Ponte F., Klarsfeld S., *Conductivité thermique des isolants*. R2 930, 2002, 21 p
- Diana Ü.-V., Aleksandra N., Potentials and cost of carbon dioxide mitigation in the world's buildings. *Energy Policy*, vol. 36, 2008, pp. 642 – 661
- Dincer I., Environmental impacts of energy, *Energy Policy*, Vol°27, 1999, pp. 845 – 854.
- Ecole d'Avignon., *Techniques et Pratiques de la chaux*. 2er. Paris : Eyrolles, 2003, 226 p
- Domede N., *Méthode de requalification des ponts en maçonnerie*. Thèse Génie Civil. Toulouse : Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006, 203 p

- Elfordy S., Lucas F., Tancret F., Scudeller Y., Goudet L., Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (« hembrete ») manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 2007, 8 p
- Escadeillas G., Les éco – matériaux dans la construction : Enjeux et perspectives. *Septième édition des journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton*. 19 – 20 Juin, Toulouse, France 2006, pp. 56 - 65
- Evrard A., L'utilisation du chanvre dans la construction. Novembre, 2002, 4 p [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.chanvre-info.ch/info/>> (consulté le 20 Février 2007)
- Association construire en chanvre, *Construire en chanvre : règles professionnelles d'exécution*. Fédération Française du Bâtiment, 2007.
- Fidelius S., Etude de la mise en œuvre du béton de chanvre pour la construction. Rapport du stage de fin d'études. Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB), Université de Bretagne–Sud, 2008, 90 p
- Frachebourg J., *Contribution à l'étude de quelques pouzzolanes naturelles et artificielles en vue de la fabrication des ciments de pouzzolanes*. Thèse Chimie, Lausanne : École polytechnique de l'Université de Lausanne, 1965, 140 p.
- Garcia-jaldon C., Dupeyre D., Vignon M.R., Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment. *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, N° 3, 1998, pp. 251 - 260
- Gonzalez M.J., Navarro J.G., Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of the three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, vol. 41, 2006, pp. 902 – 909
- Hallyday S., *Sustainable construction*. Butterworth Heinemann, 2008, 406 p
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, 27 p
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. European Commission – Integrated Pollution Prevention and Control Bureau, 2001, 127 p
- Karus M., Vogt D., European hemp industry: Cultivation, *Processing and product lines*. *Euphytica*, vol. 140, n°1-2, Janvier 2004, pp. 7 - 12
- Kymalainen H.R., Anna-Maija Sjoberg A.-M., Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, vol 43, 2008, pp 1261-1269
- Lanas J., Perez J.L., Bello M.A., Alvarez J.I., Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortar. *Cement and Concrete Research*, 2004, n°34, pp. 2191 - 2201
- Lawrence R.M.H., Mays T.J., Walker P., D'ayala, D. Determination of carbonation profiles in non – hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. *Thermochimica acta*, vol. 444, 2006, pp. 179 – 189

- Mora C.F., Kwan A.K.H., Chan H.C., Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n°6, 1998, pp. 921 – 932
- Mwaikambo L. Y., Ansell M. P., The determination of porosity and cellulose content of plant fibers by density methods. *Journal of Materials Science Letter 20*, 2001, pp. 2095 – 2096
- Nguyen T.-T., Picandet V., Carre P., Lecompte T., Amziane S., Baley, C., Effet of compactness on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European journal of environmental and civil engineering*, sous press
- Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *European journal of environmental and civil engineering*, Vol 13, n 9, 2009, pp. 1039-1050
- Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. *Orgagec'08-Third European Symposium "Organic materials for construction :Technical and environmental performances"*, 27-29 August 2008, Paris, Marne-la-Vallée (France), 10 p
- Nguyen T.-T. Picandet V., Amziane S., Baley C., Bétons de chanvre : Influence de la compacité et ,des granulats sur les caractéristiques mécaniques. *Congrès GEODIM 2008, variations dimensionnelles des géomatériaux*, 2-3 Avril 2008, IUT Saint Nazaire (France), 8 p
- Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., Optimisation de l'usage du béton de chanvre dans la conception d'un éco-matériau pour le génie civil. *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol°18/2, 2008, pp. 227 - 232
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Environmentally sustainable buildings: Challenges and Policies. *OECD Publishing*, 2003, 196 p
- Outal S., *Quantification par analyse d'images de la granulométrie des roches fragmentées: amelioration de l'extraction morphologique des surfaces, amélioration de la reconstruction stéréologique*. Thèse Techniques et Economie de l'Exploitation du Sous – Sol, Paris. Ecole Nationale Supérieur des Mines de Paris, Juin 2006, 233 p
- Peyratout C.S., Le Troëdec M., Chotard T., Bonnet J.-P., Smith A., Modifications physico-chimiques des interactions entre les fibres de chanvre et la chaux : impacts sur les propriétés mécanique de mortiers. *18^{ème} congrès Français de Mécanique*, 27-31 Août 2007, Grenoble (France), 7 p
- Price L., De La Rue Du Can S., Sinton J., Worrell E., *Sectoral Trends in Global Energy Use and GHG Emissions*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 2006, 74 p
- Rizza M., *Hemp concrete mixtures and mortars, preparations method and uses*. Brevet US 6913644 B2, Juilliet 2005, 11 p
- Sami D., *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimental et modélisation numérique*. Thèse Génie Civil. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008, 284 p

Sedan D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*. Thèse Matériaux Céramiques et Traitement de Surface, Limoge. Université de Limoges, Novembre 2007, 128 p

Sedan D., Pagnoux C., Smith A., Chotard T., Mechanical properties of hemp fibres reinforced cement : Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, n 28, 2008, pp 183-192

Suleiman B.M., Larfeldt J., Leckner B., Gustavsson M., Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology*, vol. 33, 1999, pp. 465-473

Thygesen A., *Properties of hemp fibre polymer composites-An optimisation of fibre properties using novel defibration methods and fibre characterisation*. Department BIO&AFM, The Royal Agricultural and Veterinary University of Denmark, April 2006, 146 p

Trouy-Triboulot M.-C., Triboulot P., *CMatériaux bois – Structure et caractéristiques*. C 925, 2001, 26 p

Zang M.-H., Gjørsv O.E., Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete. *ACI Materials Journal*, 88 (2), 1990, pp 150-158

Zimmermann M., Althaus H.-J., Haas, A., Benchmarks for sustainable construction-A contribution to develop a standard. *Energy and Buildings*, n°37, 2005, pp. 1147-1157

Annexe I. Mesure de la masse volumique des solides et d'une particule de la chènevotte.

1.1. Mesure de la masse volumique des solides

La masse volumique solide des granulats a été mesurée par la méthode pycnométrique. Les échantillons des granulats sont tout d'abord séchés en étuve à une température de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse. Ensuite, ils sont placés dans un pycnomètre de volume connu (600 cm^3) qui est rempli d'eau distillée. Le pycnomètre est ensuite régulièrement agité pour que l'eau remplisse tous les pores de l'échantillon. Expérimentalement, après de 5 à 7 jours on obtient une stabilisation de la masse de l'ensemble.

