



**HAL**  
open science

# Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre

Alice Youssef Younes, Alice Youssef

## ► To cite this version:

Alice Youssef Younes, Alice Youssef. Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre. Matériaux composites et construction. Université de Bretagne Sud, 2017. Français. NNT : 2017LORIS431 . tel-01535694

**HAL Id: tel-01535694**

**<https://theses.hal.science/tel-01535694v1>**

Submitted on 9 Jun 2017

**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.



**THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD**  
*sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

pour obtenir le titre de  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD**

*Mention : Science pour l'ingénieur*  
**Ecole doctorale SICMA**

Présentée par

**Alice YOUSSEF**

Préparée à l'unité mixte de recherche Dupuy de Lôme IRDL  
FRE CNRS (3744)

Etablissement de rattachement : **UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD**

**Etude mécanique des  
mélanges chaux/chanvre  
pour leur prise en compte  
dans le calcul de structure  
au sein d'une ossature  
légère.**

**Thèse soutenue le 20/01/2017**

Devant le jury composé de :

**Mme Anne PANTET**  
Professeur, Université du Havre / Examinatrice

**M. Sofiane AMZIANE**  
Professeur, Polytech Clermont-Ferrand / Rapporteur

**M. Moussa GOMINA**  
Maitre de conférences, ENSICAEN / Rapporteur

**M. Noël CHALLAMEL**  
Professeur, IRDL / Directeur de thèse

**M. Thibaut LECOMPTE**  
Maitre de conférences, IRDL / Co-directeur de thèse

**M. Vincent PICANDET**  
Maitre de conférences, IRDL / Co-directeur de thèse







## ***REMERCIEMENTS***

Ce travail a été réalisé à l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme sous la direction du Professeur Noël Challamel, de Thibaut Lecompte et de Vincent Picandet.

Je tiens à les remercier sincèrement de m'avoir accueillie dans leur équipe et de m'avoir guidée et éclairée tout au long de ces travaux. Je leur témoigne ma profonde reconnaissance pour l'encadrement scientifique de ce travail, pour l'avoir suivi avec patience, ainsi que pour m'avoir fait bénéficier de leurs expériences et de leurs compétences.

Je remercie également la région de Bretagne pour le financement des travaux de la thèse et pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en me choisissant pour travailler sur ce sujet.

Je tiens ensuite à remercier les membres du Jury qui ont accepté de rapporter et d'examiner mon travail de thèse. Merci à Moussa Gomina MCF, HDR, au Professeur Anne Pantet, et au Professeur Sofiane Amziane.

J'adresse également un grand remerciement aux bureaux d'études O.T.I (Ouest Technologie d'Ingénierie) et à Simulo Technologies pour leur aide financière précieuse pour la réalisation des essais expérimentaux, et pour leur présence régulière aux réunions de suivi de la thèse.

Je remercie également tous les membres du laboratoire pour leur accueil, leur aide régulière et pour l'ambiance sympathique et dynamique qu'ils ont su apporter.

J'ai une pensée émue pour ma famille en Syrie, surtout mes parents pour leur grand soutien moral durant la thèse malgré la distance qui nous séparait.

Pour finir, Je remercie Arnaud, mon époux, la personne qui m'a permis d'aller au terme de mon but. Merci pour son soutien moral pendant la durée de mes études et durant la thèse.

Enfin, mes remerciements à mes chers enfants, Arthur et Julien qui m'ont bien encouragée et supportée tout au long de mes études et pour l'aide morale qu'ils n'ont pas cessé de m'apporter.



## *Dédicaces*

*A mon époux Arnaud*

*A mes chers enfants Arthur et Julien*

*A mes parents*

*A mes beaux-parents*





# Sommaire

Introduction .....	13
Chapitre 1. Etude Bibliographique.....	19
1.1 Données générales sur le chanvre.....	21
1.1.1 Morphologie de la tige de chanvre .....	25
1.1.2 Observation de la chènevotte par le MEB.....	26
1.1.3 Masses volumiques et porosité de la chènevotte.....	27
1.1.4 Granulométrie de la chènevotte.....	28
1.1.5 Comportement à l'eau.....	30
1.2 Le béton de chanvre.....	32
1.2.1 Les liants .....	32
1.3 Hétérogénéités et anisotropie du béton de chanvre .....	34
1.4 Propriétés thermiques du béton de chanvre .....	36
1.5 Propriétés mécaniques de béton de chanvre .....	38
1.5.1 Compression simple .....	38
1.5.2 Comportement en flexion.....	40
1.6 Béton de chanvre associé à une structure bois .....	41
1.7 Modélisation du comportement du béton de chanvre.....	43
1.7.1 Essai triaxial de Fleck .....	46
1.8 Formulation des mélanges chaux/chanvre.....	48
1.9 Conclusion .....	50
Chapitre 2. Partie expérimentale .....	53
2.1 Introduction .....	55
2.2 Elaboration des éprouvettes.....	56

2.2.1	Mise en œuvre des formulations .....	56
2.3	Caractérisation du comportement à la compression .....	64
2.3.1	Comportement à la compression simple des bétons.....	67
2.4	Résultats et Analyses des essais de compression simple.....	74
2.4.1	Reproductibilité des essais de compression .....	74
2.5	Conclusion .....	94
Chapitre 3.	Comportement au cisaillement des mélanges chaux/chanvre .....	97
3.1	Introduction .....	99
3.2	Caractérisation du comportement au cisaillement.....	100
3.2.1	Les difficultés de mise en point et les avantages .....	102
3.3	Essai de cisaillement.....	104
3.4	Comportement au cisaillement des bétons de chanvre .....	107
3.4.1	Reproductibilité des essais de cisaillement .....	107
3.4.2	Influence de la formulation .....	118
3.4.3	Hétérogénéité liée à la résistance au cisaillement .....	123
3.4.4	Bilan .....	124
3.5	Rigidité de cisaillement R.....	125
3.5.1	Rigidité de cisaillement moyen R pour différentes éprouvettes .....	126
3.5.2	R en fonction de la masse volumique des éprouvettes.....	129
3.5.3	R en fonction de la compacité des éprouvettes .....	132
3.5.4	R en fonction la fraction volumique de chanvre dans les éprouvettes .....	136
3.6	Mesures des champs des déplacements et des déformations par ARAMIS .....	140
3.6.1	Introduction .....	140
3.6.2	Mesures de cisaillement réalisées avec ARAMIS.....	142
3.7	Résultats des essais .....	143
3.7.1	Exemple de résultats : Eprouvettes M4 H C $\perp$ S $\perp$ .....	143
3.8	Prise en compte de la rotation de l'éprouvette lors du cisaillement .....	152
3.8.1	Calcul des paramètres de correction de la courbe de cisaillement ( $\tau$ - $\gamma$ ).....	154
3.8.2	Correction de la courbe ( $\tau$ , $\gamma$ ) pour les essais avec Aramis.....	162
3.8.3	Application sur les essais de cisaillement accompagnés par les mesures Aramis	163
3.9	Calcul du module de cisaillement G.....	165
3.9.1	Module de cisaillement G $\perp$ .....	165

3.9.2	Module de cisaillement $G//$ .....	167
3.10	Résistance initiale au cisaillement $\tau_0$ .....	168
3.11	Conclusions partielles du chapitre .....	170
Chapitre 4.	Modélisation et application numérique .....	173
4.1	Introduction .....	175
4.2	Description du bâtiment étudié.....	175
4.3	Hypothèses.....	178
4.3.1	Norme et Références .....	178
4.3.2	Distribution des Charges .....	178
4.3.3	Combinaison d'actions .....	182
4.3.4	Logiciel de calcul .....	183
4.4	Description du modèle.....	183
4.4.1	Présentation générale.....	183
4.4.2	Spécificité de la modélisation éléments finis .....	184
4.5	Analyse modale et sismique .....	184
4.6	Résultats des calculs sous actions sismiques .....	186
4.6.1	Exemples détaillés des calculs .....	186
4.7	Récapitulatifs des résultats des calculs .....	192
4.8	Conclusions du chapitre.....	193
Chapitre 5.	Conclusions générales et perspectives .....	195
Références.....	Références.....	199

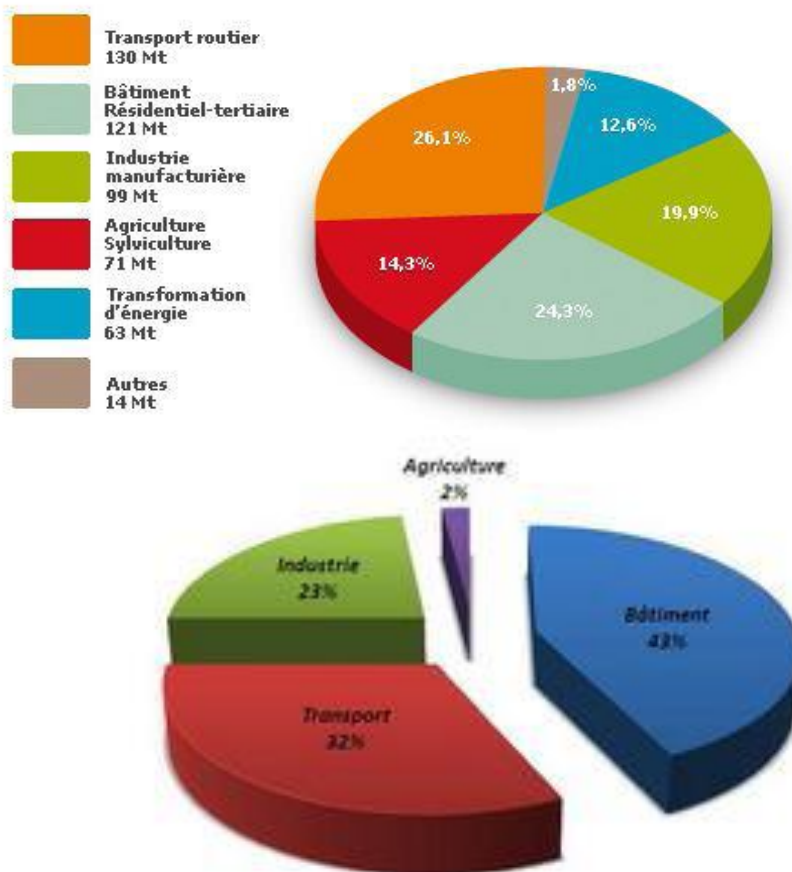


# Introduction



Le développement des activités industrielles induit à l'échelle de la planète des effets perturbateurs : le climat se réchauffe, le régime des précipitations se modifie et des phénomènes extrêmes tels que sécheresses, inondations et incendies de forêts deviennent plus fréquents. Il est nécessaire de mobiliser et d'affiner nos compétences techniques pour limiter l'impact de ces effets négatifs.

On estime que le secteur du bâtiment est actuellement à l'origine de 24% des émissions de CO<sub>2</sub> et de 43% de la consommation d'énergie en France (ADEME, 2009).



Les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> pour différents secteurs économiques (ADEME, 2009)



D'autre part, depuis la fin du XXème siècle, il est apparu nécessaire de réduire la facture énergétique ; et l'amélioration thermique des bâtiments est apparue comme un élément stratégique de la lutte pour les économies d'énergie.

L'essor actuel de la prise en compte de l'impact environnemental oblige à s'interroger sur de nouveaux procédés de construction ainsi que sur des matériaux innovants permettant de limiter l'impact de l'activité humaine sur l'environnement dans les différents secteurs d'activité. Lancé en 2007, le Grenelle de l'Environnement est entré dans sa phase active. Un des six chantiers majeurs de cet engagement est lié au bâtiment et à l'urbanisme. Il est donc d'autant plus nécessaire de s'interroger sur l'utilisation de nouveaux matériaux, moins émissifs et plus écologiques : les « éco-matériaux ».

En raison de leurs faibles répercussions environnementales, les éco-matériaux comme le chanvre, le liège, le lin ou la paille apportent des réponses concrètes à ces nouvelles préoccupations.

La France est un producteur majeur de chanvre et de lin au niveau mondial. Ces filières cherchent à trouver des débouchés nouveaux et plus locaux pour leurs produits (fibres, graines) et coproduits (chènevotte et anas).

Le développement de ces matériaux doit permettre de promouvoir des processus technologiques à impact réduit sur l'environnement ( Lanier et al. 2008, Pretot et al. 2014).

Aujourd'hui l'utilisation de particules végétales dans la construction est justifiée par deux raisons principales :

- La préservation des ressources naturelles telles que les agrégats minéraux, dont les conditions d'extraction sont de plus en plus difficiles.
- La nécessité de concevoir des matériaux de construction performants (isolation thermique, absorption acoustique, isolation acoustique) avec le minimum d'impact sur l'environnement, particulièrement en ce qui concerne l'empreinte carbone.

Depuis une trentaine d'années, un nouveau matériau de construction a été mis au point en mélangeant des particules de chènevotte (partie boisée d'une tige de chanvre) et un liant minéral (chaux ou ciment). Ce nouveau matériau de construction est généralement appelé béton de chanvre. En France, l'emploi de la chènevotte comme agrégat pour la confection de béton léger a été initiée en 1986 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).

L'intérêt principal de l'intégration de la matière végétale dans les parois de bâtiments est le stockage de carbone pendant la durée de vie du bâtiment. La plantation de chanvre est une excellente tête d'assolement qui nécessite très peu d'intrants (peu de pesticides, peu de traitements phytosanitaires et pas d'irrigation (Boutin et al. 2006, Pretot et al. 2014).

Au-delà de ses qualités environnementales déjà bien établies, il convient maintenant de mesurer les performances de ce matériau en tant qu'enveloppe de bâtiment.

Dans ce travail de thèse, nous travaillons sur des blocs préfabriqués, obtenus à partir de chanévotte, d'eau et de chaux. Ces blocs sont utilisés comme matériau de remplissage dans une structure porteuse.



Les constituants du béton de chanvre

En raison de la faible densité liée à la forte porosité des particules de chanvre, la combinaison de chanvre et d'un liant minéral crée un matériau de construction dont les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques diffèrent de celles du béton classique. Les points forts de ce matériau sont sa légèreté, sa faible conductivité thermique et ses propriétés acoustiques. Il peut donc être avantageux de l'utiliser dans la construction (Cérézo, 2005, Arnaud et al. 2006)

Aucune réglementation n'existe actuellement pour permettre aux bureaux d'étude de prendre en compte les propriétés de ce matériau dans leurs calculs de structure. Pourtant, le béton de chanvre a des propriétés mécaniques, notamment d'amortissement dynamique, qui devrait permettre de diminuer les sections de structure, et ainsi limiter les coûts et l'impact environnemental liés aux matériaux de construction.

Un des principaux freins au développement de ce matériau est le manque de références dans les normes ou dans les codes permettant de dimensionner des structures de bâtiment de type structure légère/blocs de béton de chanvre. L'objectif principal de ce travail de thèse est de parvenir à mieux prendre en compte la contribution de ces matériaux dans la structure. Pour ce faire, nous avons travaillé sur deux axes principaux :

- La mise en place d'essais complémentaires sur le béton de chanvre :
  - o Etude de l'anisotropie en compression
  - o Etude de la résistance au cisaillement
- Le développement de lois de comportement pour l'aide au dimensionnement de structures légères avec remplissage en béton de chanvre.

Articulée autour de quatre chapitres (revue de littérature, essais de compression, essais de cisaillement et proposition de lois de comportement), notre thèse vise à améliorer et à faciliter l'utilisation de ce matériau afin de mieux l'intégrer dans la construction.

Le premier chapitre décrit l'état de l'art du matériau : les différentes formulations de béton de chanvre étudiées dans la littérature : liants, granulats (CF, CP), paramètres de formulation comme le rapport Eau/ Liant (E/L), Liant/ Granulat (L/G), paramètres procédés (moulage, compactage). Il décrit aussi les caractéristiques physiques et mécaniques du béton de chanvre : compression simple, flexion, propriétés thermiques et hydriques.

Dans le même chapitre nous présentons les différentes études réalisées sur la modélisation des matériaux ayant des comportements *a priori* proches de celui du béton de chanvre.

Le deuxième chapitre présente les essais de compression : les dispositifs expérimentaux, la réalisation des éprouvettes, les essais à effectuer, les mesures réalisées et les analyses qui en sont faites.

Les essais de cisaillement seront abordés dans le troisième chapitre avec le traitement d'image effectué via l'utilisation d'une caméra et du logiciel de traitement d'image ARAMIS.

Le quatrième et dernier chapitre suggère quelques pistes de modèles de comportement du chanvre ainsi qu'une synthèse et des perspectives.

Enfin, la synthèse des résultats obtenus, amène de nouvelles perspectives de recherches relatives au comportement du béton de chanvre.

# **Chapitre 1. Etude Bibliographique**



## 1.1 Données générales sur le chanvre

Le béton de chanvre est un matériau de plus en plus préconisé par les maîtres d'ouvrage de bâtiments en Bretagne, d'autant plus que la filière chanvre y est déjà présente et s'y développe actuellement. Ce matériau a de nombreux atouts, notamment son faible impact environnemental tout au long de son cycle de vie (fabrication, mise en œuvre, fin de vie). Le béton de chanvre est en général un mélange de chaux, liant minéral moins impactant que le ciment, et de chènevotte, qui est la partie boisée de la tige de chanvre. Le béton de chanvre est essentiellement utilisé aujourd'hui comme un matériau de remplissage isolant, associé à une structure en bois, en béton ou en maçonnerie.

Notre recherche bibliographique sur le béton de chanvre s'appuie sur l'état de l'art du comportement mécanique du béton de chanvre (incluant la rigidité, la résistance, le comportement cyclique, le comportement au cisaillement) et l'état de l'art des modèles de comportement du béton de chanvre.

Le chanvre ou (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle et herbacée de la famille des Cannabinacées, utilisée depuis plus de 6000 ans par l'être humain. Elle était en particulier très prisée pour la qualité de ses fibres. Elle est principalement cultivée en Chine et en Europe. Sa production mondiale est estimée à environ 120000 tonnes par an. La France est le plus gros producteur en Europe avec 65000 tonnes de paille pour une surface cultivée de l'ordre de 8000 hectares (Figure 1-1, Figure 1-2) (ADEME 2011).

Le chanvre est aujourd'hui divisé en trois principales familles, (Bouloc et al. 2006) :

- *Cannabis sativa* : le chanvre industriel (seule variété autorisée pour l'agriculture).
- *Cannabini ruderalis* : la forme sauvage
- *Cannabini indica* : la forme psychotrope de la plante.

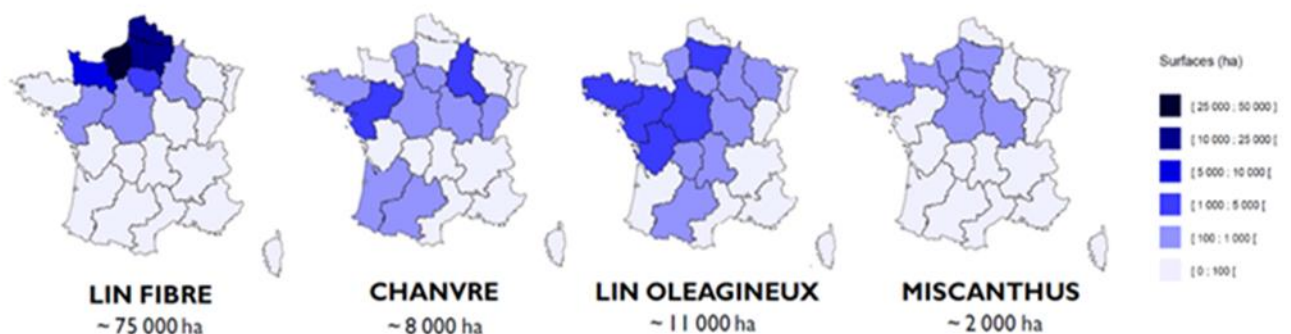


Figure 1-1 : Répartition sur le territoire des surfaces françaises de plantes à fibres (moyenne 2001-2008), (Clément MEIRHAEGHE pour l'Ademe, Mars 2011).