On pèse :

- m_1 : masse du pycnomètre
- m_2 : masse du pycnomètre et de l'eau distillée
- m_3 : masse du pycnomètre et de l'échantillon

- m_4 : masse du pycnomètre et de l'échantillon et de l'eau distillée

On en déduit :

— la masse de l'échantillon :

$$m_s = m_3 - m_1$$

— la masse de l'eau distillée dans le pycnomètre :

$$m_{ep} = m_2 - m_1$$

— le volume du pycnomètre :

$$V_p = m_e / \rho_e = (m_2 - m_1) / \rho_e$$

D'où ρ_e est la masse volumique de l'eau distillée (1000 kg/m³)

— la masse d'eau distillée présente dans les vides dans m_4 :

$$m_{ev} = m_4 - m_3$$

— le volume de l'eau dans m_4 :

$$V_v = m_{ev} / \rho_e = (m_4 - m_3) / \rho_e$$

— le volume solide de l'échantillon :

$$V_s = V_p - V_v = (m_2 - m_1 - m_4 + m_3) / \rho_e$$

— la masse volumique du solide composant le granulat :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \rho_e \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Les pesées ont été réalisées avec une balance de capacité 1 kg et d'une précision de 0,1 g. Pour chacun des granulats, trois échantillons de l'ordre de 20g ont été effectués. La masse volumique des granulats prise en compte est donc la moyenne de trois mesures.

1.2. Mesure de la masse volumique d'une particule du chanvre

La mesure de la masse volumique d'une particule du chanvre est effectuée sur les échantillons découpés à partir d'une tige du chanvre. Ces échantillons ont la forme d'un cylindre creusé (*Figure AI-1*) et leurs dimensions (hauteur, aire aux deux extrémités) sont mesurées en utilisant une loupe Trinoculaire équipée du logiciel IM5000 de Leica. Ce logiciel permet de déterminer avec précision l'aire aux deux extrémités de l'échantillon.

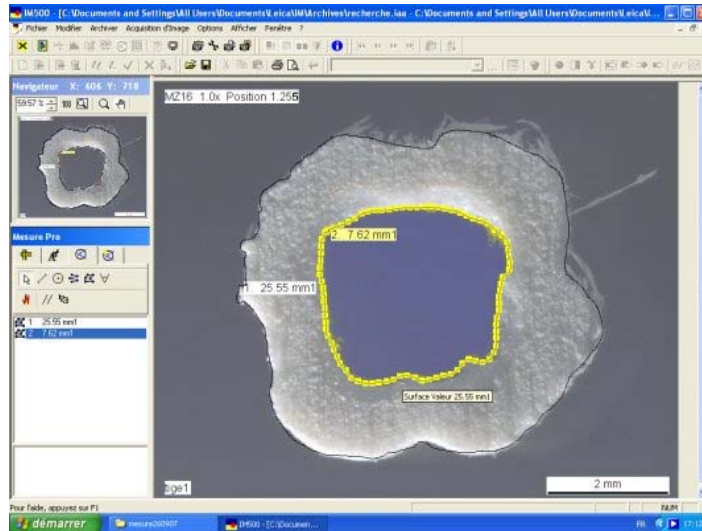


Figure I- 1 : Surface transversale et détermination de l'aire d'un échantillon

En supposant que de la hauteur d'un échantillon est H, que les aires à ses deux extrémités sont respectivement S_1 et S_2 et que sa masse sèche est M, sa masse volumique est facilement calculable selon la formule :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

D'où ρ – masse volumique de l'échantillon

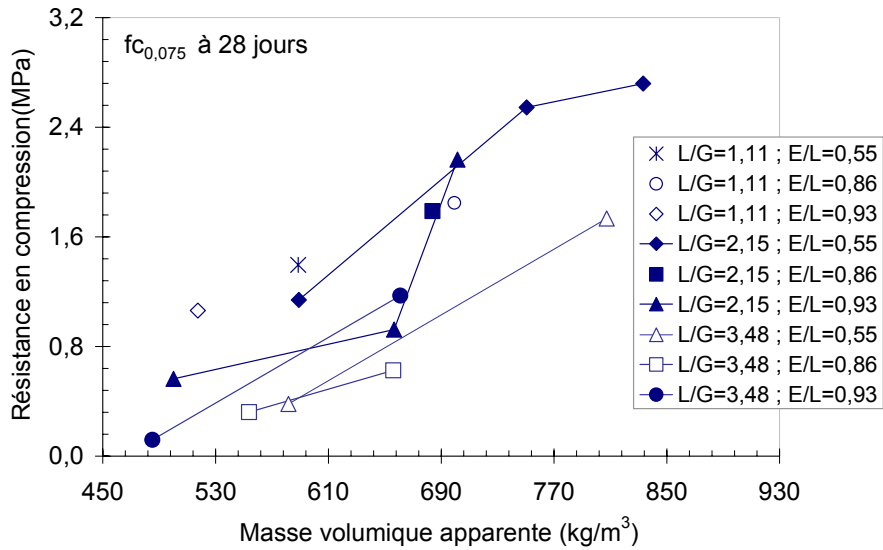
V – volume de l'échantillon. il est calculé à partir des dimensions.

Une vingtaine d'échantillons ont été mesurés et la masse volumique d'une particule a été définie comme la valeur moyenne de ces résultats.

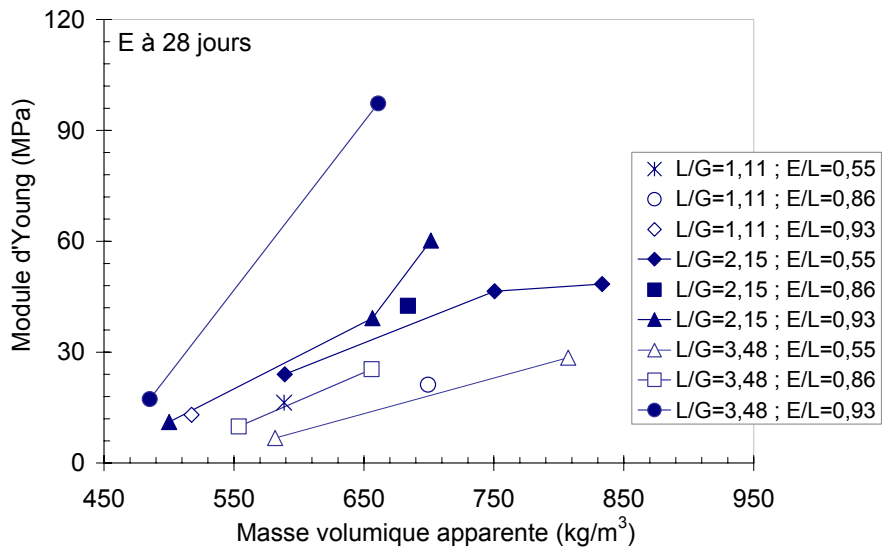
Annexe II. Influence des paramètres sur les caractéristiques mécaniques (granulat CF)

La présente annexe donne les graphiques qui s'agissent l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre confectionné avec le granulat fibré (CF). Les constatations sur ces influences sont les mêmes avec celles dans le cas du béton de chanvre fabriqué avec le granulat CP (§4.3).

II.1. Influence du compactage

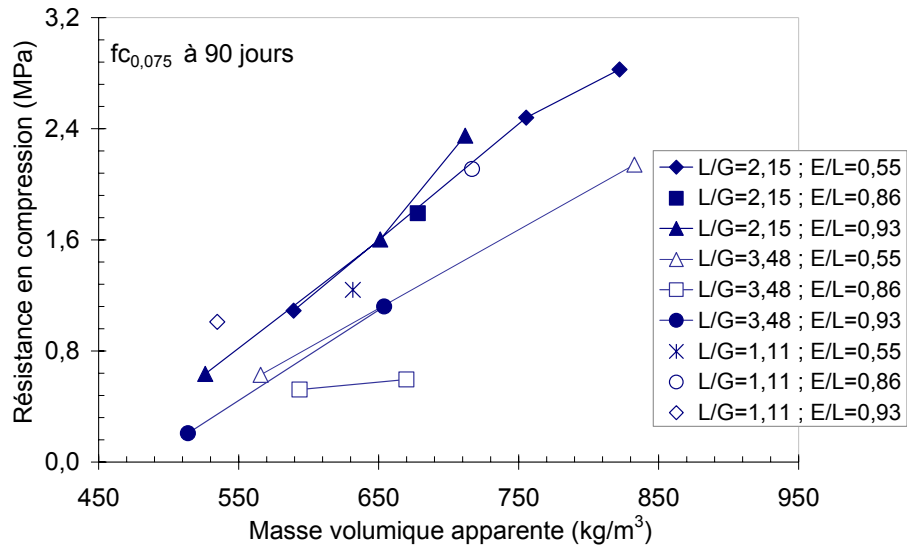


(a)

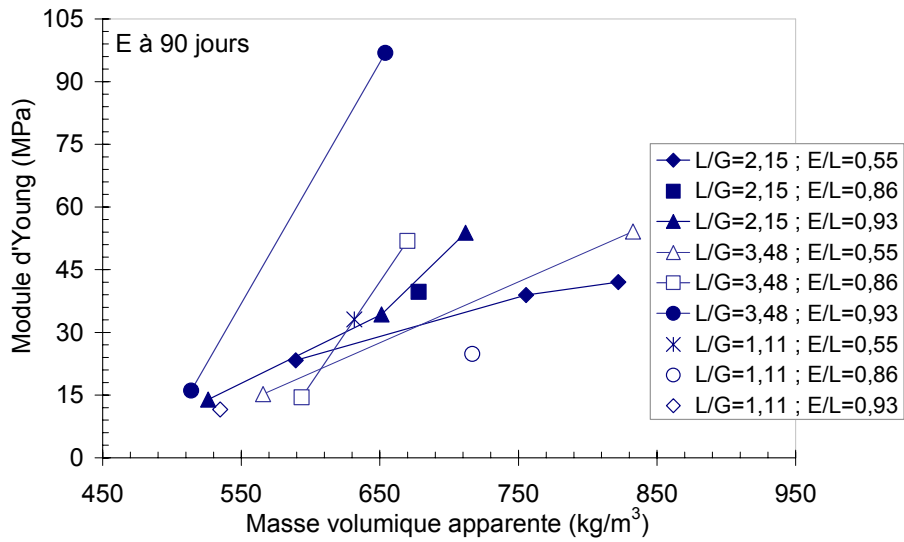


(b)

Figure II- 1 : Influence du compactage sur la résistance en compression $fc_{0,075}$ (a) et module d'Young (b) à 28 jours du béton de chanvre confectionné avec le granulats CF



(a)



(b)

Figure II- 2 : Influence du compactage sur la résistance en compression $fc_{0,075}$ (a) et module d'Young (b) à 90 jours du béton de chanvre confectionné avec le granulats CF