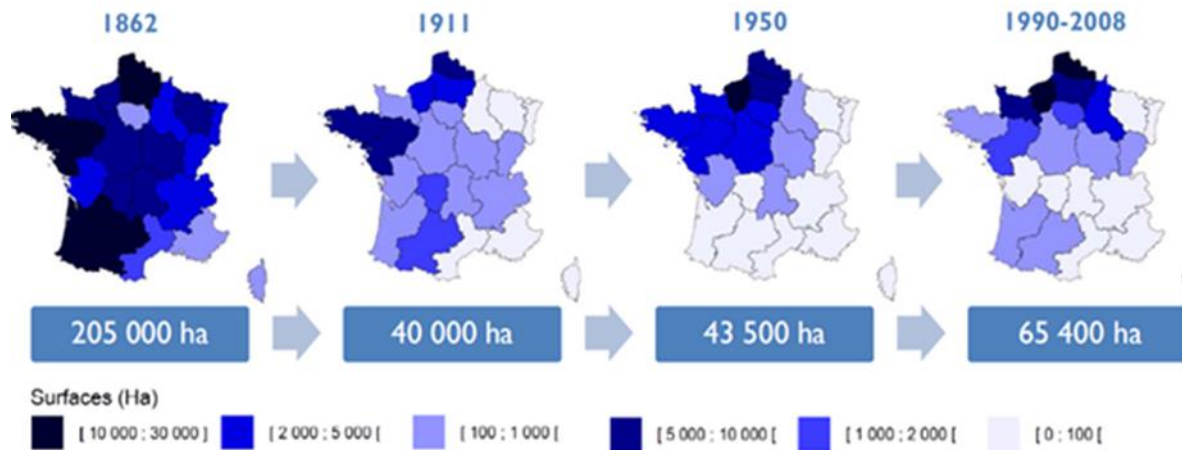


Figure 1-2 : Evolution historique des surfaces françaises implantées en chanvre et en lin, (Clément MEIRHAEGHE pour l'Ademe, Mars 2011).

Le chanvre 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 CO<sub>2</sub> favorable, peu ou pas de problème de gestion de fin de vie (Figure 1-3 et Figure 1-4).

Le chanvre mesure de 2 à 4 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 cm en moyenne. La croissance du chanvre est assez rapide : cycle court environ 4 mois Mars- Septembre (Bouloc et al. 2006)

La plante de chanvre contient des graines et des tiges. Les graines sont appelées chènevis et sont destinées à l'industrie agro-alimentaire (semence, oisellerie, pêche, huiles alimentaires et cosmétiques) ou à la production d'huile utilisée pour l'éclairage et la préparation de vernis et de peintures. Les tiges, quant à elles, contiennent des fibres qui sont principalement valorisées dans l'industrie textile, et partie boisée, de laquelle est issue la chènevotte.

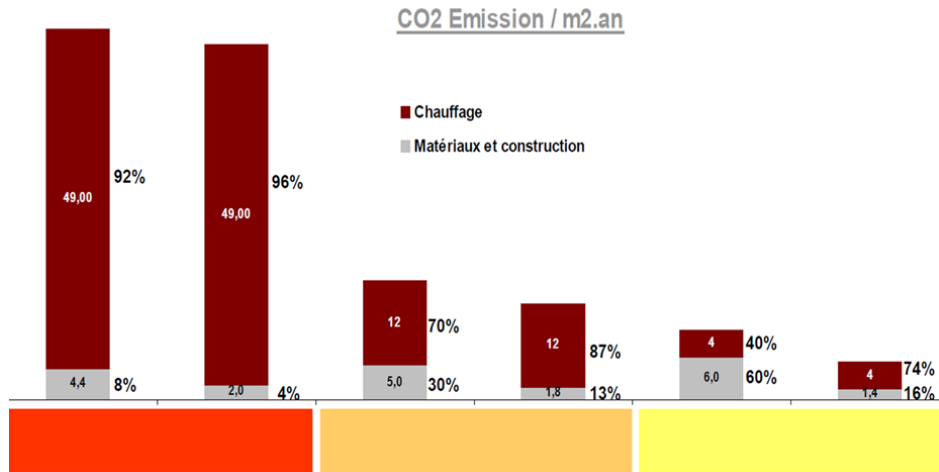


Figure 1-3 : Les GES dans le bâtiment traditionnel/ Ossature bois et isolation chanvre (Lanier et al. 2008).

## Analyse du Cycle de Vie des bétons de chanvre

Comparaison avec 3 autres matériaux avec iso performance - d'après la base INES

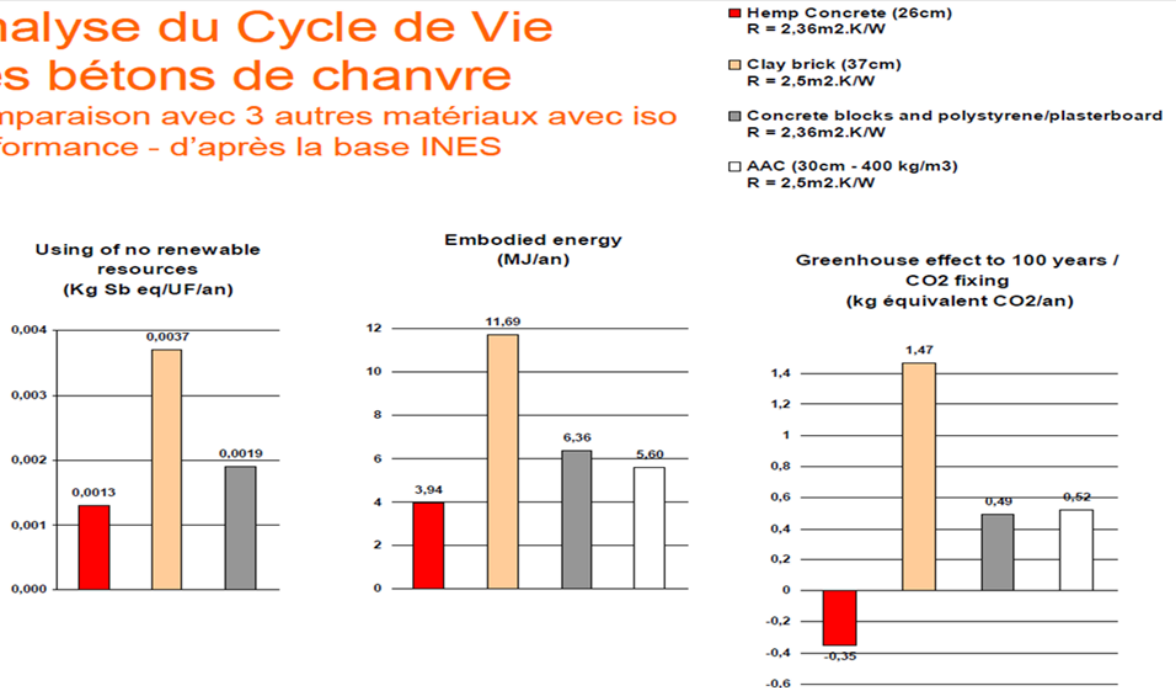


Figure 1-4 : ACV-comparaison, matériaux tradi / bois+chanvre (Lanier et al. 2008).

Après la récolte, les tiges de chanvre sont séchées et concassées. Le processus de fabrication se fait en plusieurs étapes. Les fibres, qui se trouvent juste sous l'écorce, sont séparées du reste de la tige, formée principalement de copeaux de bois, riche en lignine de 1 à 2,5 cm de long appelés chènevottes, qui ont une forme type parallépipédique (Figure 1-5, Nguyen 2010). Cette partie ligneuse de la tige représente plus de 50 % de la tige en poids et en volume.



(Figure 1–6, Nguyen 2010). En général, une tonne de paille donne 0,3 tonne de fibres, de 0,55 à 0,65 tonne de chènevottes et 0,15 tonne de poussières (Bouloc et al. 2006).

La chènevotte est actuellement principalement utilisée comme litière pour les animaux et comme paillis horticole en raison de ses propriétés absorbantes (environ 10 fois plus élevées que la paille de blé). La chènevotte absorbe jusqu'à 400% (Nguyen, 2010) de son poids en eau. C'est un matériau renouvelable et recyclable.



Figure 1–5 : Tige de chanvre (Nguyen 2010, Tran Le et al. 2010).

Dans nos travaux, nous n'utilisons que la chènevotte (totalement défibrée) pour la confection de blocs chauds/chanvre.

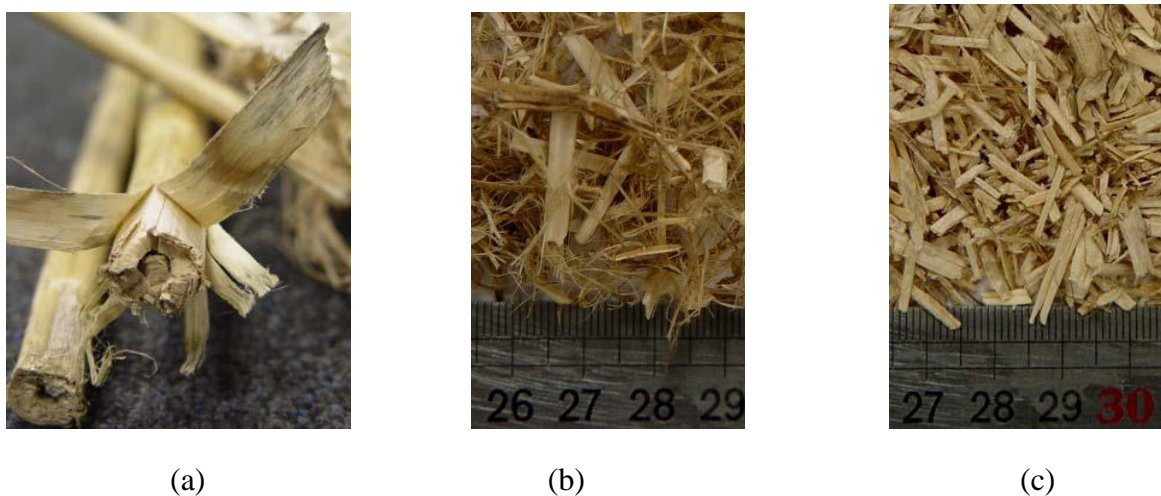


Figure 1–6 : Les granulats étudiés: (a) La tige du chanvre, (b) Chènevotte avec fibre corticale (CF), (c) Chènevotte totalement défibrée (CP) (Nguyen 2010).

La chènevotte pour le bâtiment s'utilise soit en vrac comme isolant, soit associée à d'autres constituants d'origine minérale. Le procédé consiste à la mélanger avec des liants minéraux pour la réalisation de tous types de maçonnerie non porteuse tels que des chapes ou dalles isolantes, banchage sur une structure porteuse en bois, restauration de maisons à colombages ou isolation de toiture (Figure 1–7). Les liants utilisés sont le plus souvent constitués d'un mélange de chaux aérienne ou hydraulique.

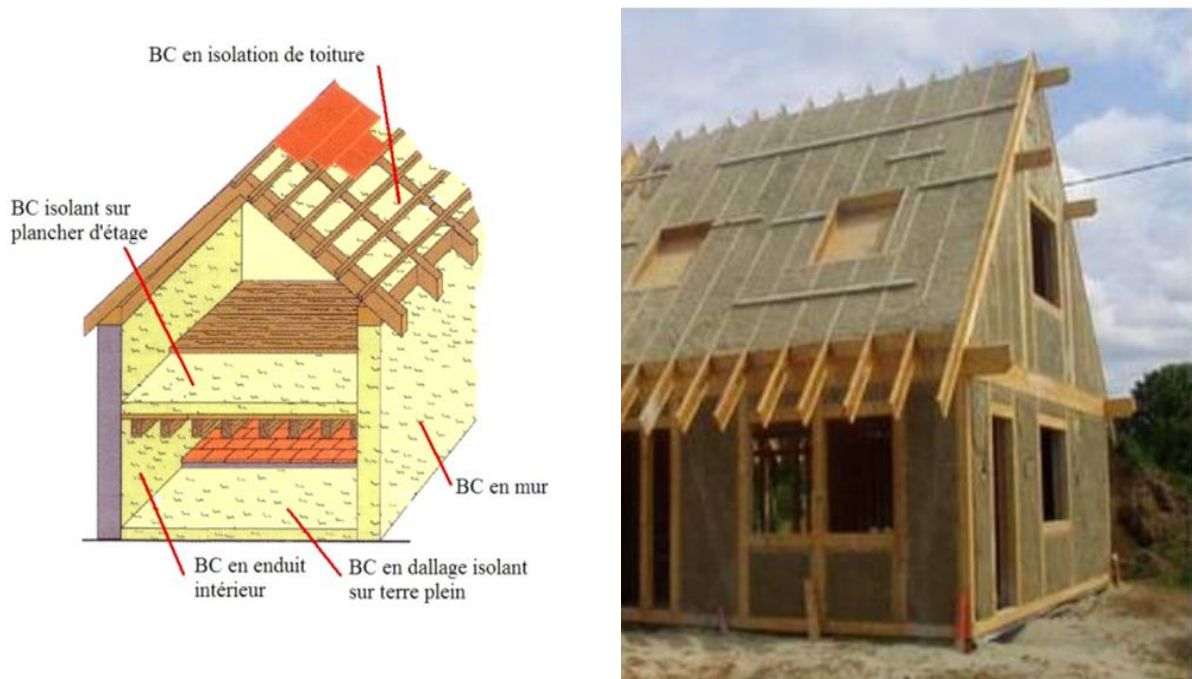


Figure 1–7 : Intégration structurelle (Gourlay & Arnaud 2010) - Maison en béton de chanvre (Bouloc et al.2006)

### 1.1.1 Morphologie de la tige de chanvre

La tige de chanvre vue de l'extérieur vers l'axe de la tige comporte (Figure 1–8) : l'épiderme, le collenchyme, le tissu phloémien contenant les fibres primaires et secondaires, le cambium, le xylème et enfin la moelle (Abot 2010).

Dans les parties hautes de la tige de la plante, on observe une plus grande présence de fibres primaires (de 5 à 55 mm de longueur et de 15 à 30  $\mu\text{m}$  de diamètre) et au contraire une plus grande présence de fibres secondaires à la base de la plante (de 1 à 2 mm de longueur et de 5 à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre) moins longues que les fibres primaires.

Les fibres secondaires du chanvre, riches en cellulose, constituent la principale valeur de ce produit (Bouloc et al. 2006). Lors du défibrage, la paille est le plus souvent broyée à l'aide d'un

broyeur à marteau. La partie boisée est détachée des fibres et déchiquetée en petits morceaux pour former de la chènevotte (Tronet, 2013).

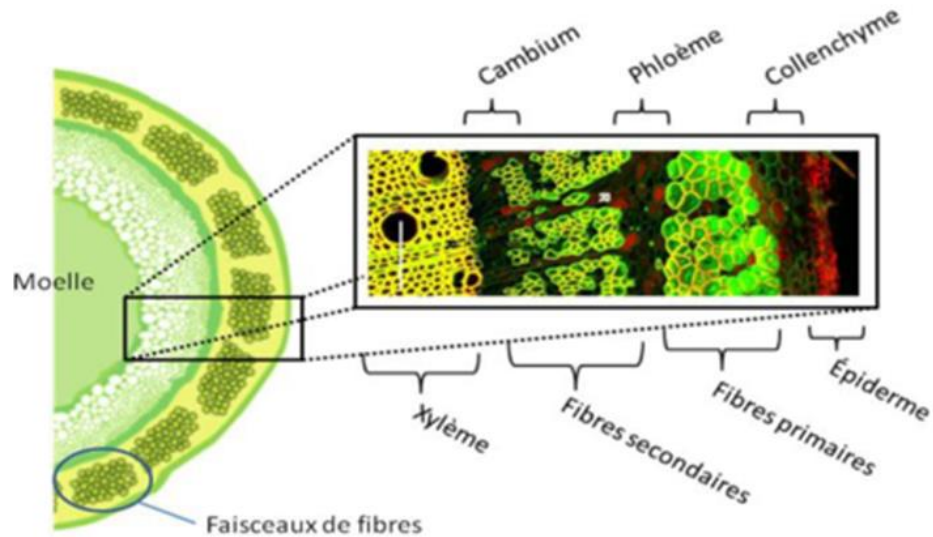


Figure 1-8 : Tiges et tissus constituant le chanvre (Tronet 2013).

### 1.1.2 Observation de la chènevotte par le MEB

L'observation par le MEB (microscope électronique à balayage) a permis de connaître la morphologie de la chènevotte et de mieux comprendre les résultats que nous obtiendrons lors des essais mécaniques. Des observations ont été effectuées par Nguyen (Nguyen 2010) : une coupe transversale et une autre longitudinale (Figure 1-9).

La chènevotte présente une structure alvéolaire (nid d'abeilles), les cavités sont de différentes tailles sur une coupe transversale. Les observations montrent le réseau capillaire dont le diamètre est habituellement compris entre 10 et 50  $\mu\text{m}$ . Ces capillaires servent à la transmission de la sève le long de la tige. Une fois la tige séchée, ces vaisseaux vides constituent les pores des particules végétales. Les deux propriétés essentielles de la chènevotte sont sa forte capacité d'absorption d'eau et son faible poids volumique.

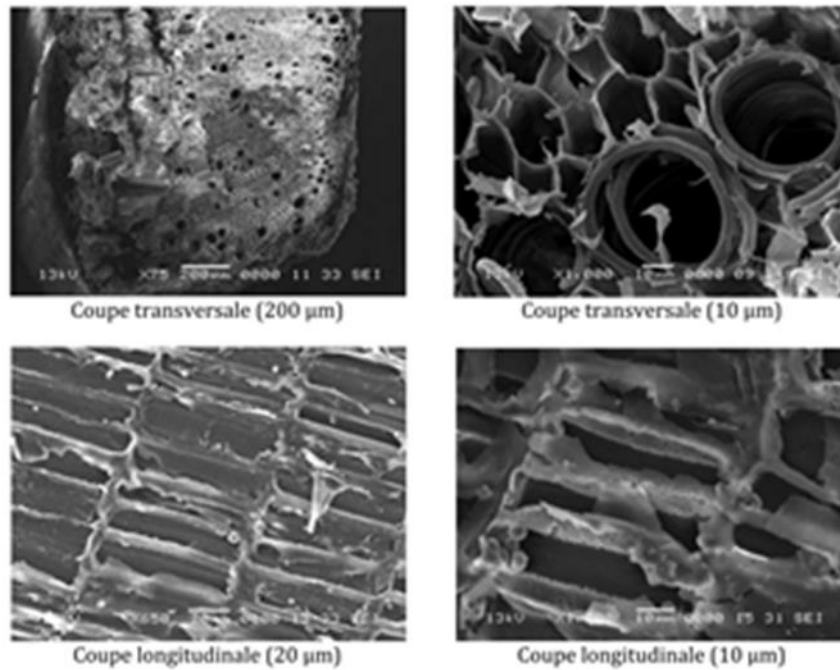


Figure 1-9 : Microstructure de la tige de chènevotte (coupe transversale et longitudinale) obtenue par MEB (Nguyen 2010).