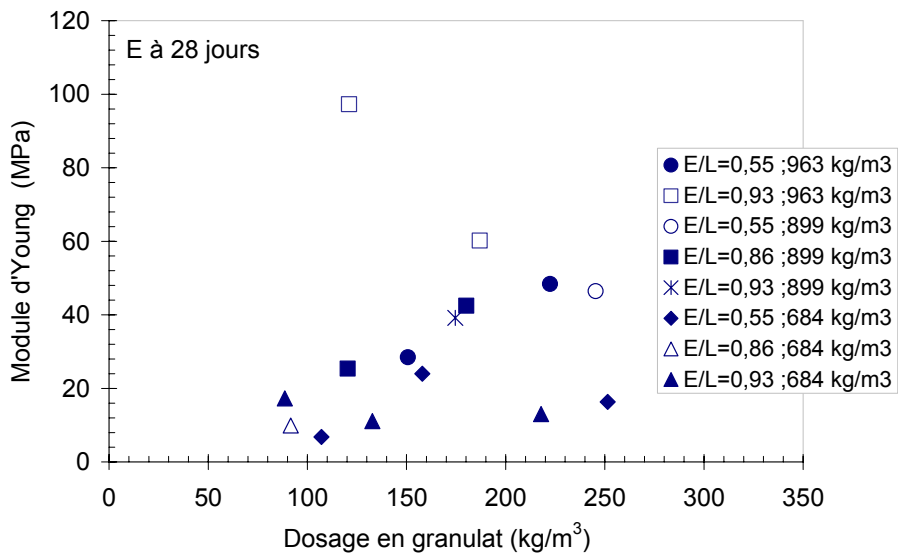
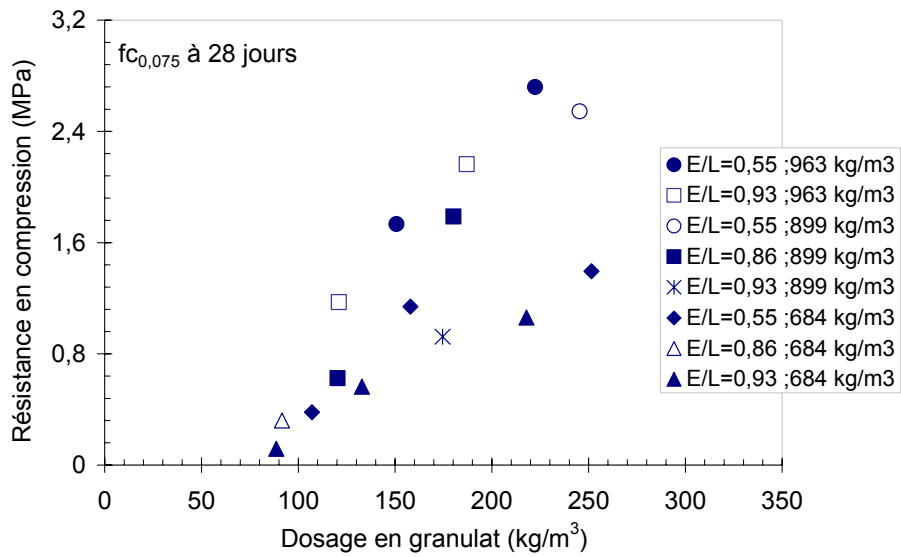
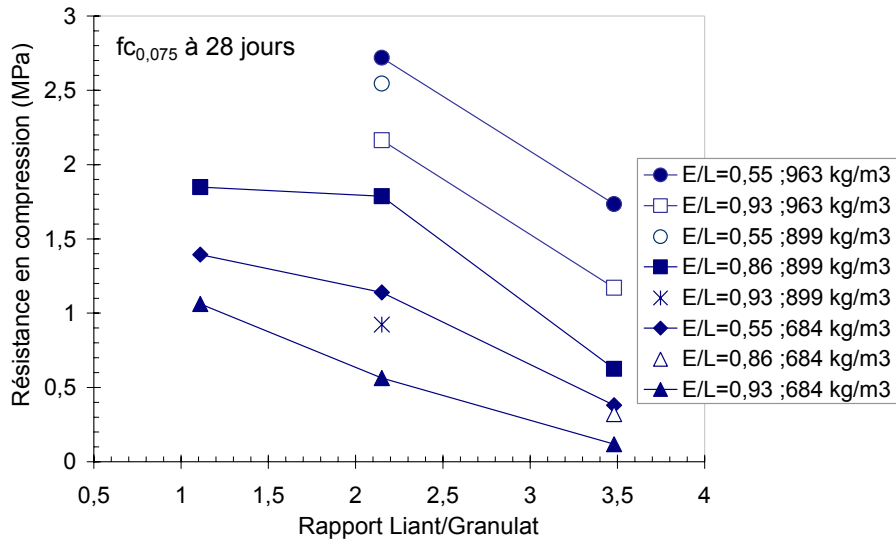
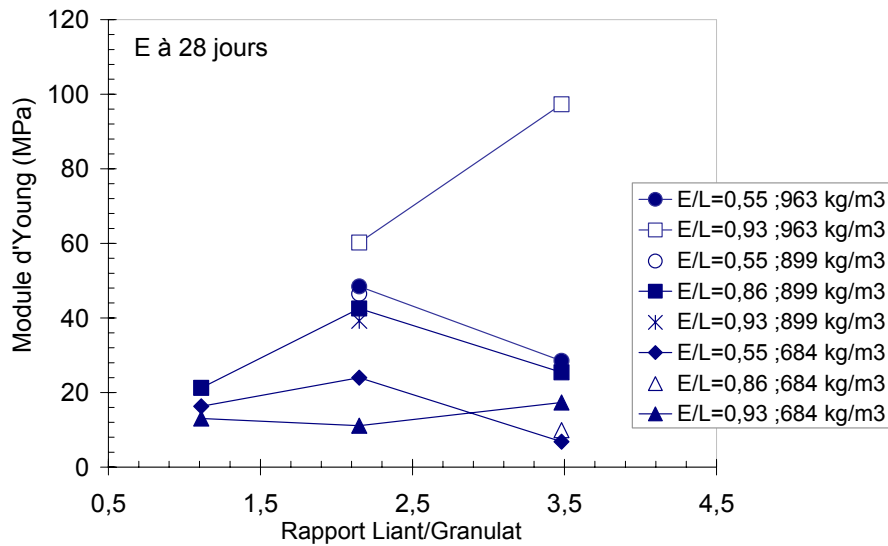


Figure II- 3 : Evolution des caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours en fonction du dosage en chènevotte

II.2. Influence du rapport L/G

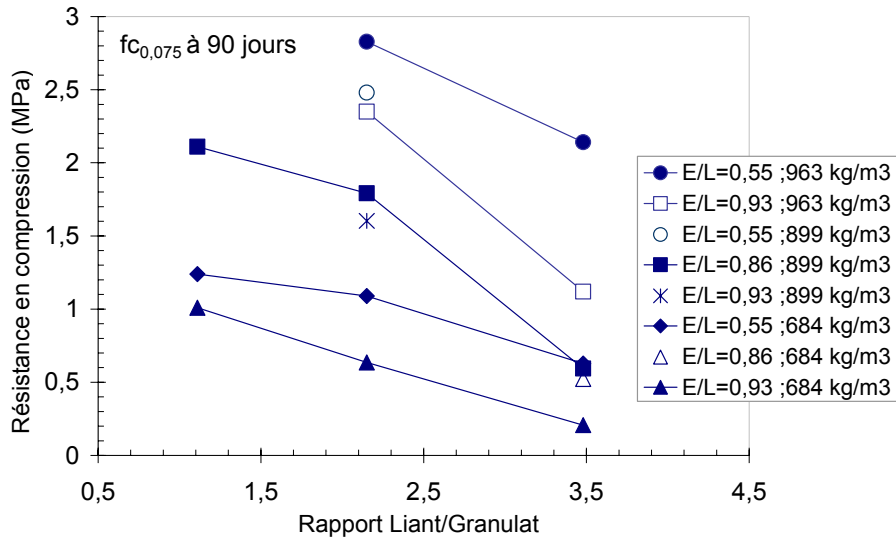


(a)

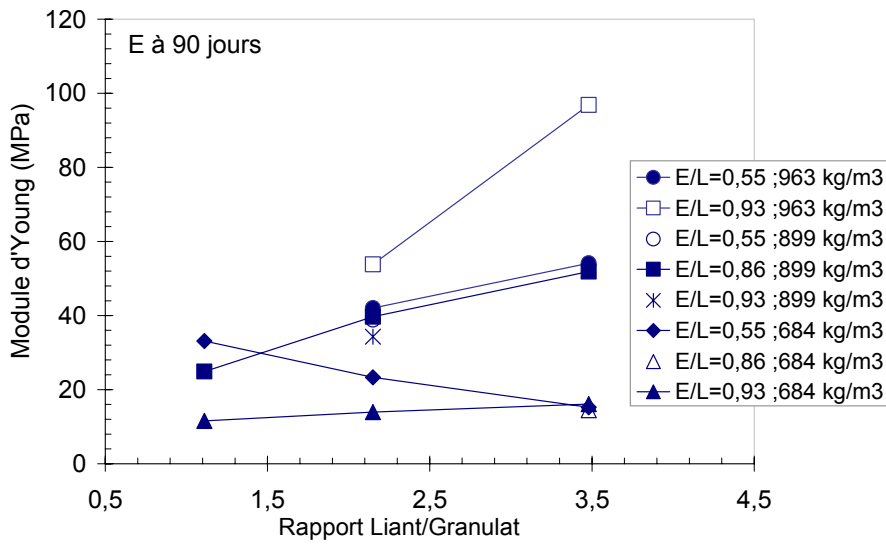


(b)

Figure II- 4 : Influence du rapport L/G sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours :(a) la résistance en compression $f_{c0,075}$, (b) le module d'Young



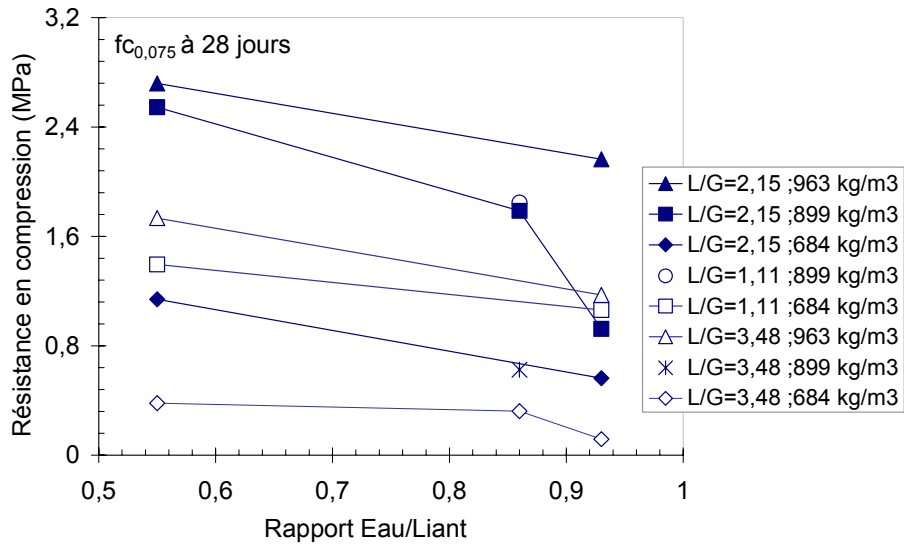
(a)



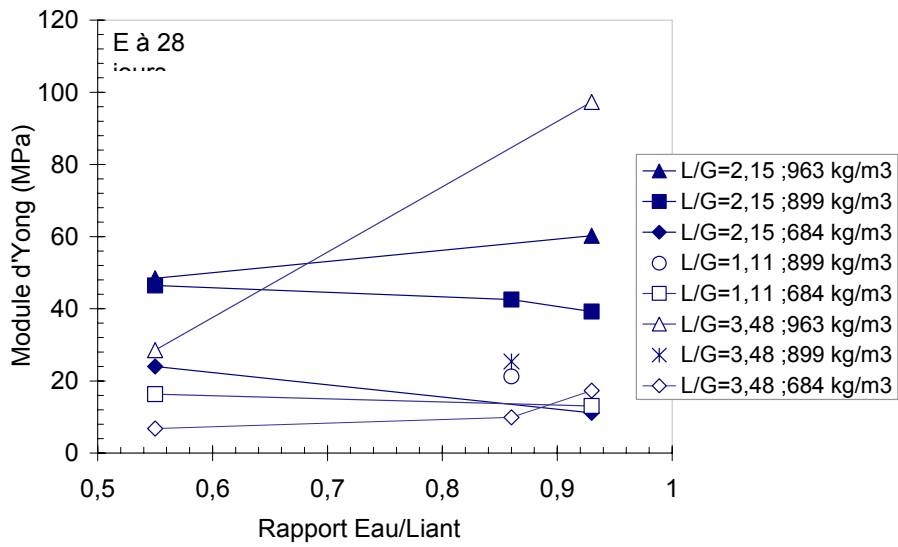
(b)

Figure II- 5 : Influence du rapport L/G sur les caractéristiques mécaniques en compression à 90 jours : (a) la résistance en compression $f_{c0,075}$, (b) le module d'Young

II.3. Influence du rapport E/L

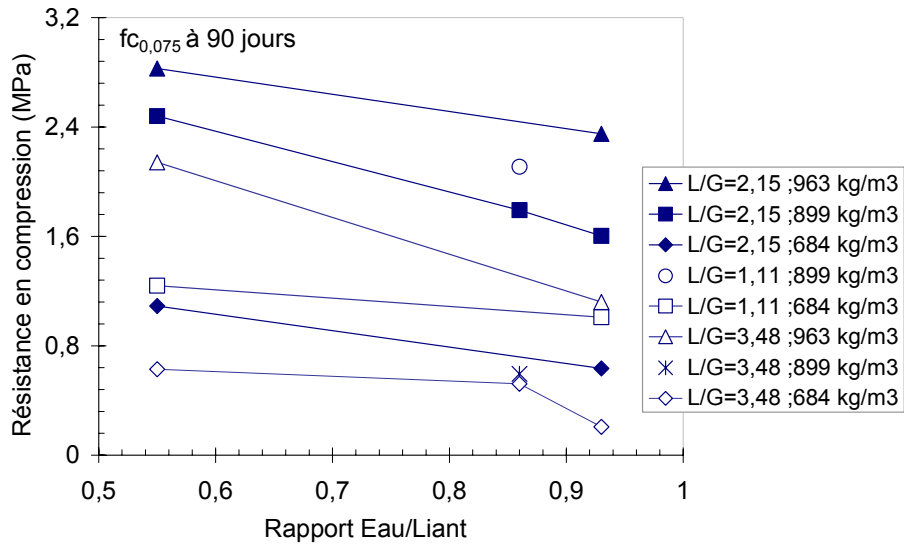


(a)

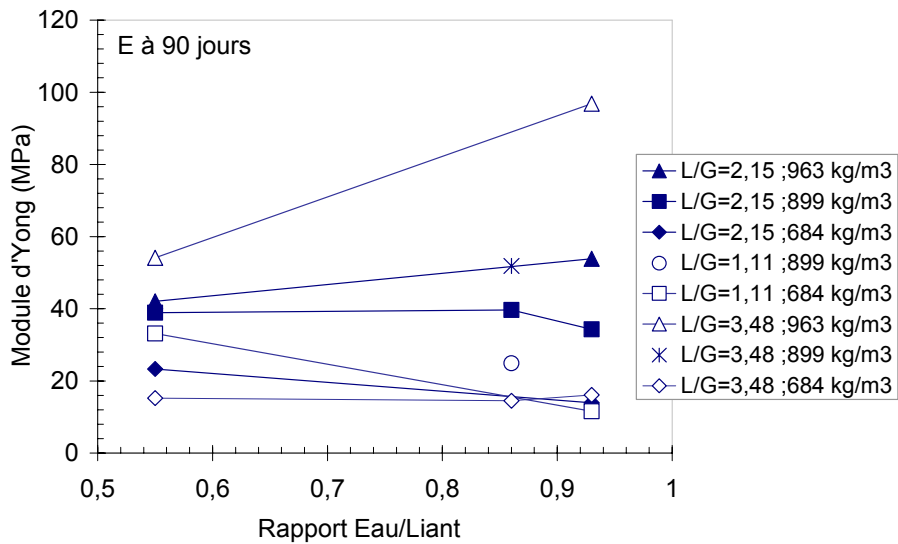


(b)