### 1.1.3 Masses volumiques et porosité de la chènevotte

La porosité est définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux et comme le paramètre qui l'exprime quantitativement : elle est généralement exprimée par le rapport du volume des vides sur le volume total du milieu (sans dimension).

Dans le cas d'un empilement de chènevotte, trois masses volumiques peuvent être considérées : la masse volumique de l'empilement, celle de la particule et celle des parois solides constituant les particules de chènevotte, appelée masse spécifique, qui est de l'ordre de grandeur de la masse volumique de la cellulose ( $1500 \text{ kg/m}^3$ )

Selon Tronet (Tronet 2013), la masse volumique effective de squelette solide de la chènevotte obtenue est  $1448 \pm 11 \text{ kg/m}^3$ . La mesure a été faite via un pycnomètre à gaz. L'appareillage employé est un Accupyc II 1340.

La forte porosité de la particule de chènevotte lui confère une faible masse volumique apparente. Les mesures de la porosité par analyse d'image et par tomographie donnent des valeurs comprises entre 57% et 60%. Ces valeurs ne prennent en considération, selon Ceyte, que les pores de grande taille et de taille moyenne (Ceyte 2008). En utilisant l'équation (Eq.1-1), Tronet (2013) a obtenu des valeurs de porosité intra particule de l'ordre de 82%. Ce taux de porosité permet d'expliquer la grande capacité de déformation, la forte sensibilité à l'eau et les bonnes propriétés thermiques de ce matériau (Tronet 2013).

$$\text{Taux de porosité}_{\text{chênevotte}} = 1 - \frac{\text{Masse volumique (chênevotte)}}{\text{Masse spécifique (chênevotte)}} \quad (1-1)$$

La masse volumique de l'empilement en vrac de la chènevotte varie quant à elle entre de 110 kg/m<sup>3</sup> et 140 kg/m<sup>3</sup> selon l'état de compactage et les conditions ambiantes (Arnaud 2000, Cérézo 2005, Bütschi et al. 2004, Nguyen et al. 2009), ce qui correspond à une porosité globale de l'ordre de 90%

Le tableau (Tableau 1-1) montre les masses volumique et spécifique de la chènevotte selon plusieurs sources.

Masse volumique en vrac (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique d'une particule (kg/m <sup>3</sup> )	Masse spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité d'une particule (%)	Source
102.83	256.41	1465	82.5	(Nguyen et al.2009)
110	260	1450	82.1	(Amziane and Arnaud 2013)
112	256	1460	82.5	(Tran Le et al. 2010)
112	256	1448	82.3	(Tronet 2013)

Tableau 1-1: Masse volumique et spécifique de la chènevotte.

#### 1.1.4 Granulométrie de la chènevotte

L'analyse granulométrique permet de déterminer la classe granulaire ainsi que l'élongation moyenne ou la surface moyenne de la chènevotte.

(Picandet, 2013), a étudié la répartition en taille des particules de chènevotte de deux manières différentes, avec chacune des avantages et des inconvénients. Une par tamisage mécanique, et l'autre, par analyse d'image sur deux granulats, CF (chènevotte avec des fibres corticales de faibles longueurs inférieures à 4 cm), et CP (chènevotte issues d'un processus de défibrage complet).

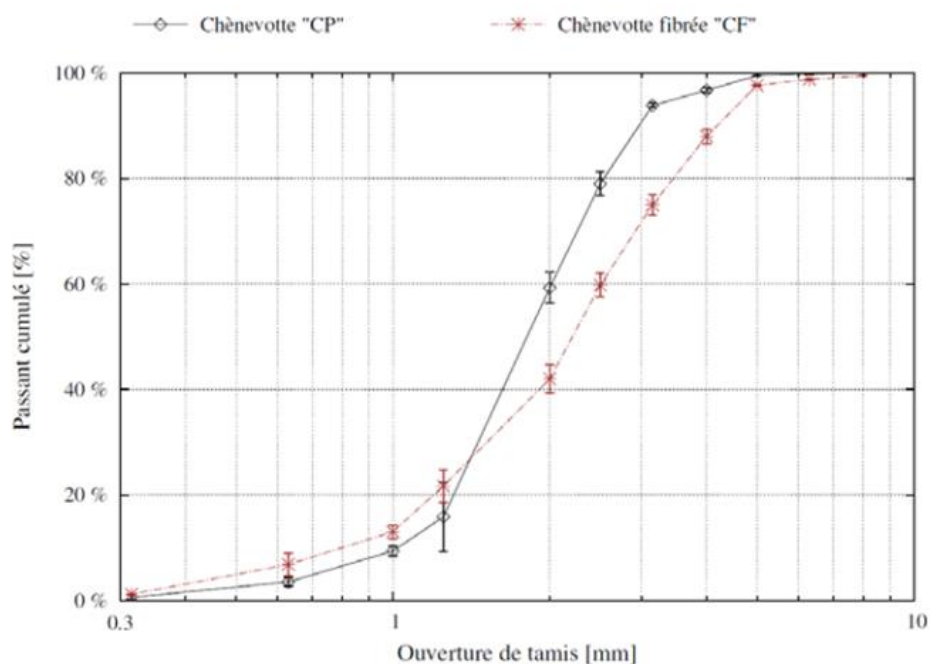
La première méthode a été utilisée sur les deux granulats (CF, CP), sachant que le maximum de fibres possible a été retiré du granulat CF avant le passage dans le tamis.

Le tamisage mécanique classique par voie sèche est peu adapté à la géométrie allongée des particules. Le tamisage permet d'obtenir une mesure de la dimension latérale largeur ou épaisseur maximale de la particule mais pas de sa plus grande dimension, à savoir sa longueur (Nguyen, 2010).

Donc, les tamis mécaniques ne sont pas adaptés à la mesure granulométrique de tels granulats, tandis qu'une analyse d'image permettrait d'obtenir directement les dimensions en 2D des particules. Cependant, elle nécessite une mise en œuvre plus complexe et un échantillonnage limité.

Le tamisage a été effectué avec des tamis d'ouvertures carrées normalisées pour 200 grammes et pour 5 tamis consécutifs. Les ouvertures des tamis utilisés s'échelonnent comme suit : 10 ; 8 ; 6,3 ; 5 ; 4 ; 3,15 ; 2,5 ; 2 ; 1,25 ; 1 ; 0,63 et 0,315 mm.

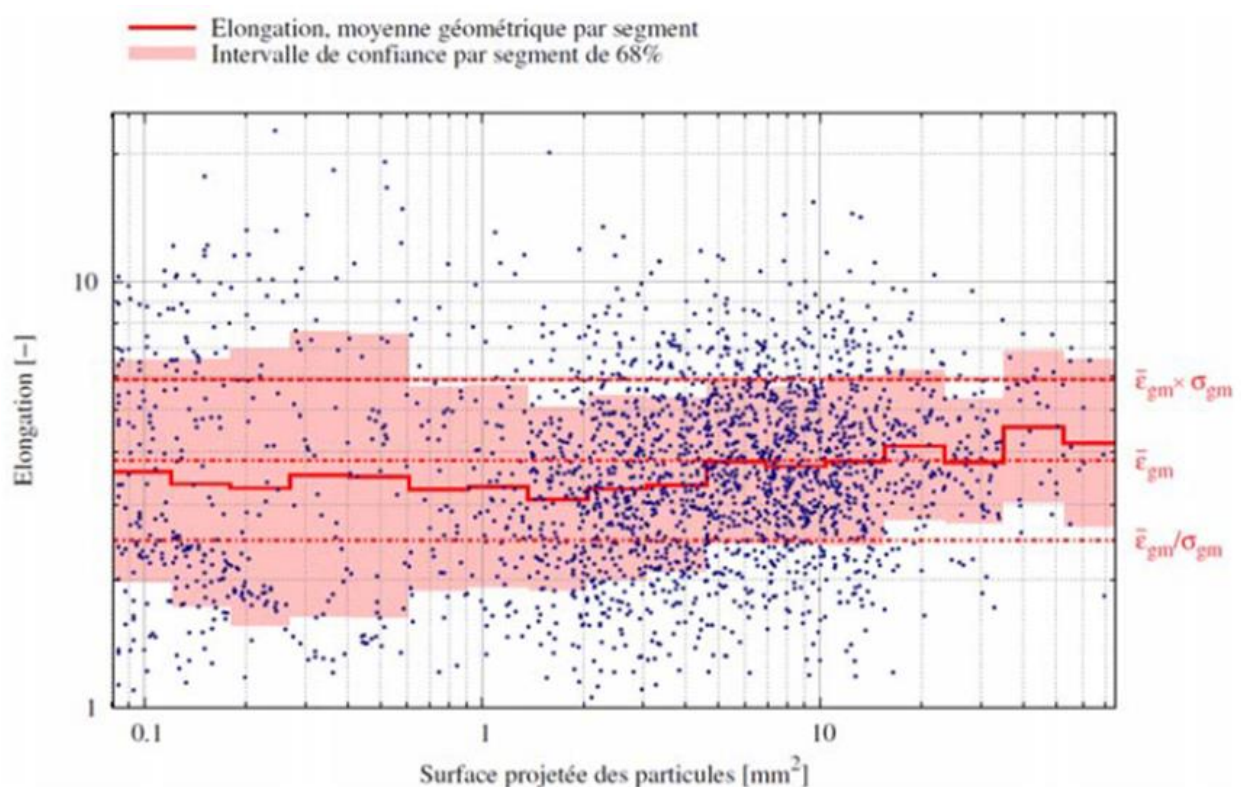
L'analyse granulométrique par tamisage a montré que la quantité des fibres des chènevottes testées varie entre 1 et 15% en masse. La teneur en fibre a été estimée entre 12% et 15% dans le cas de la chènevotte CF (Amziane & Arnaud, 2013). Les résultats montrent que les granulométries des deux chènevottes étudiées (avec / et sans les fibres) sont relativement proches (Figure 1-10).



Figures 1-10 : Courbes granulométrique obtenues par tamisage (Picandet 2013).

(Picandet, 2013), a étudié l'élongation afin de caractériser l'orientation de l'arrangement granulaire puis l'anisotropie des matériaux finis. Il a étudié l'élongation en fonction de l'aire projetée de chaque particule, calculée à partir des longueurs mesurées selon les axes majeur et mineur (Figure 1-11). Il a noté  $\bar{\epsilon}_{gm}$  la moyenne géométrique de l'élongement de chaque particule pondérée par son aire et l'écart type correspondant noté  $\sigma_{gm}$ .

Du point vu général, pour les deux méthodes d'analyse, sur l'ensemble des particules étudiées, la valeur moyenne de cette élongation est proche de 4 avec un écart type géométrique de l'ordre de 1,5.



Figures 1-11 : Elongation des particules de chanévotte évaluées suivant l'ajustement d'une ellipse sur l'aire projetée (Picandet 2013)

### 1.1.5 Comportement à l'eau

La capacité d'absorption de l'eau par le chanvre est une caractéristique importante car l'eau absorbée par la chanévotte diminue d'autant la quantité d'eau disponible pour la chaux. La masse de l'échantillon à un instant t nous permet de déterminer le taux d'absorption d'eau  $A(t)$  qui s'exprime par le rapport entre le gain massique de l'échantillon à l'instant t et sa masse initiale sèche (Equation 1-2).

$$A(t) = \frac{M(t)-M(0)}{M(0)} \quad (1-2)$$

Où  $t$  est l'instant auquel s'effectue la pesée (minutes ou heures),  $M(t)$  la masse de l'échantillon à l'instant  $t$ ,  $M(0)$  la masse initiale de l'échantillon séché en étuve.

La quantité d'eau absorbée se compose d'une partie emprisonnée par le réseau capillaire des particules et d'une autre partie retenue superficiellement absorbée 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 de chanvre sont respectivement de 276% et de 290%, après 5 et 30 minutes d'immersion (Nguyen 2010). Elles sont beaucoup plus importantes que pour d'autres granulats légers comme l'argile expansée ou les cendres volantes frittées. La chènevotte disposant d'environ 82% de porosité peut absorber un peu plus de 3 fois sa masse sèche en eau (Tronet 2013).

Les cinétiques d'absorption d'eau des granulats sont montrées sur la (Figure 1–12). La quantité d'eau absorbée par les granulats augmente très vite pendant la première minute, à cause de leur forte porosité, puis elle continue à augmenter pendant les 5 premières minutes, pour atteindre environ 70 % de l'absorption finale à la fin de cette période (Nguyen 2010). La vitesse d'absorption devient très faible ensuite.

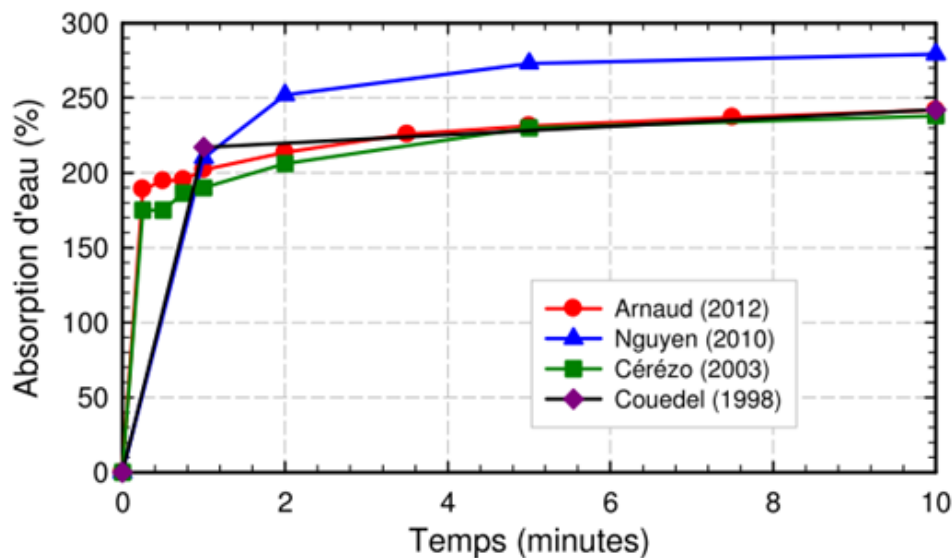


Figure 1–12 : Quantité d'eau absorbée par les granulats (CP) initialement secs immergés dans l'eau en fonction du temps (Nguyen 2010, Cérézo, 2005, Arnaud & Gourlay 2012, Couedel 1998).



## 1.2 Le béton de chanvre

On sait que les matériaux constitués de liants hydrauliques sont d'autant plus résistants que leur porosité est faible. Le compactage à la mise en œuvre permet donc d'obtenir des blocs plus résistants tout en diminuant le dosage en liant pour une résistance équivalente. La réalisation de blocs de béton de chanvre par compression à des pressions de compactage relativement élevées (5-7 MPa) s'avère être une piste intéressante, autant sur le plan écologique, que d'un point de vue thermique et mécanique (Nguyen 2010, Tronet et al. 2014, Tronet et al. 2016).

D'un point de vue environnemental, il est préférable de diminuer la quantité en liants hydrauliques, dont l'impact environnemental est plus élevé, au profit de la chènevotte, qui joue globalement le rôle de puits de carbone (Boutin et al., 2006).

### 1.2.1 Les liants

Les résultats obtenus par (Bruijn, Jeppsson, Sandin, & Nilsson, 2009) montrent que la résistance en compression et le module d'Young obtenus peuvent être plus élevés pour les mélanges plus riches en ciment. Mais des liants hydrauliques peuvent produire des résultats inacceptables. Par exemple, en association avec la chaux aérienne, seule une couche de fine épaisseur se solidifie en surface, l'intérieur de l'éprouvette restant à l'état de poudre (Cérézo 2005). Il existe donc des contradictions frappantes sur la question du liant à utiliser dans un béton de chanvre. Pourtant, la chaux aérienne, dont les spécificités sont de ne se durcir qu'au contact du dioxyde de carbone, semble être un liant " idéal " pour ce type d'applications. Cependant, l'usage de la chaux aérienne seule ne se prête pas bien à la préfabrication des éléments du béton de chanvre, car ce liant se solidifie trop lentement (Bütschi et al., 2004). De plus, l'étude de (Lawrence, Mays, Walker, & Ayala, 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) et notamment de pouzzolanes permet d'activer la carbonatation et de favoriser un durcissement à cœur plus rapide et ainsi apporter des résultats plus satisfaisants (Bouloc et al. 2006, Evrard 2002). L'addition de pouzzolane peut aussi augmenter significativement la résistance mécanique de la chaux aérienne ou hydraulique (Černý, Kunca, & Tydlitát, 2006).

#### 1.2.1.1 La chaux Tradical PF70

La Tradical PF70 est constituée en fraction massique de 75% de chaux aérienne, de 15% de liants hydrauliques (probablement du ciment) et de 10% de pouzzolanes. Sa composition chimique est présentée dans le (Tableau 1-2) (Tronet 2013).

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

Tableau 1-2: Composition chimique et propriétés du liant Tradical PF70. [Balthazars Cotte Batiment]

Tronet (Tronet, 2013) a mesuré la valeur de la masse spécifique de la Tradical PF70 via un pycnomètre à gaz à 27°C (Tableau 1-3); l'appareillage employé est un Accupyc II 1340 de Micromeritics.

	Avant étuvage	Après 48h à 60°C	Après étuvage et refroidis
<b>Masse (g)</b>	5,43	6,29	6,29
<b>Masse Volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2654,5 ± 4,1	2594,5 ± 1	2593,1 ± 0.9

Tableau 1-3 : Masse volumique de la chaux Tradical PF70, mesure par pycnomètre à gaz (Tronet 2013).

Les valeurs obtenues sont proches de celle donnée par (Cérézo 2005) dans ses travaux de thèse, à savoir 2700 kg/m<sup>3</sup>. Nguyen (2010) a mesuré la résistance à 28 jours de la Tradical PF70 par compression en fonction du rapport eau sur liant (E/L), (Figure 1–13).