Figure II- 6 : Influence du rapport E/L sur les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours : (a) la résistance en compression $f_{c0,075}$, (b) le module d'Yong



(a)



(b)

Figure II- 7 : Influence du rapport E/L sur les caractéristiques mécaniques en compression à 90 jours : (a) la résistance en compression $fc_{0,075}$, (b) le module d'Young

II.4. Evolution des caractéristiques mécaniques en compression en fonction du temps

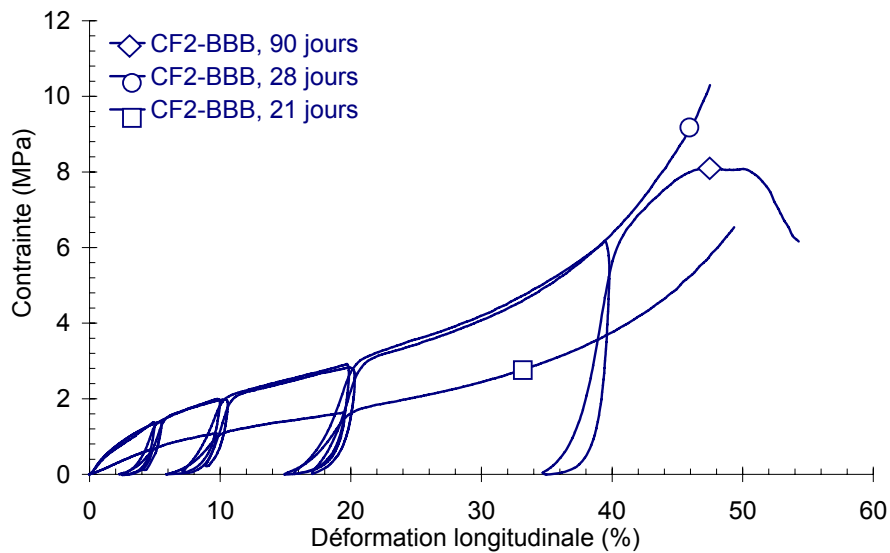


Figure II- 8 : Comportement en compression du béton de chanvre à différents âges

N°	Configuration	Liant	Résistance en compression $f_{c,0,015}$ (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		0,193	0,220	0,175
2	BBB	—	0,204	0,629	0,603	
3	BBA	—		0,717	0,700	
4	BBC	—		0,589	0,547	0,882
5	ABB	—		0,296	0,238	
6	CBB	—		0,313	0,298	
9	CCC	—		0,828	0,742	
10	BAA	—		0,361	0,290	
11	BAC	—		0,194	0,205	
12	BCA	—		0,840	0,850	
13	BCC	—		0,882	0,800	
14	AAC	—		0,128	0,123	
15	CAB	—		0,143	0,155	
16	CAA	—		0,119	0,245	
17	CAC	—		0,080	0,259	
18	CCA	—		0,455	0,737	

Tableau II- 1 : Evolution de la résistance $f_{c,0,015}$ des différentes configuration de béton de chanvre fabriquées avec le granulat CF

N°	Configuration	Liant	Résistance en compression $f_{c0,075}$ (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		1,395	1,240	1,345
2	BBB	—	0,935	1,787	1,792	
3	BBA	—		2,545	2,480	
4	BBC	—		0,924	1,603	2,222
5	ABB	—		1,848	2,110	
6	CBB	—		0,625	0,595	
9	CCC	—		1,172	1,120	
10	BAA	—		1,140	1,090	
11	BAC	—		0,563	0,635	
12	BCA	—		2,719	2,828	
13	BCC	—		2,164	2,350	
14	AAC	—		1,062	1,010	
15	CAB	—		0,321	0,522	
16	CAA	—		0,380	0,629	
17	CAC	—		0,118	0,208	
18	CCA	—		1,734	2,141	

Tableau II- 2 : Evolution de la résistance $f_{c0,075}$ des différentes configuration de béton de chanvre fabriquées avec le granulat CF

N°	Configuration	Liant	Module d'Young E (MPa)			
			21 j	28 j	90 j	180 j
1	AAA	Tradical PF70		16,315	33,120	26,905
2	BBB	—	14,854	42,521	39,683	
3	BBA	—		46,466	38,924	
4	BBC	—		39,214	34,312	56,462
5	ABB	—		21,214	24,875	
6	CBB	—		25,393	51,873	
9	CCC	—		97,298	96,870	
10	BAA	—		24,019	23,310	
11	BAC	—		11,106	13,951	
12	BCA	—		48,442	42,040	
13	BCC	—		60,211	53,845	
14	AAC	—		13,042	11,568	38,671
15	CAB	—		9,913	14,474	
16	CAA	—		6,799	15,223	
17	CAC	—		17,322	16,100	
18	CCA	—		28,519	54,119	

Tableau II- 3 : Evolution du module d'Young des différentes configurations de béton de chanvre fabriquées avec le granulat CF

Annexe III. Influence des paramètres sur la conductivité thermique (granulat CF)

La présente annexe donne les graphiques qui s'agissent l'influence des différents paramètres sur la conductivité thermique du béton de chanvre confectionné avec le granulat fibré (CF). Les constatations sur ces influences sont les mêmes avec celles dans le cas du béton de chanvre fabriqué avec le granulat CP (§5.2).