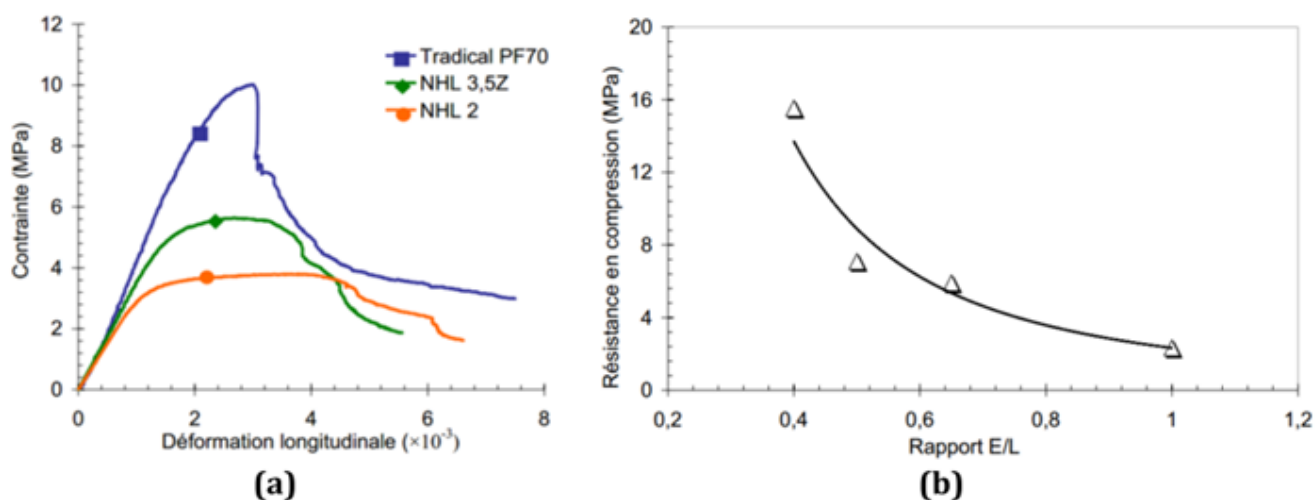


Figure 1–13 : (a) Comportement mécanique à 28 jours de différents liants à base de chaux, (b) évolution de la résistance à 28 jours de pâtes de chaux durci (Tradical PF70) en fonction du rapport E/L (Nguyen 2010)

Les caractéristiques mécaniques de la chaux sont fortement corrélées au rapport E/L. En effet, un ajout d'eau à l'état frais se traduira par une plus grande porosité de la pâte de liant à l'état durci (l'eau s'évapore et laisse place à du vide). (Lanos et al. 2013) rappellent la formule généralement utilisée pour la résistance mécanique,  $\sigma$ , des liants minéraux en fonction de la fraction volumique de liant  $\phi$  :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \phi^a \quad (1-3)$$

Où  $\sigma_0$ , est la résistance intrinsèque, correspondant à la fraction volumique de liant  $\phi = 1$ , Nguyen et al. (2009) ont trouvé  $\sigma_0 = 126,2$  MPa. Le paramètre de puissance  $a$  prend habituellement une valeur égale à 2 pour les matériaux cimentaires, et 3 pour les liants à base de chaux. Les résultats de (Nguyen et al. 2009) confirment cette valeur de 3 pour la Tradical PF 70®.

### 1.3 Hétérogénéités et anisotropie du béton de chanvre

Pour réaliser nos essais mécaniques durant cette thèse, nous avons travaillé sur des blocs compactés de béton de chanvre M1 et M4 fabriqués dans notre laboratoire et des blocs moulés du commerce appelé Chanvribloc<sup>(R)</sup>. Les deux formulations retenues sont notées M1 et M4 dans la continuité de la thèse de Tronet (Tronet 2013). La formulation M1 est peu compactée et avec une quantité de chaux conséquente, tandis que M4 est très compactée, avec peu de chaux et est

plus riche en chènevotte. Les deux formulations M1 et M4 conservent le même pourcentage Eau / Chaux ( $E/L = 0,55$ ), et seul le rapport L/G (liant sur granulat) varie. Ces formulations ont été choisies pour représenter deux cas extrêmes de bétons de chanvre densifiés voir §.1.8 à la page 48. Pour compléter les essais, une étude complémentaire a été prévue sur des blocs préfabriqués moulés, vendus pour une utilisation dans la construction, sous la dénomination de «Chanvribloc», afin d’effectuer une comparaison avec nos formulations.

Le béton de chanvre est un matériau fortement hétérogène. Il est important de bien noter que l’hétérogénéité ne provient pas seulement de la microstructure du matériau. Dans notre cas, c’est le mode de mise en œuvre qui entraîne une nouvelle forme d’hétérogénéité. En effet, le compactage consiste en théorie à appliquer une contrainte de compression uniforme sur tout l’échantillon, mais les frottements du matériau sur les parois du moule, même lubrifié, dissipent une partie non négligeable de l’énergie de compactage sur toute la hauteur de l’éprouvette (Figure 1–14). La recherche d’une compacité maximale entraîne une augmentation de la contrainte appliquée, de la contrainte radiale et donc des forces de frottement, comme le montre Tronet (Tronet 2013).

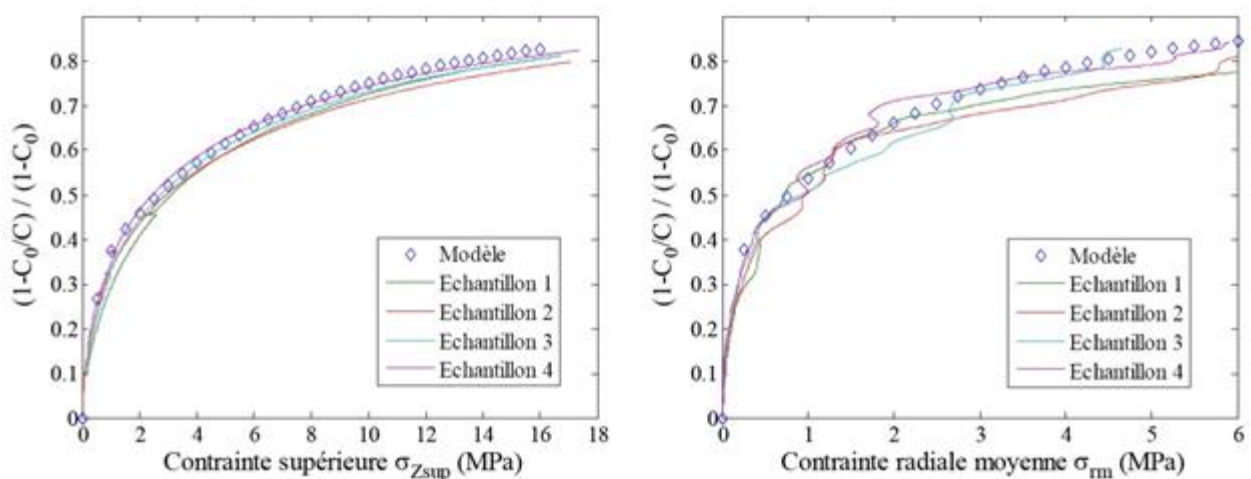


Figure 1–14 : Contrainte appliquée et contrainte radiale sur les parois du moule en fonction de la compacité, Tronet (Tronet 2013).

L’hétérogénéité n’est pas forcément la raison principale d’anisotropie. Le mode de compactage peut générer l’anisotropie. Nguyen (Nguyen 2010) a montré que la densification par compactage oriente fortement les particules de forme allongée dans la direction orthogonale au sens de compactage (Figure 1–15). En effet pour un béton de chanvre non densifié avec une méthode de mise en place ne générant pas d’orientation préférentielle des fibres.

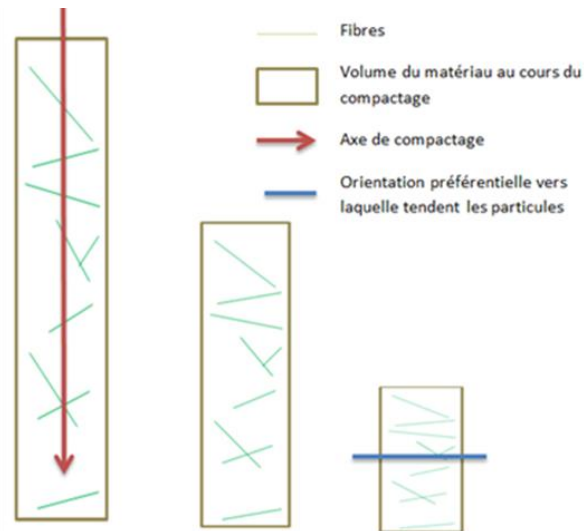


Figure 1–15 : Représentation de l'orientation des fibres lors du compactage Nguyen (Nguyen 2010).

Ainsi le mode de mise en place par vibration ou compactage induit une anisotropie de la microstructure, avec des répercussions sur le comportement mécanique et thermique.

#### 1.4 Propriétés thermiques du béton de chanvre

D'un point de vue thermique, beaucoup d'études sur différents bétons composés de granulats végétaux ont été effectuées pour étudier l'influence la variation de la masse volumique sur la conductivité thermique. Cérézo (Cérézo 2005) a trouvé qu'il y a un rapport quasi-linéaire entre la masse volumique et la conductivité thermique comme le montre la (Figure 1–16).

Nguyen (Nguyen et al. 2010) a trouvé que les particules de chènevotte ont tendance à s'orienter dans le plan horizontal, perpendiculaire au plan de compactage. Il a montré aussi qu'il y a une différence entre la conductivité thermique horizontale  $\lambda_h$  et celle verticale  $\lambda_v$ , mettant en évidence l'existence d'une anisotropie de conductivité thermique. Généralement, le rapport d'anisotropie est de l'ordre de 30% pour les conductivités thermiques dans le plan horizontal et vertical. Il explique ce phénomène par l'orientation préférentielle des particules de chènevotte durant le compactage et l'anisotropie propre des particules de chènevotte qui sont constituées au niveau microscopique par un assemblage de faisceaux longitudinaux, orientés selon l'axe de la tige, on voit sur la (Figure 1-17) 1 que les valeurs de conductivité mesurées par Cérézo sont situées entre les deux valeurs de conductivité horizontale et verticale de Nguyen. Cela confirme l'hypothèse formulée précédemment, selon laquelle les particules resteraient réparties aléatoirement dans le cas d'un compactage de faible intensité.

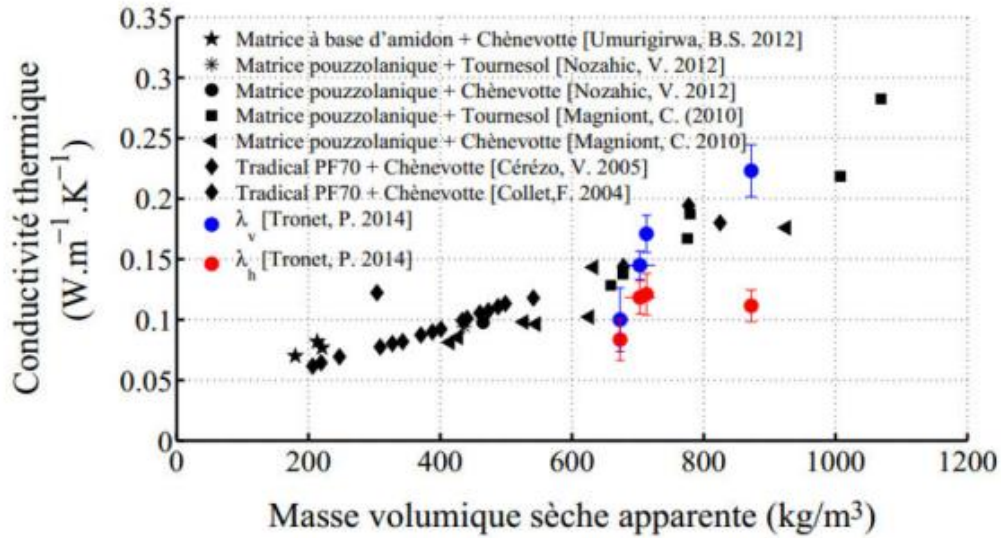


Figure 1-16 : Valeurs des conductivités thermiques des formulations de la littérature (Tronet, 2013).

Nguyen a remarqué que l'effet négatif engendré sur les performances thermiques du béton de chanvre suite au compactage, peut être compensé par une amélioration des propriétés mécaniques. Nguyen explique par exemple que, pour des rapports L/G et E/L fixés, lorsqu'il augmente la masse volumique initiale de 439 à 634  $\text{kg}/\text{m}^3$ , la résistance en compression augmente de 136% tandis que la conductivité thermique dans le même temps n'augmente que de 40%.

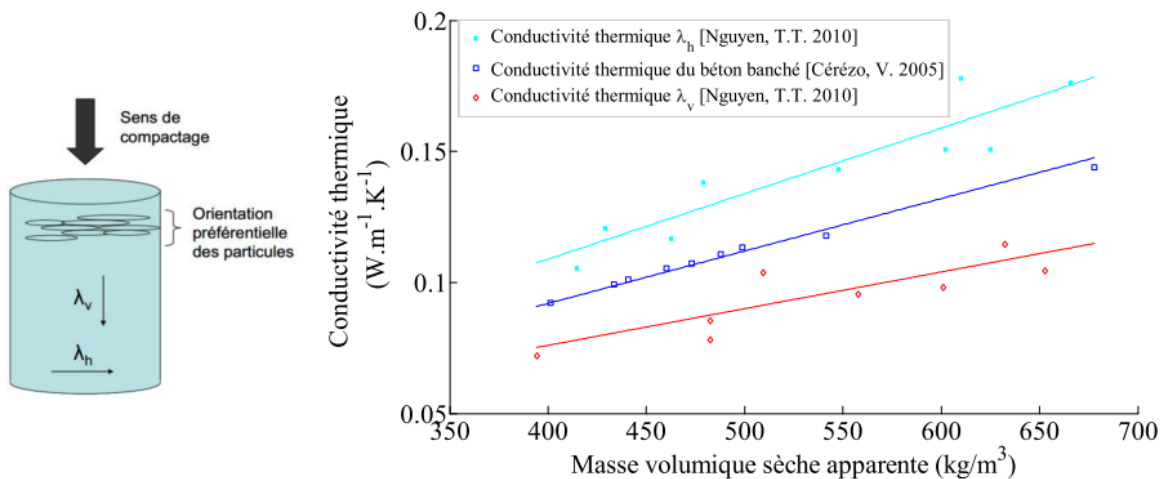


Figure 1-17 : influence de l'orientation préférentielle des particules de chènevotte sur la conductivité thermique (Magniont, 2010)

Nozahic (Nozahic, Amziane, Torrent, Saïdi, & Baynast, 2012) a montré aussi une orthotropie macroscopique du matériau sur des blocs de béton de chanvre et de tournesol. Il constate que la conductivité thermique dans les plans horizontaux est supérieure à la conductivité thermique dans les plans verticaux d'environ 10%. Il confirme que l'anisotropie est induite par les contraintes de compactage.

## **1.5 Propriétés mécaniques de béton de chanvre**

Dans la littérature, les études sur les propriétés mécaniques du béton de chanvre portent essentiellement sur la compression simple et la compression cyclique, et plus rarement sur des essais de flexion sur plaque. Nous pouvons noter l'absence de recherche sur d'autres propriétés mécaniques comme l'essai de cisaillement pur ou de cisaillement combiné. Très peu de résultats d'essais portent sur des blocs de béton de chanvre réels. Nous pouvons aussi noter l'absence de modélisation du comportement mécanique du béton de chanvre et l'absence de normalisation dans les codes de construction.

### **1.5.1 Compression simple**

La résistance du béton de chanvre en compression simple est très faible par rapport à celle des matériaux de construction habituels. La résistance à la compression de ce matériau est généralement inférieure à 2 MPa. (Elfordy et al. 2008, Bütschi et al., 2004, Eires et al. 2006). Ces valeurs de résistance, associées à un faible module d'élasticité, ne sont pas suffisantes pour en faire un matériau porteur pour le bâtiment. Cette raison fait qu'actuellement le béton de chanvre est utilisé en doublage ou en remplissage pour constituer un élément de construction présentant une bonne isolation thermique et phonique, sans apport structurel.

La résistance à la compression du béton de chanvre varie en fonction de la composition du mélange et du liant employé. Beaucoup de recherches ont été menées sur ce sujet.

#### ***1.5.1.1 Evolution de la résistance dans le temps et durabilité***

Walker (Walker et al. 2014) a étudié l'effet du type de liant sur la résistance mécanique et la durabilité (résistance au gel-dégel, exposition au sel et biodégradabilité). Il compare les bétons de chanvre à base de chaux hydratée et pouzzolane à un béton de chanvre dont le liant est du ciment hydraulique. Il a trouvé que la résistance à la compression se développe principalement entre 5 et 28 jours en raison du séchage et de l'hydratation (Figure 1–18), et qu'au début des âges de maturation, le liant commercial avec la plus grande hydraulicité de liant affiche la plus grande résistance. Cependant, du au vieillissement du béton, et à d'autres facteurs tels que la carbonatation contribuant à l'augmentation de la résistance, les bétons à base de chaux et de pouzzolane ou de ciment hydraulique atteignent à 1 an une résistance similaire (Walker et al. 2014).

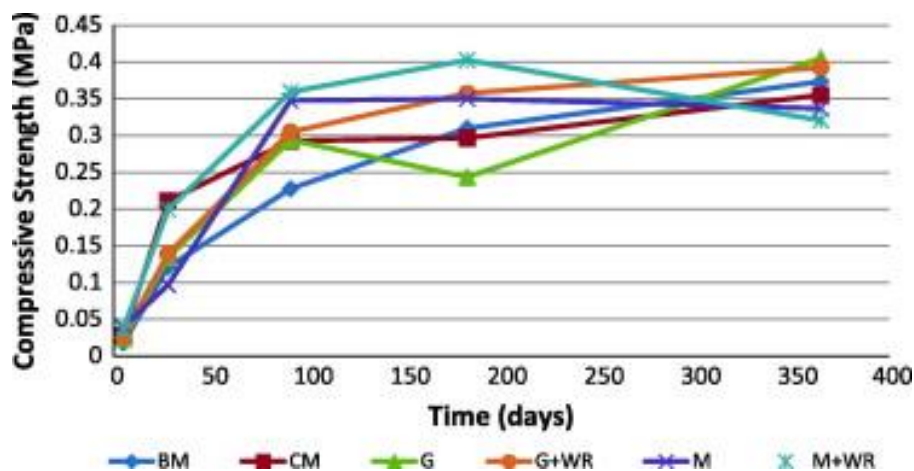


Figure 1–18: Résistance en fonction du temps de plusieurs types de bétons de chanvre avec des divers liants (BM : mélange de constructeur; CM : mélange commercial; G : GGBS (pouzzolanes); G + WR : GGBS liant avec retenue d'eau; M : mélange de Métakaolin; M + WR : Métakaolin avec rétention d'eau). (Walker 2014)

### 1.5.1.2 Anisotropie du comportement à la compression

Nozahic (Nozahic et al. 2012) a conçu un liant de pierre ponce et de chaux calcique CL90, dans le but de recourir autant que possible à des matières premières locales, et de concevoir un béton constitué d'agrégats d'origine végétale.

Il a montré que pendant le compactage, les particules s'orientent de façon préférentielle dans la direction perpendiculaire au sens de compression, ce qui conduit à l'augmentation de la résistance à la compression dans le sens de compactage des éprouvettes. Lorsque la résistance à la compression est mesurée dans le sens parallèle à l'orientation des particules, les résultats montrent une rigidité plus importante mais une résistance plus faible que dans l'autre direction (Figure 1–19).

Deux hypothèses pourraient expliquer la ductilité plus importante dans le sens de compaction: la première est que les particules végétales se sont écrasées et se sont tassées ce qui conduit à des déformations importantes, tandis que la deuxième hypothèse suppose que l'interface qui entoure les particules n'est pas parfaite et qu'elle contient des cavités et/ou du liant pulvérulent dans la zone dite de transition d'interface entre les particules de chènevotte et le liant durci (Nozahic et al. 2012).



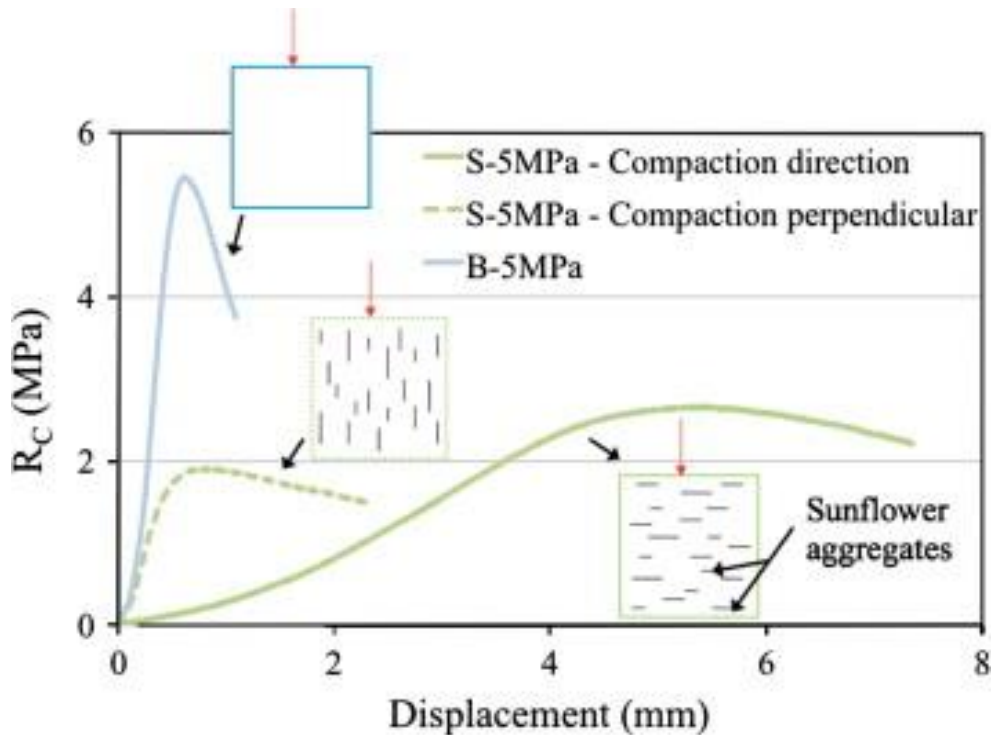


Figure 1–19 : Comportement mécanique par rapport au liant dans deux sens de compactage (parelle et perpendiculaire) (Nozahic 2012).

### 1.5.2 Comportement en flexion

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 et al. 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/m<sup>3</sup> (Bütschi et al. 2004, Elfordy et al. 2008). Notons que les valeurs dans ces études sont obtenues au cours d’essai de flexion 3 points.

Walker et al. (Walker et al. 2014) ont eux aussi étudié la résistance en flexion du béton de chanvre (Figure 1–20). Ils observent globalement peu d’évolution de la résistance en flexion dans le temps (Tableau 1- 4).



Figure 1–20: Essai sur le béton de chanvre en flexion (Walker 2014).

Nom	Résistance en flexion en 3 mois (MPa)	Résistance en flexion en 1 an (MPa)
Builder's mix	0,12	0,13
Commercial mix	0,11	0,19
GGBS (pouzzolane)	0,09	0,14
GGBS + WR	0,13	0,2
Metakaolin	0,06	0,1
Metakaolin	0,11	0,14

Tableau 1-4: La résistance en flexion de béton de chanvre d'âge 3mois et 1 an (Walker 2014).

## 1.6 Béton de chanvre associé à une structure bois

A ce jour, une seule étude sur l'association structure bois / béton de chanvre a été publiée (Munoz et Pipet 2013). Il s'agissait de tester la participation au contreventement du béton de chanvre à la résistance au cisaillement dans un mur ossature bois avec remplissage des alvéoles en béton de chanvre (Figure 1–21). Un mur d'ossature bois avec écharpes de contreventement bois alvéoles vides, (Figure 1–22) était lui aussi testé dans les mêmes conditions à titre de comparaison.

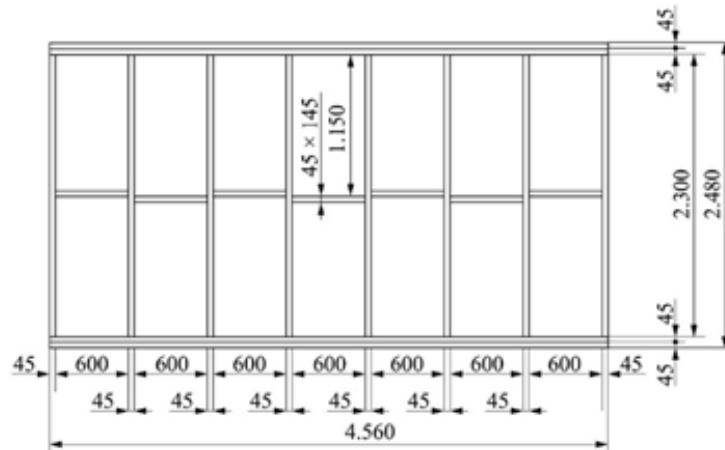


Figure 1-21: élévation de l'ossature avec remplissage béton de chanvre, (Amziane et al. 2013).

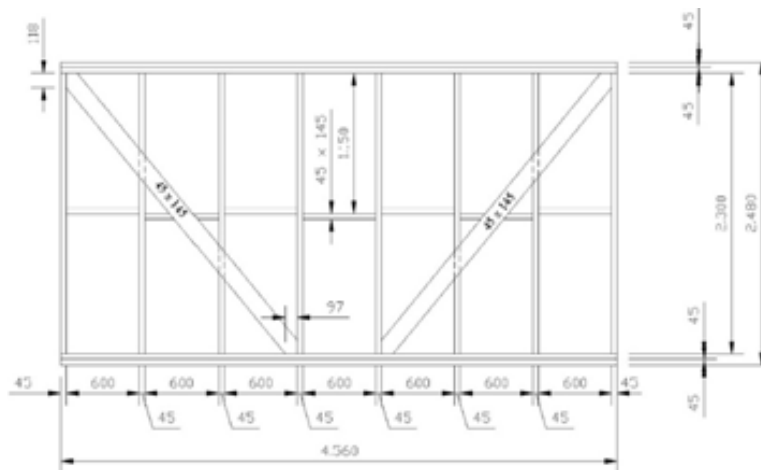


Figure 1-22 : élévation de l'ossature avec contreventement bois, (Amziane et al. 2013).

Le béton de chanvre, âgé d'un an à la réalisation de l'essai, était mis en œuvre par banchage type application « mur » avec un dosage en liant de 220kg/m<sup>3</sup> et une masse volumique apparente de 300 à 350kg/m<sup>3</sup>. Selon les recommandations professionnelles de c en c (construire en chanvre), les résultats des tests (Figure 1-23) montrent que le panneau avec béton de chanvre affiche une résistance et une rigidité bien plus importantes que le panneau de bois. Le vérin a atteint sa capacité maximale (50kN) sans que survienne une rupture brutale comme cela a pu être le cas pour le panneau de contreventement en bois.

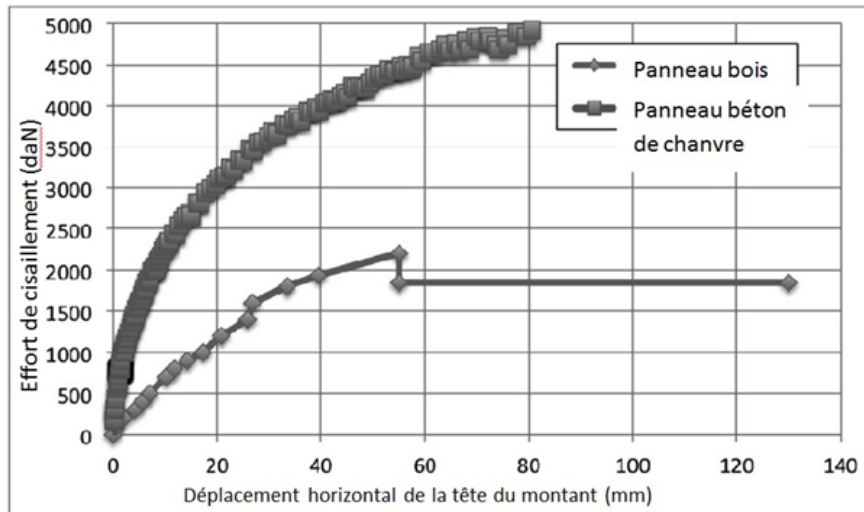


Figure 1–23: diagramme effort-déplacement des 2 panneaux testés, (Amziane et al. 2013).

Les résultats de cette étude présentent un intérêt évident pour la promotion du béton de chanvre. La réalisation d’essais de cisaillement directement sur les mélanges chaux/chanvre paraît nécessaire pour mieux comprendre ces résultats à l’échelle de la structure.

### 1.7 Modélisation du comportement du béton de chanvre

Le béton de chanvre et plus généralement les bétons à base de matériaux agro-sourcés ont fait l’objet ces dernières années d’un certain nombre de publications dans des journaux. Ces publications ne proposent pas de modèles de comportement pour ces matériaux. Il a donc fallu se tourner vers des ouvrages de références (Besson, Cailletaud, Chaboche, & Forest, 2001) pour réfléchir à la manière dont on peut prendre en compte le comportement singulier du béton de chanvre (non-linéarité et grande capacité de déformation). De plus, cette revue bibliographique a révélé un manque de connaissance du comportement de ce matériau en cisaillement ou sous contrainte déviatoire. Le comportement mécanique, qui est très différent de celui des matériaux de structures classiques (aluminium, acier, béton, béton armé) ne peut pas être traité comme les matériaux classiques dans les Eurocodes ou autres textes réglementaires en vigueur.

Pour réfléchir à la manière dont on peut prendre en compte le comportement singulier du béton de chanvre et afin de développer ce matériau, il est nécessaire d’effectuer des études approfondies qui permettront de déterminer une loi de comportement pour avoir un comportement mécanique satisfaisant. A terme, des normes ainsi que des procédés de construction fiables devraient voir le jour.

Les aspects macroscopiques à prendre en compte sont l’irréversibilité et la non- linéarité en grande déformation. On peut penser qu’un modèle élasto-endommageable en grandes

déformations sera à privilégier. Nous avons recherché les modèles existants pour d'autres matériaux, susceptibles de caractériser le comportement du béton de chanvre. Le comportement des mélanges chaux/chanvre s'apparente à celui des mousses polymères ou métalliques, ou encore au comportement de bois très légers comme le balsa. La (Figure 1–24) montre le comportement d'une mousse métallique en compression. On peut remarquer une zone élastique, puis une zone d'écroutissage pendant laquelle les parois des cellules se déforment plastiquement et enfin une troisième zone dans laquelle la densification aboutit à mettre en contact les parois entre elles, ce qui conduit rapidement à une augmentation de la résistance en compression.

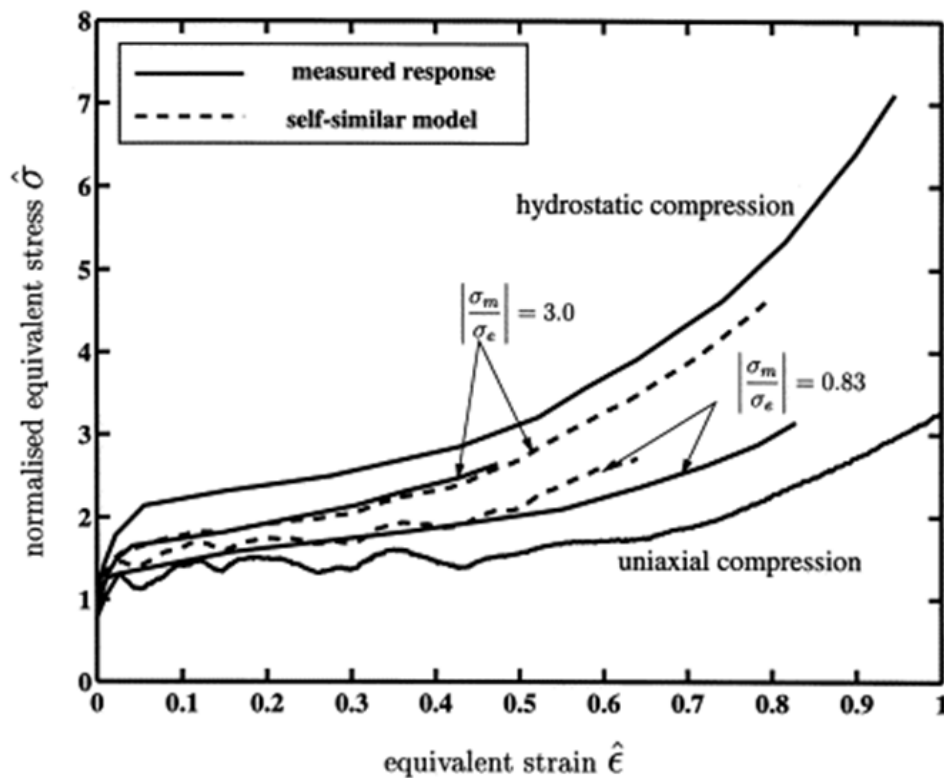


Figure 1–24 Courbe typique (contrainte-déformation) pour les mousses métalliques en compression (Deshpande & Fleck 2000).

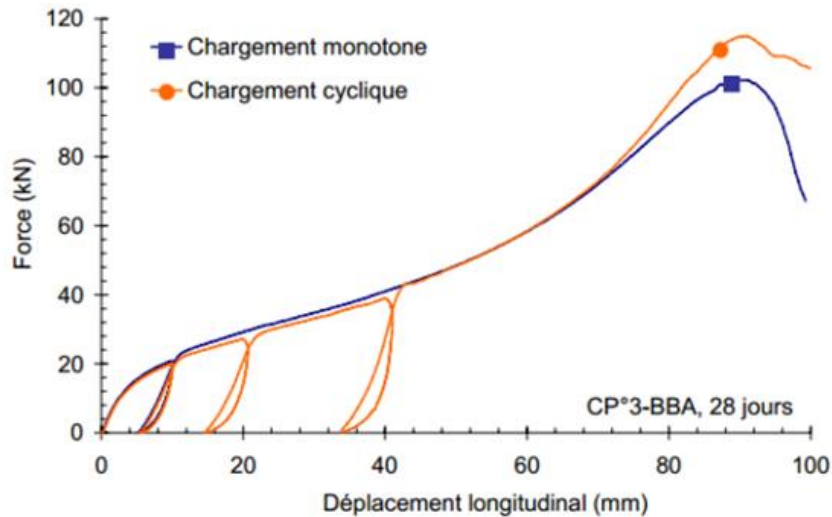


Figure 1–25 : comportement mécanique en compression du béton de chanvre (Nguyen 2010).

Les (Figure 1–24, Figure 1–25) présentent une forme de courbe similaire pour une mousse métallique comme pour un béton de chanvre compacté.

Le comportement de notre matériau pourrait être modélisé en utilisant les mêmes outils que pour les mousses métalliques. Les deux ouvrages qui font référence sur ces matériaux sont Cellular Solids (Gibson & Ashby 1999), et Metal Foams (Ashby et al., 2000).

L'approche mécanique de Ashby (1999) est fondée sur l'étude d'une cellule de type nid d'abeille (Honey Comb) sollicitée par traction, flexion, compression et flambement. Cette approche semble éloignée de nos matériaux par la géométrie utilisée, et quelque peu simpliste. Pourtant, elle permet d'obtenir des courbes fortement similaires aux courbes de compression simple de nos mélanges chaux/chanvre.

Ashby (Ashby et al., 2000) in Metal Foams reprend l'article de Deshpande & Fleck (2000) qui présente deux modèles pour les mousses métalliques. Un de ces modèles est intitulé « modèle auto-similaire ». C'est un modèle avec écrouissage isotrope, et non linéaire. En fait, il est alimenté par deux essais : un essai de compression simple (contrainte moyenne  $\sigma_m = \sigma_{11}/3$  et contrainte déviatoire  $\sigma_e = \sigma_{11}$ ) et un essai de compression hydrostatique (contrainte moyenne  $\sigma_m = P$  et contrainte déviatoire  $\sigma_e = 0$ ). Les auteurs proposent, entre autres, de décrire le comportement d'écrouissage des mousses testées comme une combinaison de type 'loi des mélanges' entre la partie déviatorique et la partie hydrostatique de chaque chargement considéré.

### 1.7.1 Essai triaxial de Fleck

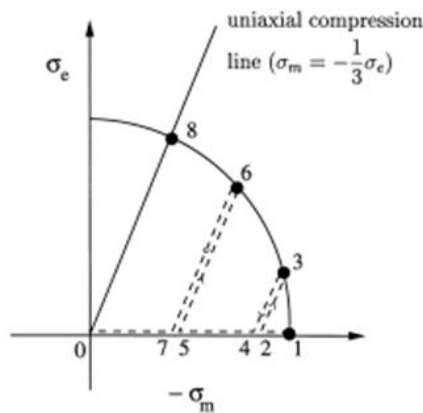


Figure 1-26 : définir la surface de charge (Deshpande & Fleck 2000).

Deshpande & Fleck (2000) effectuent des essais sur des mousses métalliques en cellule triaxiale suivant le trajet de chargement décrit (Figure 1-26). Les auteurs définissent une surface de charge initiale correspondant à une déformation axiale de 0.3% : Du point 0 au point 1, chargement hydrostatique jusqu'à 0.3% de déformation axiale ; du point 1 au point 2 : décharge de 0,1 MPa ; de 2 à 3 : chargement déviatoire avec ( $\sigma_m = 1/3 \sigma_e$ ) jusqu'à 0.3% de déformation axiale, etc. Les auteurs mesurent ensuite l'évolution de la surface de charge avec la déformation (Figure 1-27). On remarque que les surfaces de charge évoluent différemment suivant le type de chargement (hydrostatique ou uniaxial)

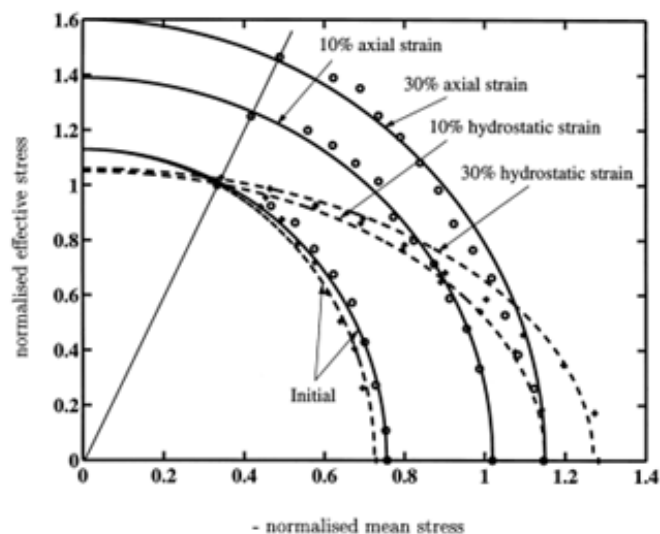


Figure 1-27 : Evolution de la surface de charge de la mousse métallique sous une charge uniaxiale et hydrostatique ((Deshpande & Fleck 2000).

La surface de charge a été formulée en prenant en compte les contraintes moyennes  $\sigma_m$  et  $\sigma_e$  selon le critère de Green (Green, 1972) :

$$\Phi \equiv \hat{\sigma} - Y \leq 0$$

Où :

$$\hat{\sigma}^2 \equiv \frac{1}{[1 + (\alpha/3)^2]} [\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2]$$

$\alpha$  : rapport d'aspect de l'ellipse formant la surface de charge.