III.1. Influence du compactage

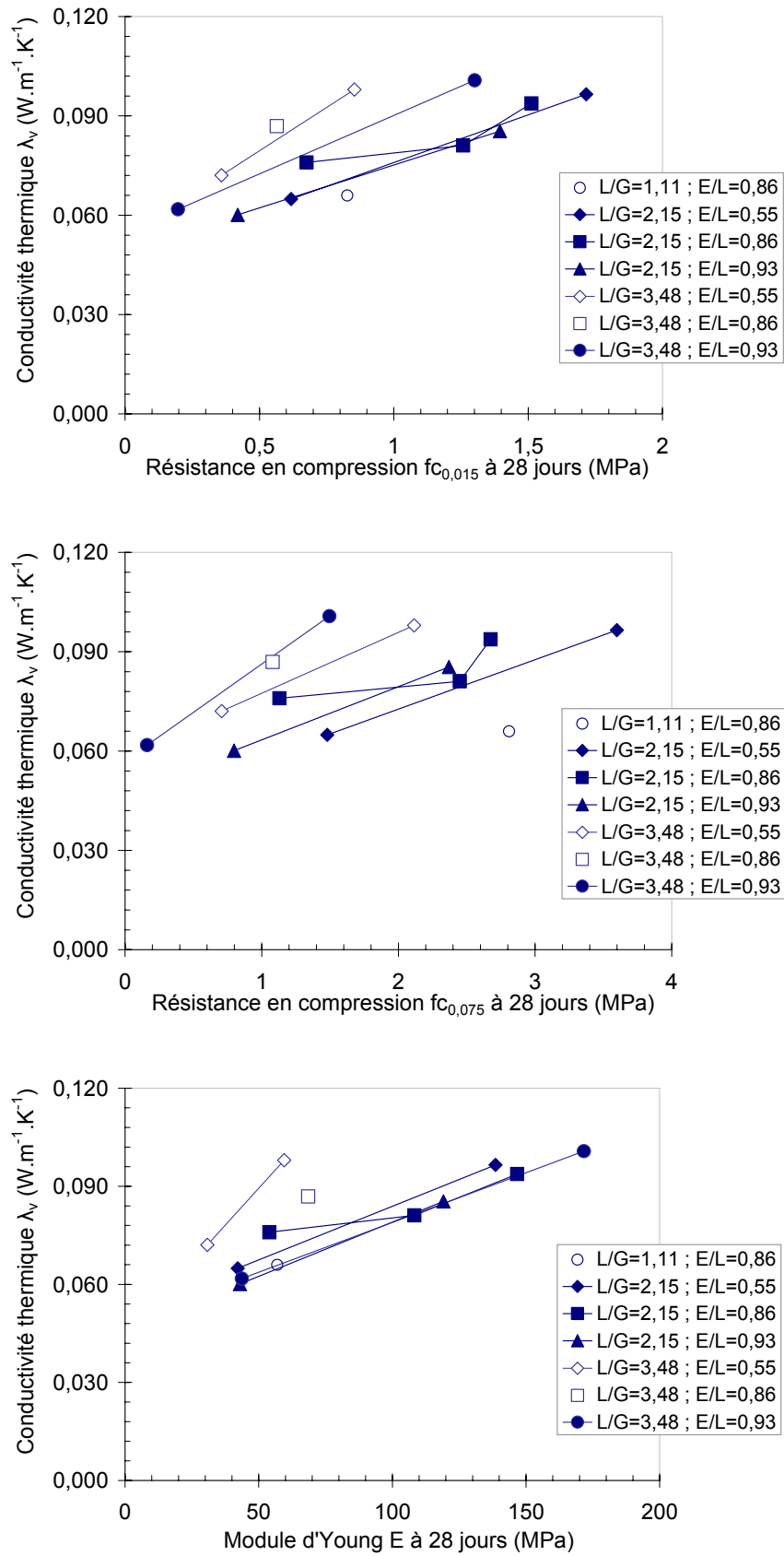


Figure III- 1 : Corrélation entre la conductivité thermique et les caractéristiques mécaniques en compression à 28 jours

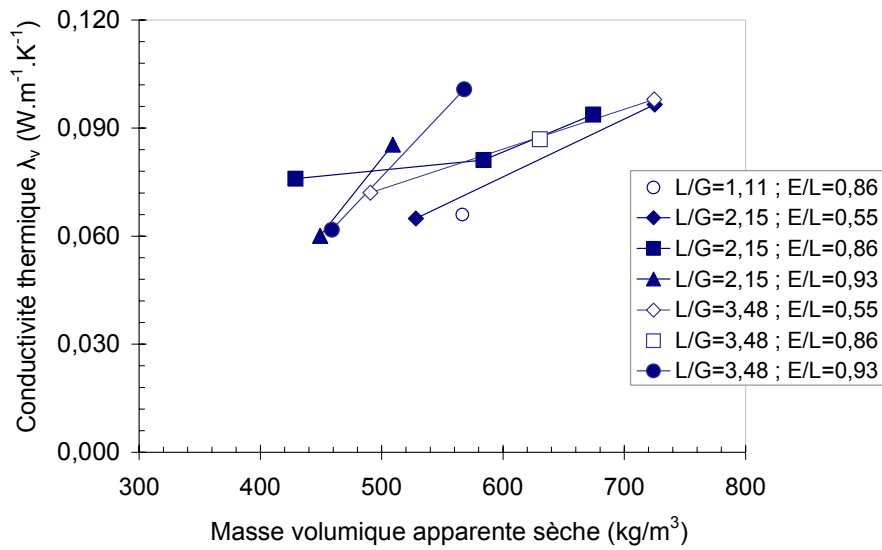


Figure III- 2 : Influence du compactage sur la conductivité thermique du béton de chanvre fabriqué avec le granulats CF

III.2. Influence du rapport L/G

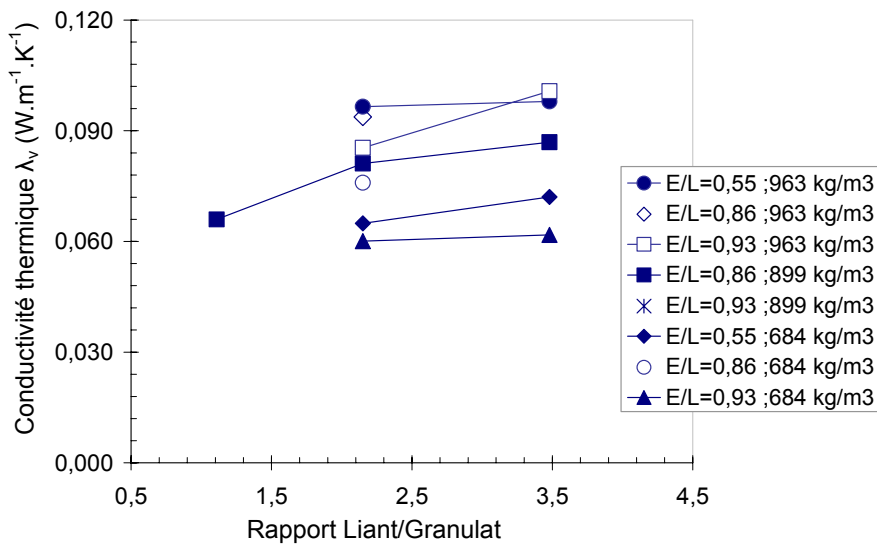


Figure III- 3 : Influence du rapport L/G sur la conductivité thermique du béton de chanvre (cas du granulats CF)