La loi d'érouissage s'écrit :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{Y}}{H} = \frac{\dot{\hat{\sigma}}}{H}$$

Où :

$H$  : est le module d'érouissage pour un chargement donné défini en fonction du trajet de chargement et des modules d'érouissage  $h_\sigma$  et  $h_p$  suivant cette équation :

$$H = \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}} h_\sigma + \left(1 - \frac{\sigma_e}{\hat{\sigma}}\right) h_p$$

Où :

$h_\sigma$  : est le module d'érouissage en compression simple (identifié suivant les essais de compression simple).

$h_p$  : est le module d'érouissage en compression hydrostatique (identifié suivant les essais de compression hydrostatique).

$\hat{\sigma}$  : est la contrainte équivalente

$\dot{\epsilon}$  : est la vitesse de déformation équivalente

L'identification de  $h_\sigma$  et  $h_p$  est basée sur des courbes expérimentales (pas de formulation analytique proposée). Ce module  $H$  dépend donc à la fois de la contrainte (non linéaire) et du déviateur des contraintes.

Les modèles développés dans la littérature pour des chemins de chargements tridimensionnels nécessitent donc au minimum deux essais : compression simple et compression hydrostatique. Concernant les mélanges chaux/chanvre, la compression simple a été largement et quasi exclusivement étudiée. L'un des axes de ce travail de thèse est aussi d'étudier l'apport de ce



type de matériau du point de vue du cisaillement. Nous proposerons donc de développer un modèle de comportement avec la même philosophie que (Deshpande & Fleck 2000), mais sur la base d'essais de compression simple et de cisaillement.

## **1.8 Formulation des mélanges chaux/chanvre**

Actuellement, le béton de chanvre est principalement utilisé en combinaison avec une ossature bois ou en couche projetée sur un mur porteur traditionnel afin d'assurer une isolation thermique et / ou acoustique. Selon sa composition, il peut aussi être utilisé dans les planchers et les toitures. En outre, la plupart des travaux de recherche sur ce matériau ont été centrés sur ses propriétés thermiques, hygrothermiques et acoustiques.

De très nombreux travaux ont testé des formulations avec des granulats végétaux et des liants minéraux différents, en faisant varier les proportions de chaque composant. L'association « construire en chanvre » a proposé des règles constructives dans lesquelles sont indiquées des formulations en fonction de l'application souhaitée. La (Figure1–28) présente plusieurs compositions. On y retrouve les préconisations de l'association « construire en chanvre », les formulations étudiées par l'ENTPE (Association construire en chanvre 2007 ), celles étudiées lors de la thèse de (Nguyen 2010), et les formulations M1 et M4 étudiées dans nos travaux. Ces deux formulations ont été tirées de la thèse de (Tronet 2014).

Ces deux formulations M1, M4 présentent deux cas extrêmes en module d'Young et en limite d'élasticité : la formulation M4 est plus rigide et plus résistante, tandis que la formulation M1 a des valeurs de module d'Young et de contrainte à la rupture plus faible.

On peut observer que la formulation M4 a une très forte concentration en chènevotte par rapport au reste des formulations couramment utilisées. L'objectif est d'étudier l'influence du compactage et l'effet lié à la substitution de la pâte de liant par de la chènevotte.

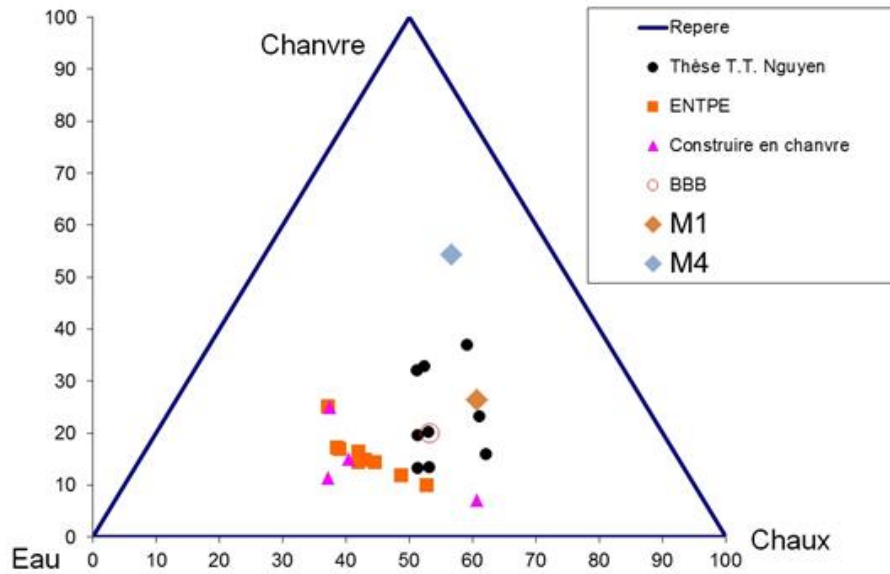


Figure 1-28 : diagramme ternaire des formulations étudiées (Pham, 2014).

La formulation M1 est peu compactée et avec une quantité de chaux conséquente, tandis que M4 est très compactée, avec peu de chaux et est plus riche en chènevotte tout en gardant le pourcentage Eau / Chaux ( $E/L = 0,55$  pour les deux formulations M1 et M4). La formulation M1 est plus coûteuse en termes de matières premières à cause du taux élevé de chaux, mais au niveau du procédé de compactage, elle impose moins de contraintes. La chènevotte utilisée pour cette campagne d'essai est de la marque « Kanabat » en provenance de la chanvrière de l'Aube.

Formulations	Chènevotte (g)	Liant (g)	Eau (ml)	E/L	L/G	Masse volumique à l'état frais ( $Kg/m^3$ )
M4	500	270	149	0,55	0,54	920
M1	215	387	213	0,55	1,80	816
Chanvribloc	?	?	?	?	?	?

Tableau 1-5: composition des formulations M1, M4 étudiées selon Tronet (Tronet 2014).

Ces formulations ont donc un E/L (rapport eau sur liant) constant de 0,55, et seul le rapport L/G (liant sur granulat) varie. Ces formulations testées dans la thèse de P.Tronet représentent les deux extrémités de la plage de bétons de chanvre densifiés.

Pour compléter les essais, une étude a été prévue sur des blocs préfabriqués, «Chanvribloc» (Figure 1–29), afin d’effectuer une comparaison avec nos formulations.

La composition de la formulation des «Chanvribloc» est inconnue (secret industriel). Nous ne connaissons pas non plus la date de réalisation de ces blocs. Il convient donc de garder un œil critique sur les résultats obtenus à partir de ces blocs. Nous avons mesuré leur masse volumique à l’état durci ; elle est de l’ordre de  $340 \text{ kg/m}^3$ .



Figure 1–29: Bloc préfabriqué, « Chanvribloc» (20\*30\*60 cm).

Ces blocs n’ont pas été compactés sous presse lors de leur confection et les macroporosités inter-granulaires sont très présentes. En général ce type de bloc est réalisé par moulage et vibration.

## 1.9 Conclusion

Toutes les recherches précédentes ont porté sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de chanvre. Les études sur les propriétés physiques ont concerné : la granulométrie, l’absorption d’eau, l’influence du procédé de compactage, les formulations (influence du type et de la quantité de liant, et de granulats avec des chènevottes fibrées ou non, du rapport massique Eau / Liant (E/L) ou Liant / Granulat L/G, des adjuvants, ...), la résistance mécanique et les propriétés thermiques et hydriques.

En ce qui concerne l’étude des propriétés mécaniques, les recherches ont porté uniquement sur : la compression simple (monotone et cyclique), la résistance à la flexion. En revanche, il n’existe pas ou très peu de travaux sur d’autres propriétés mécaniques comme la résistance au

cisaillement et l'anisotropie de comportement des blocs compactés et moulés. Nous pouvons aussi noter l'absence de modélisation du comportement du béton de chanvre et de normalisation dans les codes de construction. Il est donc nécessaire d'effectuer des études approfondies dans ce domaine afin de développer l'usage de ce matériau. Ce sera l'un de nos objectifs durant cette étude de thèse.

Actuellement, le béton de chanvre n'est pas encore utilisé comme un matériau porteur ou autoporteur. Une ossature est nécessaire pour intégrer le béton de chanvre. Le compactage peut aider à augmenter la résistance en compression du béton de chanvre.

Le béton de chanvre est un matériau fortement hétérogène, et il convient donc de toujours garder cela à l'esprit pour bien appréhender son comportement mécanique. Le comportement en compression du béton de chanvre varie en fonction son dosage en liant. Si le matériau contient moins de liant, en compensant ce manque de liant par une compression à l'état frais (Nguyen, et al. 2009, Tronet, et al., 2011), un comportement beaucoup plus ductile du matériau durci est obtenu, avec une phase élastique, une phase de transition, une partie plastique à faible pente (écrouissage) et une dernière partie avec une augmentation plus rapide de la contrainte (densification).

Le granulats végétal est fortement compressible, c'est-à-dire qu'il a une grande capacité de déformation. Sa ductilité permet de penser que ce matériau est particulièrement adapté en zone sismique. Le compactage à l'état frais permet d'augmenter la densité de granulats au sein du matériau jusqu'à  $500 \text{ kg/m}^3$ .

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, pour un pourcentage de chènevottes suffisant, et il est susceptible de subir de 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.

On peut donc voir le béton de chanvre densifié adopter une structure stratifiée et du même coup un comportement isotrope transverse. Ces observations nous permettent de définir les directions de sollicitations pour nos essais mécaniques.

Nos éprouvettes étant cylindriques, il existe 2 directions principales dans lesquelles nous devons effectuer nos mesures, la première étant parallèle au sens de compactage et l'autre orthogonale au sens de compactage.



## **Chapitre 2. Partie expérimentale**



## 2.1 Introduction

Comme évoqué dans le chapitre précédent, du fait de sa composition le béton de chanvre est un matériau hétérogène. Nguyen (Nguyen et al. 2009) ont démontré que plus un matériau est dense et possède une teneur en chènevotte élevée, plus son comportement a tendance à ressembler à celui d'une mousse polymère ou à celui d'un bois de faible densité. Partant de ces observations, nous avons développé un protocole expérimental pour caractériser ces matériaux en compression.

L'essai le plus couramment répandu en raison de sa mise en œuvre expérimentale et permettant de caractériser mécaniquement les matériaux de construction à base de liant minéral est celui de la compression simple. La géométrie des éprouvettes, de type cubique ou cylindrique, est similaire à celles utilisées pour des essais sur roches ou sur bétons classiques.

Ce deuxième chapitre décrit les différentes formulations étudiées. Il présente les procédés de mise en œuvre par compactage qui ont permis d'élaborer les échantillons ainsi que les dispositifs et protocoles expérimentaux réalisés.

Dans cette étude, un premier temps, nous avons souhaité comparer deux formulations issues de la thèse de Tronet (Tronet 2013) nommés M1 et M4 avec une formulation issue d'un bloc du commerce, de dénomination commerciale Chanvribloc<sup>®</sup>.

Nozahic et al. (Nozahic 2012) ayant démontré que les blocs compactés de bétons à base de bio-granulats ont un comportement mécanique anisotrope, nous chercherons dans un premier temps à mesurer le degré d'anisotropie en compression, puis nous étudierons les différences induites par le compactage.

En effet, le compactage induit une orientation des particules de chènevotte en couches. Ces couches forment des plans perpendiculaires à la direction de compactage. Dans ces plans les fibres sont orientées de manière aléatoire. Le comportement du matériau est donc isotrope transverse.

Dans un second temps, nous chercherons à caractériser le comportement au cisaillement de différentes formulations, afin d'évaluer ses propriétés intrinsèques qui pourraient être intéressantes dans le domaine de la construction (capacité à assurer le contreventement de certaines structures ou encore à dissiper de l'énergie en réponse à un chargement sismique).

Nous établirons un plan d'expériences pour des essais de compression simple et de cisaillement, qui permettra d'étudier les paramètres influents et donnera lieu à une analyse étendue des données expérimentales.



## 2.2 Elaboration des éprouvettes

### 2.2.1 Mise en œuvre des formulations

#### 2.2.1.1 Composition des formulations

Les formulations élaborées au sein du laboratoire sont nommées M1 et M4. Des échantillons cylindriques de Ø 100 mm pour une hauteur de 200 mm sont réalisés.

La préparation des éprouvettes se fait à partir des compositions suivantes décrites dans le (Tableau 2-1).

Formulations	Chènevotte (g) notée « G »	Liant (g) noté « L »	Eau (ml) notée « E »	Rapport E/L	Rapport L/G (S.U)	Masse volumique à l'état frais (kg/m <sup>3</sup> )
M4	500	270	149	0,55	0,54	920
M1	215	387	213	0,55	1,80	816

Tableau 2-1: Composition des formulations M1 et M4 étudiées selon Tronet (Tronet 2013)

Le rapport « eau sur liant », noté par la suite « E/L » est identique pour les deux formulations.

Le rapport « liant sur granulat » noté par la suite « L/G » est directement lié à la masse volumique et est donc, de manière logique, différent pour les deux formulations.

Compte tenu du caractère industriel du Chanvribloc<sup>®</sup>, le dosage de celui-ci ainsi que son protocole de fabrication ne sont pas accessibles. L'unique donnée que l'on puisse tirer de ce matériau est la masse volumique à l'état durci, quantifiée à 340 kg/m<sup>3</sup>.

On observe que le Chanvribloc<sup>®</sup> est plus léger et moins dense que les formulations M1 et M4

#### 2.2.1.2 Réalisation des échantillons

Lors de la première étape, le liant et les particules de chènevottes sont placés dans une enceinte à étuve ventilée, à une température contrôlée de 70°C, pour l'élimination maximale de l'humidité qu'ils contiennent, jusqu'à masse constante. La (Figure 2-1) image cette étape.



Figure 2-1: Etuvage des matériaux constitutifs

La préparation du mélange à l'aide d'un mélangeur de marque HOBART (gamme LEGACY HL200 MIXER) présenté en figure (Figure 2-2) se fait lors d'une seconde étape. Le batteur mélange les composants suivant une rotation épicycloïdale de 59 tr/min maximum et d'un déplacement circulaire de 33 tr/min maximum.

Le processus de malaxage se déroule en deux phases. La première consiste à introduire les particules de chènevottes dans l'eau pendant 5 minutes à une vitesse lente afin que la plus grande quantité d'eau soit absorbée. On introduit dans une seconde phase le liant également pendant 5 minutes à vitesse lente. La chaux enveloppe alors les particules de chènevottes qui sont encore humides. Le mélange obtenu est comprimé dans une matrice cylindrique via la presse électromécanique Zwick/Roell HB-T 250.



Figure 2-2 : Batteur mélangeur Hobart.

Pour la formulation M4, le mélange paraît sec à cause de la grande quantité de chènevottes qui absorbe en totalité l'eau de gâchage. Le matériau après mélange présente un comportement pulvérulent. En effet, on compte sur l'énergie mécanique de compactage pour que cette eau absorbée soit restituée afin de permettre l'hydratation du liant.

### *2.2.1.3 Protocole de mise en œuvre des éprouvettes cylindriques*

Un dispositif spécifique a été dimensionné et utilisé pour la fabrication des éprouvettes cylindriques de béton de chanvre. La matrice utilisée est un tube cylindrique de hauteur 80 cm comprenant 2 taraudages pour le maintien des pistons à la position finale correspondant à une éprouvette de 200 mm de hauteur. Le diamètre des tubes étant de 100 mm, nous obtiendrons des éprouvettes de Ø100 x 200 mm (Figure 2-3).

Ces matrices et pistons sont auparavant nettoyés et huilés avant chaque utilisation, afin de minimiser les forces de frottement durant le compactage entre le granulat et la paroi du cylindre, et faciliter le démoulage.

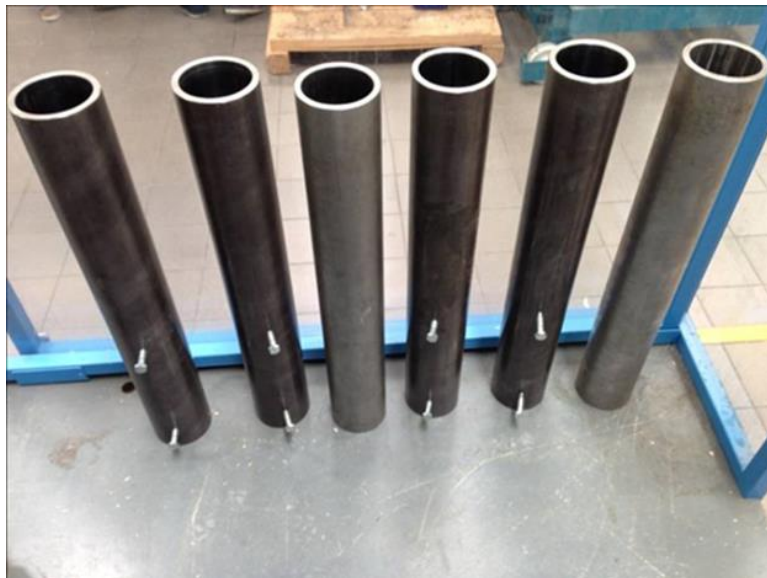


Figure 2-3 : Dispositif utilisé pour la fabrication des éprouvettes de béton de chanvre.

Après avoir malaxé la quantité donnée de la formulation souhaitée de béton de chanvre, et fixé le piston inférieur du tube, le mélange de la formulation à l'état frais est versé manuellement dedans. Nguyen et al. (Nguyen 2009) ont étudié l'effet du compactage à l'état frais et ont montré qu'une diminution significative du taux de porosité du matériau engendrait des gains de résistance mécanique. Avant de lancer le compactage, le piston supérieur et l'anneau de

centrage sont insérés dans le tube. Le compactage est piloté en mode manuel, ou asservi en déplacement en mode automatique. La compression se termine lorsque le piston arrive à la hauteur désirée. Le piston supérieur est alors bloqué par une vis de fixation.

Le compactage statique est exécuté par la presse électromécanique Zwick/Roell HB-T 250 (Figure 2-4), dont la capacité maximale est de 250 kN. Les granulats végétaux disposent d'une grande capacité de déformation et stockent cette énergie de déformation ; c'est la raison pour laquelle les éprouvettes restent confinées dans leurs moules pour un certain temps afin d'éviter des variations dimensionnelles lors du démoulage deux jours suffisent pour une éprouvette M1, tandis que les éprouvettes M4 sont laissées dans le moule pendant 3 jours au minimum. Ensuite, le démoulage se fait grâce à la presse Zwick/Roell HB-T 250. A l'issue du démoulage, les éprouvettes sont pesées, mesurées et stockées en atmosphère contrôlée (chambre humidifiée à  $20 \pm 2 \text{ C}^\circ$  et à  $75 \pm 5\%$  d'humidité relative) afin de limiter la compétition séchage/ hydratation de la chaux hydraulique durant les premiers jours de maturation (maturation de 28 jours minimum).

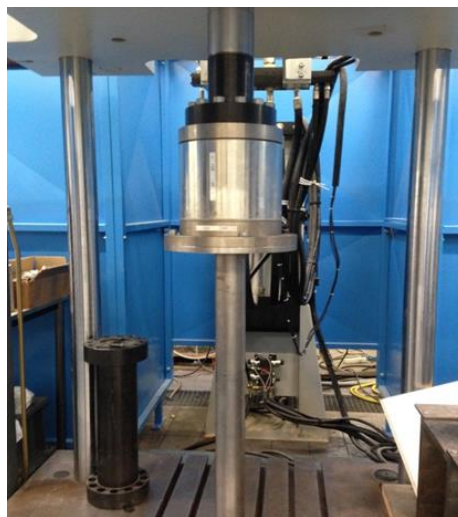


Figure 2-4 : la presse électromécanique Zwick/Roell HB-T 250.