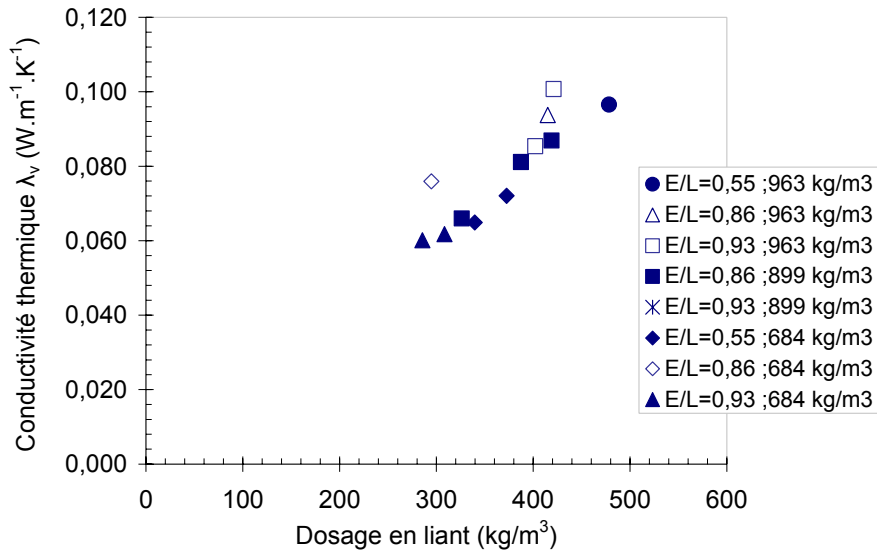


Figure III- 4 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en liant

III.3. Influence du rapport E/L

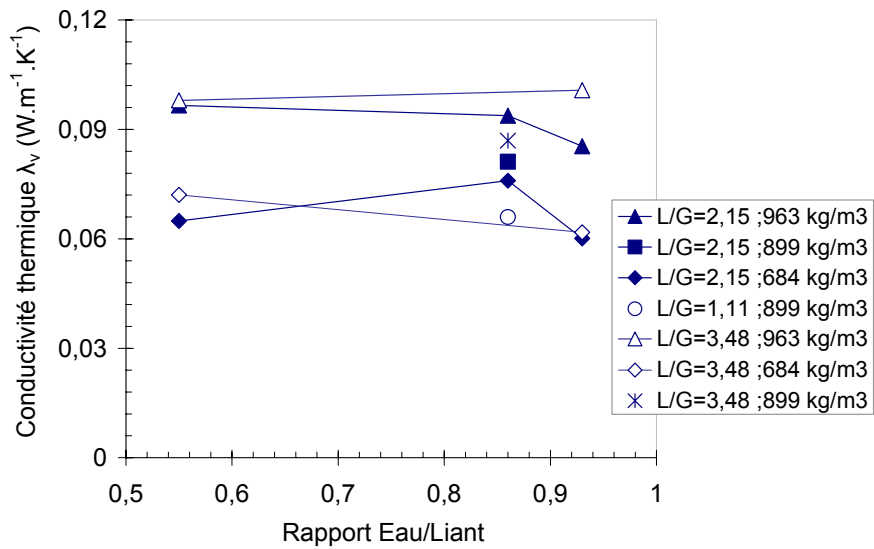


Figure III- 5 : Effet du rapport E/L sur la conductivité thermique des bétons de chanvre confectionnés avec le granulat CF

III.4. Anisotropie thermique- Effet d'orientation des particules

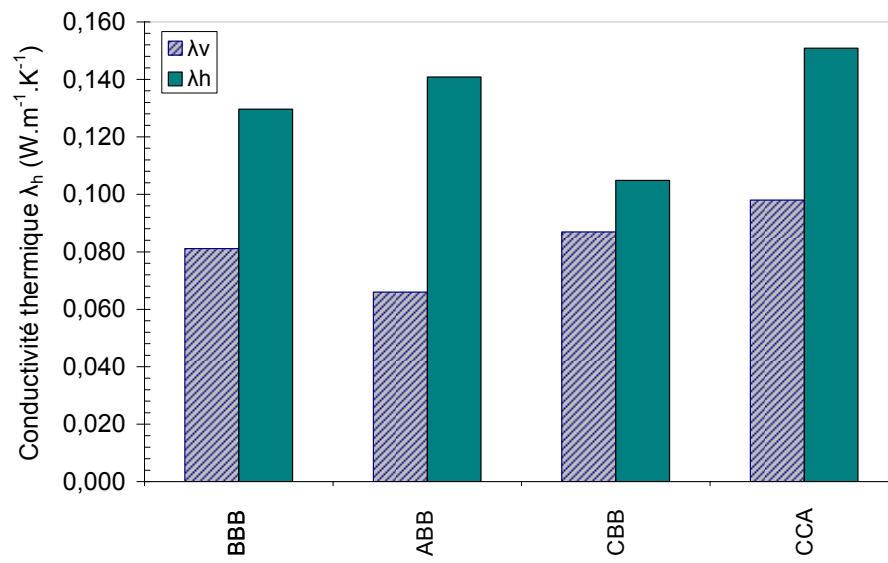


Figure III- 6 : Comparaison entre la conductivité thermique verticale et horizontale dans le cas de bétons de chanvre fabriqués avec le granulat CP.

Abstract

Contribution to the study of mix design and process of pre-cast building elements made of hemp concrete

The awareness of environmental impact of building leads to focus on green or alternative materials. In such context, the hemp concrete (mix of lime and hemp) has many assets. However, in spite of great current demands on the market, it is still made using traditional or empirical methods, and his mechanical strength is still relatively weak, in comparison of usual building construction.

In the present study, the use of hemp concrete is imagined to make pre-cast building elements which have a structural or load-bearing function (bricks or hollow blocks), while keeping good thermal insulation properties.

This study in is based on the optimization of the mix design and the process using compaction during casting. This process increases significantly the mechanical strength of the produced material and magnifies particularly the strain capacity before collapse, while using lower binder contents.

Due to the preferential orientation of particles, the porous structure becomes anisotropic and volume of entrapped air, which contributes to reduce the thermal conductivity, is reduced. The data measurements show indeed a slight increase in thermal conductivity, but it is clearly less sensitive than the improvement of mechanical strength of the material obtained using the compacting process. This process constitutes therefore an interesting way to develop the use of such materials.

The presented results, in the case of a given casting process, allow to deepen the knowledge about hemp concrete. Such material used in building construction has still probably great potential of improvement.

Résumé

Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre

La prise en compte de l'impact environnemental des constructions conduit à s'interroger sur des matériaux alternatifs de construction. Dans ce contexte, le béton de chanvre (mélange chaux/chanvre) présente de nombreux atouts. Malgré la forte demande actuelle, son utilisation et sa mise en œuvre sont souvent artisanales et sa résistance mécanique demeure relativement faible.

Dans le présent travail, l'utilisation du béton de chanvre est envisagée pour réaliser des éléments de construction préfabriqués ayant un rôle structurel ou porteur (briques ou blocs alvéolaires), tout en conservant de bonnes qualités d'isolation thermique.

Cette étude s'articule autour de l'optimisation de la formulation et du procédé de mise en œuvre par compactage à l'état frais qui améliore significativement la résistance mécanique du matériau produit. Il augmente notamment sa capacité de déformation avant rupture, tout en réduisant le dosage en liant.

La structure poreuse devient anisotrope du fait de l'orientation préférentielle des particules et le volume d'air occlus, à l'origine d'une faible conductivité thermique, se trouve réduit. Les mesures montrent effectivement une légère augmentation de la conductivité thermique, qui est toutefois nettement inférieure au gain de résistance mécanique du matériau obtenu par le procédé de compactage appliqué. Ce dernier constitue donc une voie de développement pour l'utilisation de tels matériaux.

Les résultats présentés, à travers un mode de mise en œuvre donné, permettent d'approfondir les connaissances sur le béton de chanvre, qui possède encore probablement un grand potentiel d'amélioration en vue de son utilisation pour la construction.