Le gradient de compacité se traduit par des porosités visibles sur la partie inférieure des éprouvettes, ce qui n'est pas le cas sur la partie supérieure de l'éprouvette qui est en contact avec le piston mobile de la presse (Figure 2-5). Tronet (Tronet 2013) a montré que les frottements sur la paroi du moule provoquent une dissipation des contraintes de compactage sur la hauteur du moule. La partie de l'éprouvette en contact avec le poinçon supérieur (mobile) subit une pression de compaction plus élevée. Un gradient de pression décroissant à mesure de l'éloignement du poinçon est généralement observé dans les éprouvettes. Ceci induit également une plus forte conductivité thermique sur le haut des éprouvettes (en contact avec le poinçon) et une résistance mécanique plus faible sur la partie inférieure des éprouvettes (en fond de

moule) (Tronet 2013). Pour éviter ce phénomène, il faut utiliser deux pistons mobiles, malheureusement cette disposition n'est pas disponible dans notre laboratoire.



Figure 2-5 : Surface latérale d'une même éprouvette M1, à gauche partie inférieure, à droite partie supérieure.

Pour cette raison, et pour chaque formulation, nous distinguerons la partie haute et la partie basse de l'éprouvette. Les échantillons de nos essais de compression et de cisaillement seront découpés dans ces deux zones distinctes afin de mesurer l'hétérogénéité de comportement sur la hauteur de l'échantillon (Figure 2-6).



Figure 2-6 : La partie supérieure d'une éprouvette (H), Ø100 x 200 mm

La formulation M4 est confinée manuellement par un serre - joint lors de son stockage, afin d'éviter le retour élastique dû aux contraintes résiduelles dans l'éprouvette (Figure 2-7). En fait, la forte proportion de chanvre, et le faible rapport Liant/Granulat (L/G) de cette formulation (Tableau 2-2) (Tronet 2011) conduit à une augmentation de l'effort de compactage et du

tassement granulaire qui demande plus de temps de relaxation. La plus faible quantité de liant hydraté ne suffit pas à absorber les contraintes résiduelles dans l'éprouvette, ce qui conduit à ce phénomène de gonflement par retour élastique.



Figure 2-7 : Éprouvette M4 non confinée à gauche, éprouvette après confinement durant 3 jours à droite.

<i>Formulations</i>	<i>Granulat (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Liant (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i><math>\rho</math> initial (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>L/G</i>	<i>E/L</i>	<i>Contrainte Maximale (MPa)</i>
<i>M1</i>	215,3	387,5	213,2	816	1,80	0,55	7,9
<i>M4</i>	500	271	149	920	0,54	0,55	14,4

Tableau 2-2 : Tableau des compositions, et résistance mécanique, (Tronet et al. 2011)

#### **2.2.1.4 Protocole de mise en œuvre des éprouvettes cubiques**

La plupart des recherches précédentes sur le comportement mécanique du béton chanvre sont réalisées sur des éprouvettes cylindriques. Notre travail utilisera au contraire des éprouvettes cubiques extraites des éprouvettes cylindriques. Pour réaliser nos essais mécaniques ces cubes font 7 cm de côté, le maximum possible à partir d'un cylindre de 100 mm de diamètre. Chaque éprouvette cylindrique donne deux éprouvettes cubiques : un cube en partie supérieure (cube H) et un cube en partie basse (cube B), (Figure 2-8).

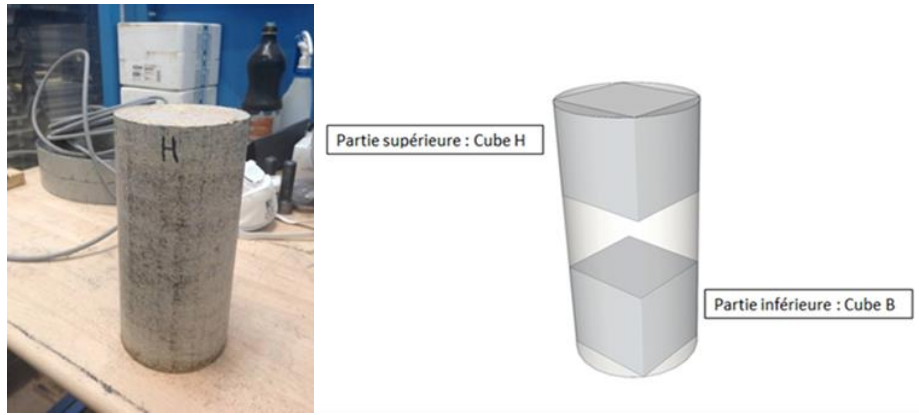


Figure 2-8 : Découpage des cubes à partir du cylindre.

Il est important que les surfaces du cube soient de la meilleure qualité possible afin de garantir les meilleurs résultats expérimentaux et leur reproductibilité.

Pour obtenir le meilleur état de surface possible sur les éprouvettes, nous avons opté pour une scie à ruban, où la vitesse de coupe est relativement lente et où l'espacement des dents environ de 3mm, (Figure 2-9), donne de bons résultats de parallélisme et d'état de surface. La (Figure 2-10) montre les éprouvettes ainsi obtenues. On constate un léger brunissement superficiel de l'éprouvette dans le cas du mélange M4, probablement dû à la plus forte présence de chènevotte, et à un échauffement par friction lors de la découpe.

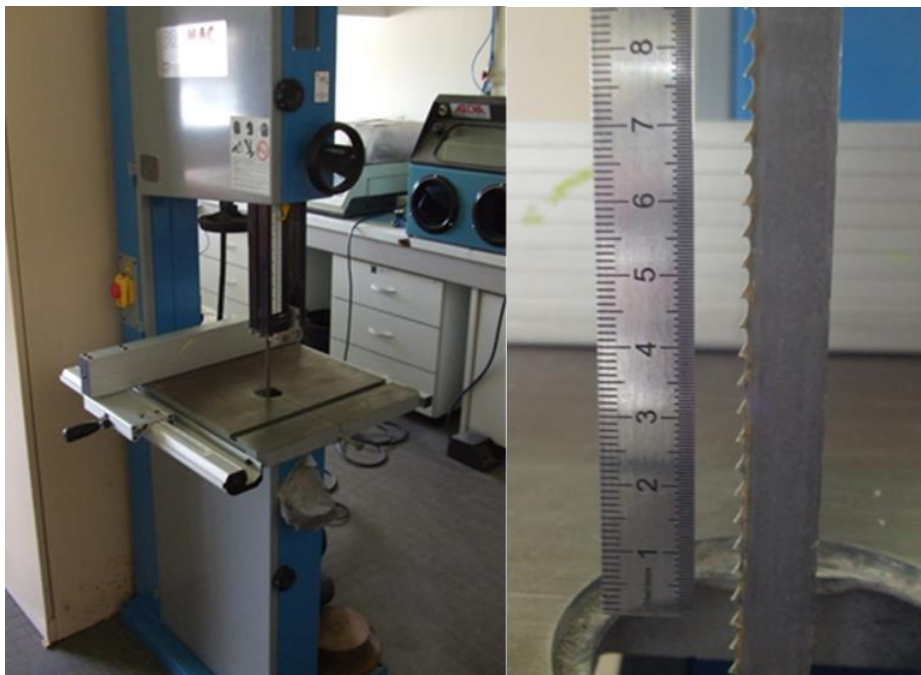


Figure 2-9 : Scie à ruban à gauche, grossissement lame à droite



Figure 2-10 : Cube M4 à gauche, M1 à droite (70\*70\*70 mm)

La découpe des échantillons à partir des blocs industriels s'est avérée plus délicate, du fait du faible état de compactage de ces blocs et de leur faible cohésion. (Figure 2-11)



Figure 2-11 : "Cube" réalisé à partir d'un bloc industriel (70\*70\*70 mm)

Après avoir prélevé les cubes, ils ont été pesés pour évaluer le gradient de compacité dans la hauteur des cylindres compactés. Le tableau (Tableau 2-3) montre les valeurs moyennes sur une quinzaine de cubes réalisés, pour chaque configuration (M1H, M1B, M4H, M4B).



Formulations	Section	Masse moyenne (g)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Rapport densité H/B
M1	H	225,41 ± 2,97	657,17 ± 8,67	1,158
	B	187,74 ± 7,21	564,28 ± 15,98	
M4	H	303,63 ± 6,51	869,86 ± 47,22	1,148
	B	259,85 ± 4,67	757,57 ± 13,6	

Tableau 2-3 : Les valeurs moyennes sur une quinzaine de cubes réalisés.

### 2.3 Caractérisation du comportement à la compression

Après avoir préparé les échantillons cubiques issus des formulations M1, M4 et Chanvribloc, pour la campagne de test de compression simple, il est nécessaire de caractériser la direction de sollicitation. (On distingue le sens de la sollicitation, par exemple traction ou compression, de la direction de sollicitation, axiale ou transverse par exemple). Le matériau étant anisotrope (et plus spécifiquement isotrope transverse), il faut étudier et comparer les résultats dans les deux directions principales pour caractériser l'anisotropie mécanique du matériau.

Au moment du compactage, les particules de chanvre ont tendance à s'orienter et à s'empiler en formant des plans orthogonaux à l'axe de compactage voir (Figure (12 2. Ces plans seront appelés par la suite « plans d'anisotropies ». Par conséquent l'axe de compactage sera nommé « axe d'isotropie »

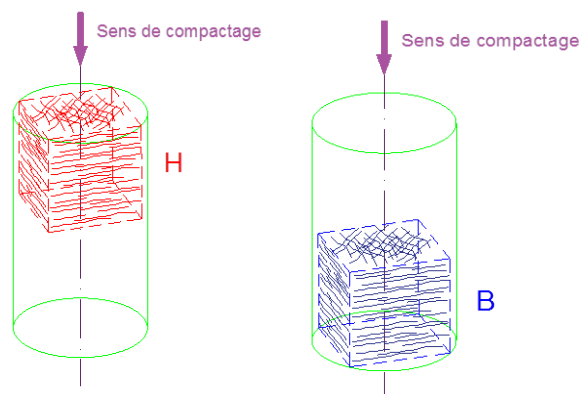


Figure 2-12 : Agencement des particules de chanvre au compactage.

Par la suite, deux séries de compression sont à effectuer pour étudier l'anisotropie du matériau dans les deux directions. Il y a deux directions de sollicitation différentes :

(C $\perp$ ) : Sollicitation en compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie, c'est-à-dire dans le même sens de compactage lors de la fabrication de l'éprouvette.

(C//) : Sollicitation en compression parallèle aux plans d'anisotropie, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire au sens de compactage lors de la fabrication de l'éprouvette (Figure 2-13).

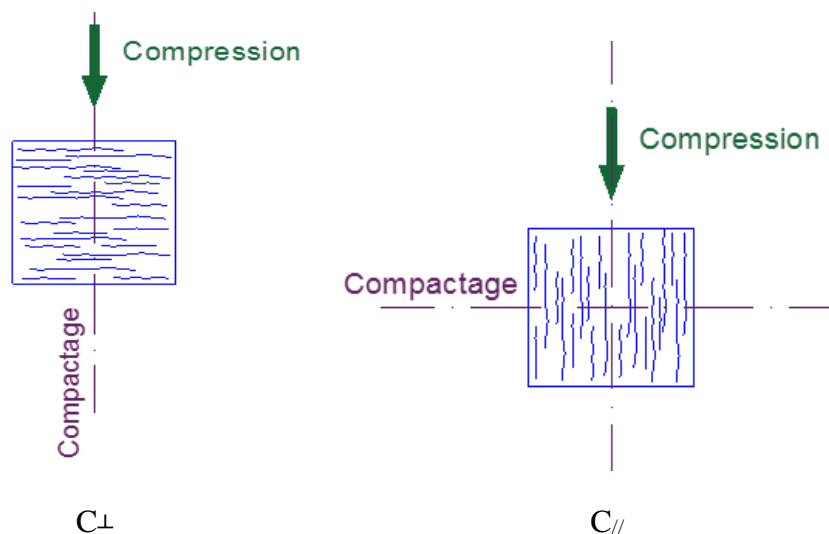


Figure 2-13: Les deux sens de sollicitation lors d'essai de compression simple, compression parallèle (C//), compression orthogonale (C $\perp$ ).

Grace au logiciel d'acquisition, les grandeurs caractéristiques mécaniques sont déduites de la mesure du déplacement axial de la traverse de la presse, de la mesure de la force appliquée par la traverse sur le haut de l'échantillon, et des valeurs données par les LVDT disposés sur l'éprouvette.

La contrainte  $\sigma$  peut être calculée suivant l'équation :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Où :

F : effort appliqué via la presse sur l'échantillon (N)

S : la surface réelle (mm<sup>2</sup>)

La déformation linéaire axiale vraie est calculée suivant :

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$

Où :

$l$  : La hauteur finale de l'éprouvette

$l_0$  : La hauteur initiale de l'éprouvette

Le béton de chanvre est un matériau hétérogène. Le mode opératoire du test de compression simple est tout à fait classique : l'éprouvette est centrée sur les plateaux de la presse, et des plaques de plastiques sont collées sur les faces latérales pour moyenner les déplacements transversaux mesurés par les capteurs LVDT (Figure 2-14).

Le plateau supérieur se place en contact avec l'éprouvette et l'essai est piloté en force (l'effort appliqué augmente régulièrement selon le paramètre entré, le déplacement du plateau supérieur s'adapte à cette contrainte).

Un capteur de déplacement à fil tendu a été disposé entre le bâti et la traverse pour mesurer le déplacement de la traverse (déplacement axial).

La nomenclature retenue pour cette campagne sera du type composition-section-sollicitation-numéro d'essai, par exemple M4BC $\perp$ 1, éprouvette M4, section inférieure (B), compression orthogonale aux plans d'anisotropie (C $\perp$ ), essai n°1. Pour obtenir une valeur représentative, on prévoit de réaliser chaque essai trois fois minimum.

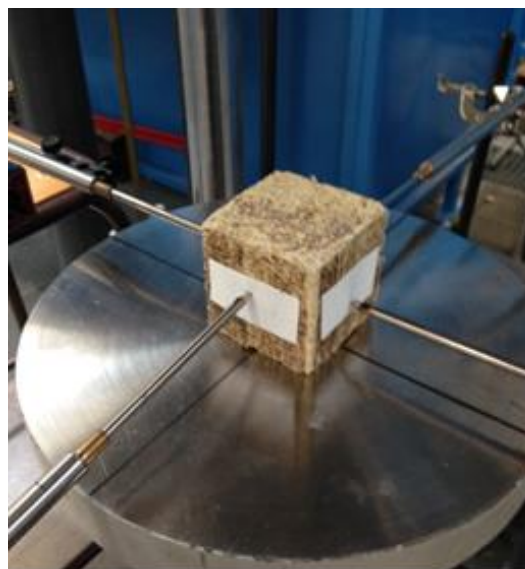


Figure 2-14 : dispositif de mesures par compression simple

Une série de tests de compression simple a été effectuée sur les échantillons cubiques de 7 cm fabriqués à partir de la formulation M1 dans les deux directions : Orthogonale ( $\perp$ ) et Parallèle ( $\parallel$ ) suivant le tableau voir (Tableau 2-4).

Référence indicée	Formulation	Zone d'enlèvement	Sens de l'effort de compression	Dimensions d'éprouvette (L*I*h)(mm)
M1.H.C $\perp$ .1	M1	H	Orthogonal	70x70x70
M1.H.C $\perp$ .2	M1	H	Orthogonal	70x70x70
M1.H.C $\perp$ .3	M1	H	Orthogonal	70x70x70
M1.H.C $\parallel$ .1	M1	H	Parallèle	70x70x70
M1.H.C $\parallel$ .2	M1	H	Parallèle	70x70x70
M1.H.C $\parallel$ .3	M1	H	Parallèle	70x70x70
M1.B.C $\perp$ .1	M1	B	Orthogonal	70x70x70
M1.B.C $\perp$ .2	M1	B	Orthogonal	70x70x70
M1.B.C $\perp$ .3	M1	B	Orthogonal	70x70x70
M1.B.C $\parallel$ .1	M1	B	Parallèle	70x70x70
M1.B.C $\parallel$ .2	M1	B	Parallèle	70x70x70
M1.B.C $\parallel$ .3	M1	B	Parallèle	70x70x70

Tableau 2-4 : Les essais de compression simple sur les éprouvettes de formulation M1.

Les mêmes tests ont été appliqués sur des éprouvettes M4 et sur des éprouvettes cubiques de Chanvribloc de 7 cm, 10 cm et 15 cm.

### 2.3.1 Comportement à la compression simple des bétons

Les bétons classiques, en fonction du dosage, des compositions et de la nature des renforts, peuvent montrer plusieurs types de comportement à la compression simple. Quatre formes de comportement sont généralement connues, allant d'un comportement très fragile à un comportement ductile (Figure 2-15) (Reynouard 2005). En général, les pâtes de chaux ont un

comportement moins fragile que les pâtes de ciment, et les particules de chènevette, polymère naturel, vont permettre d'augmenter encore la ductilité du mélange grâce à leur forte déformabilité (Tronet 2013).

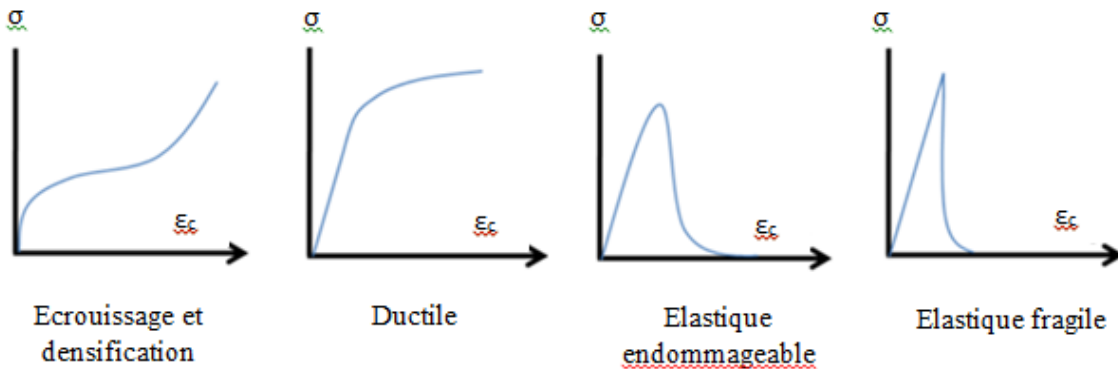


Figure 2-15 : Transition du comportement du béton : d'un comportement fragile à la ductilité (Reynouard, 2005).

Pour le béton de chanvre, on peut distinguer deux comportements en fonction du type d'essai de compression appliqué. Le cas de la compression perpendiculaire aux plans d'anisotropie ( $C\perp$ ), présente globalement un comportement plastique correspondant à un écrouissage, puis une densification très ductile où il n'apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte – déformation. On peut diviser cette courbe en quatre zones (Figure 2-16)

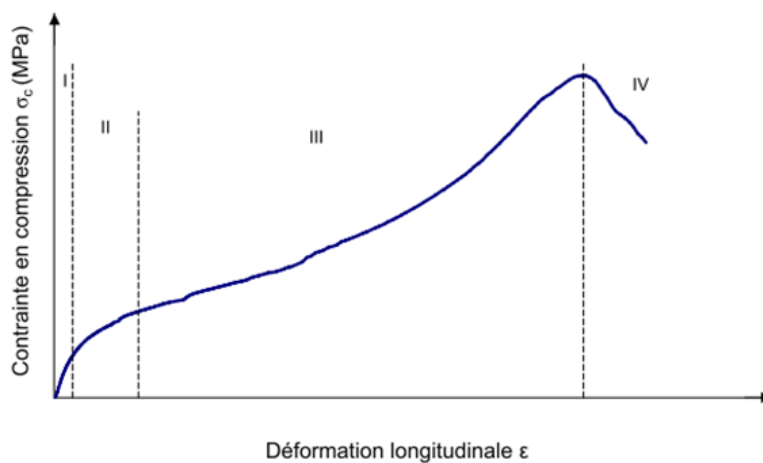


Figure 2-16 : Courbe contrainte – déformation en compression perpendiculaire ( $C\perp$ ).

La première correspond au domaine élastique du comportement du matériau, la deuxième correspond à de la plasticité avec un écrouissage non-linéaire, et la troisième phase qui est d'abord quasi linéaire correspond à un comportement élastoplastique, ponctué par une augmentation de la contrainte due à la densification du matériau. La dernière phase est la partie descendante (ou radoucissant) de la courbe contrainte-déformation et correspond à la rupture de l'échantillon. Cette quatrième phase n'apparaît pas toujours, et dépend du pilotage de l'essai.

Dans le cas de la compression parallèle (C//), les échantillons présentent un comportement élastique endommageable, avec un sommet de contrainte maximale appliqué sur la courbe contrainte-déformation comme le montre la (Figure 2-17), où on peut distinguer deux phases distinctes : la première est élastique quasi-linéaire, jusqu'au pic de contrainte. La seconde phase consiste essentiellement en un radoucissement du matériau.

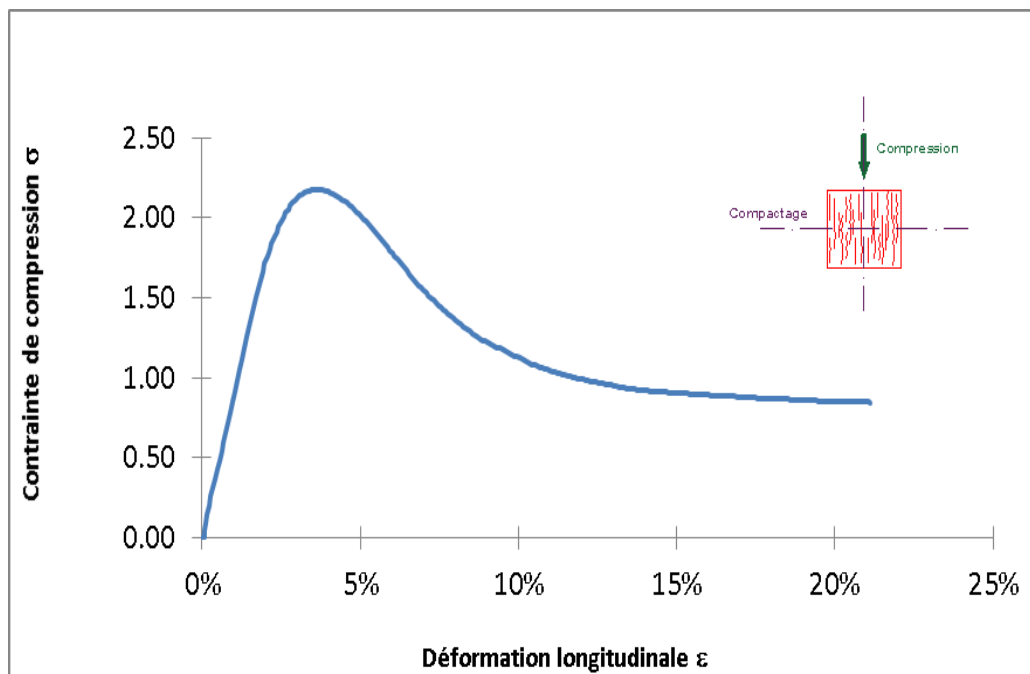


Figure 2-17 : Courbe contrainte – déformation en compression parallèle (C//)

### 2.3.1.1 Modules d'élasticité apparents

En négligeant l'effet « tonneau », c'est à dire en supposant que la déformation est homogène, le module d'élasticité apparent est calculé en prenant la pente maximale de la partie élastique de la courbe contrainte-déformation en compression parallèle et de la partie quasi élastique de la courbe en compression orthogonale (Figure 2-18).

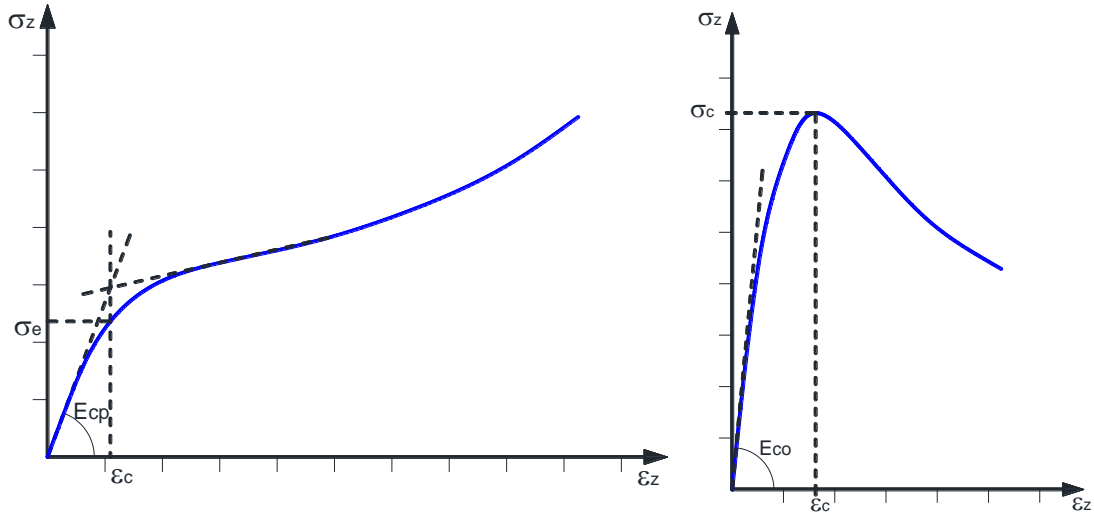
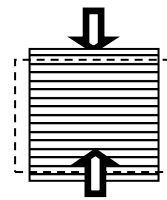


Figure 2-18 : le module d'élasticité apparent dans les deux sens de compression ( $C_{\perp}$ ) et ( $C_{//}$ )

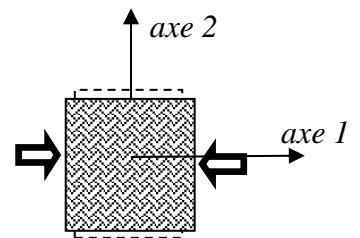
Le matériau étudié est de nature isotrope transverse. Il possède donc 5 modules indépendants d'élasticité linéaire (Lemaitre, Chaboche, Benallal, & Desmorat, 2009). Ces modules, si on se réfère aux constantes de l'ingénieur, peuvent être les suivants :

- Le module d'élasticité perpendiculaire au plan d'anisotropie,  $E_{\perp}$ , et le coefficient de poisson  $\nu_{//\perp}$  qui correspond à une déformation parallèle au plan d'anisotropie lors d'une compression simple perpendiculaire à ce plan  $\nu_{\perp} = -\epsilon_{//} / \epsilon_{\perp}$

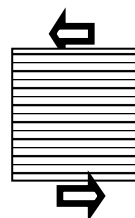
Pour simplifier la notation, nous allons l'appeler  $\nu_{\perp}$  par la suite.



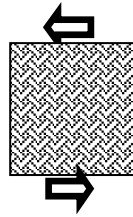
- Le module d'élasticité parallèle au plan d'anisotropie,  $E_{//}$ , et le coefficient de poisson  $\nu_{////} = \nu_{//} = -\epsilon_{//1} / \epsilon_{//2}$  lors d'une compression simple suivant l'axe 2 (ou  $\nu_{//} = -\epsilon_{//2} / \epsilon_{//1}$  lors d'une compression simple suivant l'axe 1) :



- Le module de cisaillement  $G_{\perp}$  :

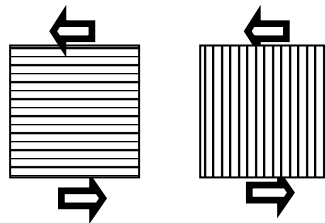


Le module de cisaillement  $G_{//}$  :



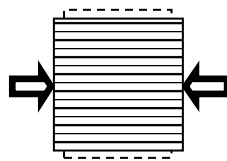
Nous venons de décrire 6 paramètres, mais seulement 5 paramètres sont indépendants car :

- $G_{//} = E_{//} / 2(1 + \nu_{//})$  (remarque : c'est la même formule que pour un matériau isotrope, mais cette formule est valable seulement dans le plan d'anisotropie)
- $G$  est théoriquement identique ( $= G_{\perp}$ ) dans les deux configurations suivantes :



- Il existe un troisième coefficient de Poisson :

$\nu_{\perp//} = -\epsilon_{\perp} / \epsilon_{//}$ , caractérisant la déformation orthogonale au plan d'anisotropie lorsqu'on applique une compression simple parallèlement au plan :

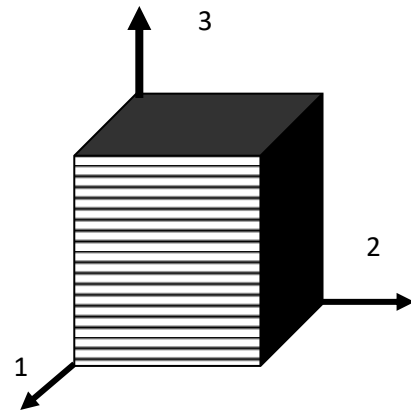


Il est possible de relier ce paramètre aux autres :  $\nu_{\perp//} / E_{//} = \nu_{//\perp} / E_{\perp}$

En notation de Lemaitre et Chaboche (Lemaitre J. & Chaboche J.L., 2009), si le plan d'anisotropie a pour normale l'axe 3, on obtient une matrice de souplesse du type :



$$\bar{\bar{S}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} \end{bmatrix}$$



Avec :

$$E_1 = E_2, G_{13} = G_{23}, \text{ et } \nu_{13} / E_1 = \nu_{23} / E_2.$$

Si on adopte la notation //,  $\perp$  on trouve :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{//}}{E_{//}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$E_1 = E_2 = E_{//}, E_3 = E_{\perp}, G_{13} = G_{\perp}, \nu_{12} = \nu_{//} \text{ et } \nu_{13} = \nu_{\perp}.$$

Les modules de cisaillement seront déterminés au chapitre 3. Dans cette partie, nous exposerons les résultats pour les modules de compression et les coefficients de Poisson. Après avoir déterminé les modules d'élasticité apparents, les coefficients de Poisson seront obtenus.

### 2.3.1.2 Limite d'élasticité

Pour calculer la limite d'élasticité, nous allons de nouveau distinguer les deux directions de sollicitation. Pour la compression orthogonale aux plans d'anisotropie ( $C_{\perp}$ ), nous allons adopter la méthode de Tronet (Tronet 2013) pour définir la limite d'élasticité  $\sigma_e$  comme le seuil de contrainte au-delà duquel l'écoulement plastique prend place. Tout d'abord, il faut déterminer la déformation limite d'élasticité  $\varepsilon_e$ . Cette déformation  $\varepsilon_e$  marque le début de la phase plastique, c'est-à-dire le début des déformations irréversibles (transition entre la phase linéaire et la phase non-linéaire qui est supposée élastoplastique). Cette déformation correspond à l'intersection de la droite liée à l'élasticité linéaire et de la droite liée à l'écrouissage (Tronet 2013), comme le montre la (Figure 2-19). La limite d'élasticité  $\sigma_e$  correspond au point de la courbe contrainte/déformation pour cette déformation  $\varepsilon_e$ .

Avec :

$\sigma_e$  : limite d'élasticité [MPa],

$E_c$  : module d'élasticité apparent [MPa],

$E_2$  : module d'écrouissage apparent [MPa],

$\varepsilon_t$  : déformation définissant la fin de la zone d'écrouissage linéaire [-].

$f'_{co}$  : Résistance à la compression [MPa],

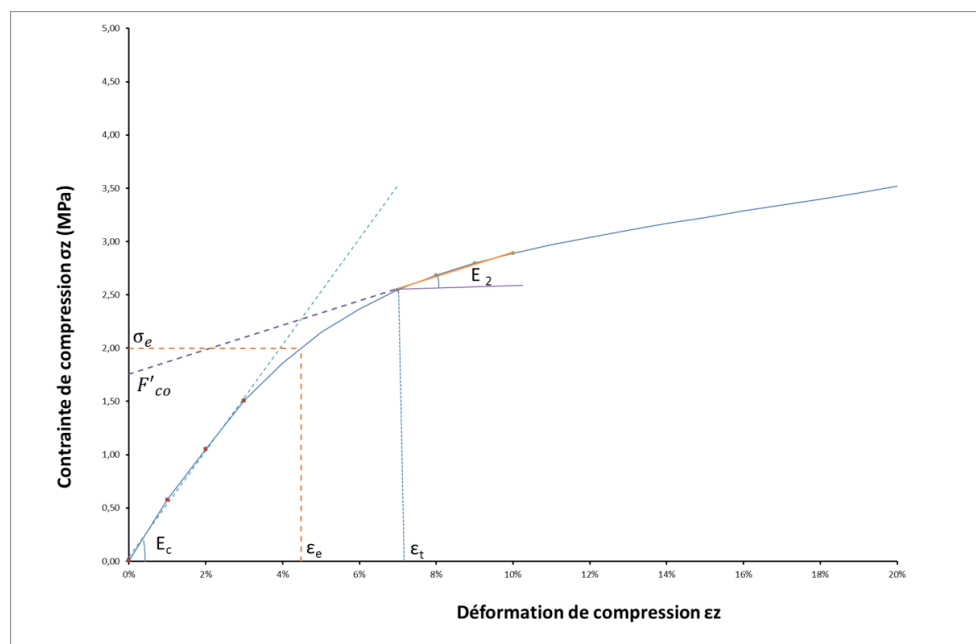


Figure 2-19 : Définition graphique de la limite d'élasticité dans le cas de compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ).

Pour la compression parallèle aux plans d'anisotropie (C//), la limite de résistance en compression  $\sigma_c$  est assez facile à caractériser : elle correspond au pic de la courbe contrainte-déformation (Figure 2-20).

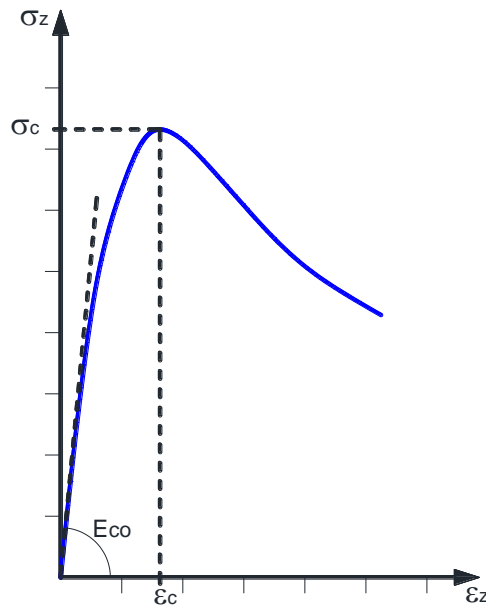


Figure 2-20: La résistance en compression  $\sigma_c$ , en compression parallèle (C//)

## 2.4 Résultats et Analyses des essais de compression simple

### 2.4.1 Reproductibilité des essais de compression

Après avoir réalisé les éprouvettes cylindriques et extrait les échantillons cubiques, chaque essai prévu en compression simple a été répété trois fois, pour vérifier sa reproductibilité. Dans le présent travail, les compressions sont monotones.

Les courbes contrainte-déformation obtenues sont présentées ensemble (Figure 2-21). Nous avons constaté une bonne reproductibilité des essais en compression dans les sens parallèles de compactage, perpendiculaire aux plans d'anisotropie (C $\perp$ ) pour les formulations M1 et M4, dans les deux parties hautes et basses des deux formulations.

Nous pouvons remarquer que jusqu'à 30% de déformation, il n'y a pas de rupture dans les matériaux quand l'axe de compression est parallèle à l'axe de compactage. Les couches de chènevotte sont perpendiculaires à la contrainte principale, donc elles se superposent en réduisant les vides entre elles sans rupture observable. Le comportement est très ductile, avec une partie quasi-élastique et une partie plastique avec écrouissage.

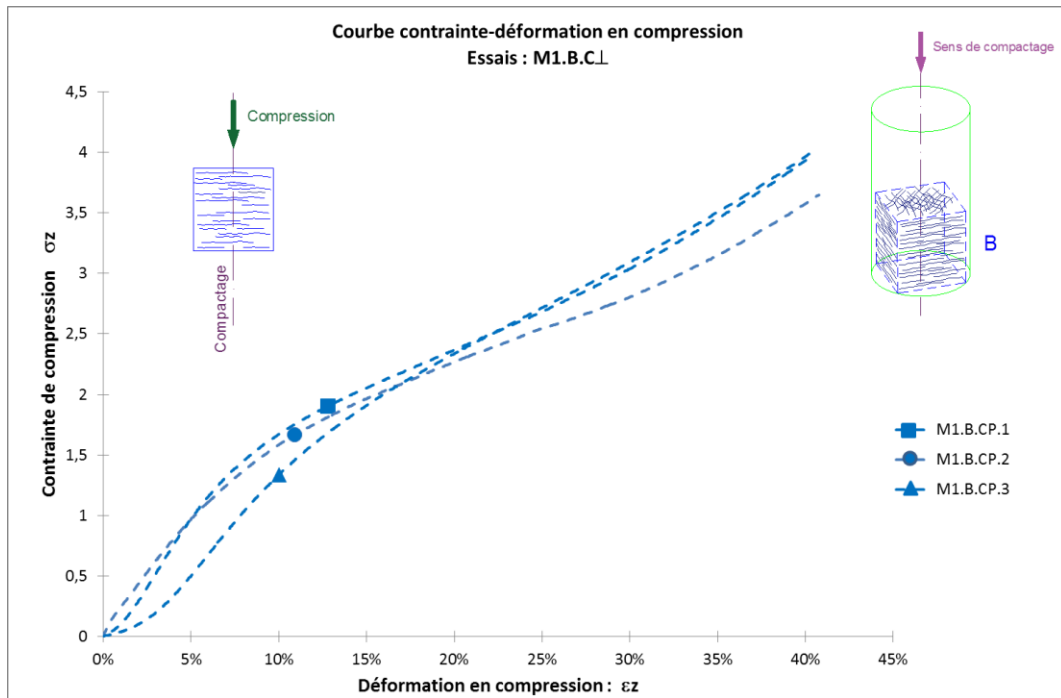


Figure 2-21: Les courbes typiques contrainte-déformation en compression simple dans les sens perpendiculaires aux plans d'anisotropie ( $C_{\perp}$ ) pour la partie basse de la formulation M1.

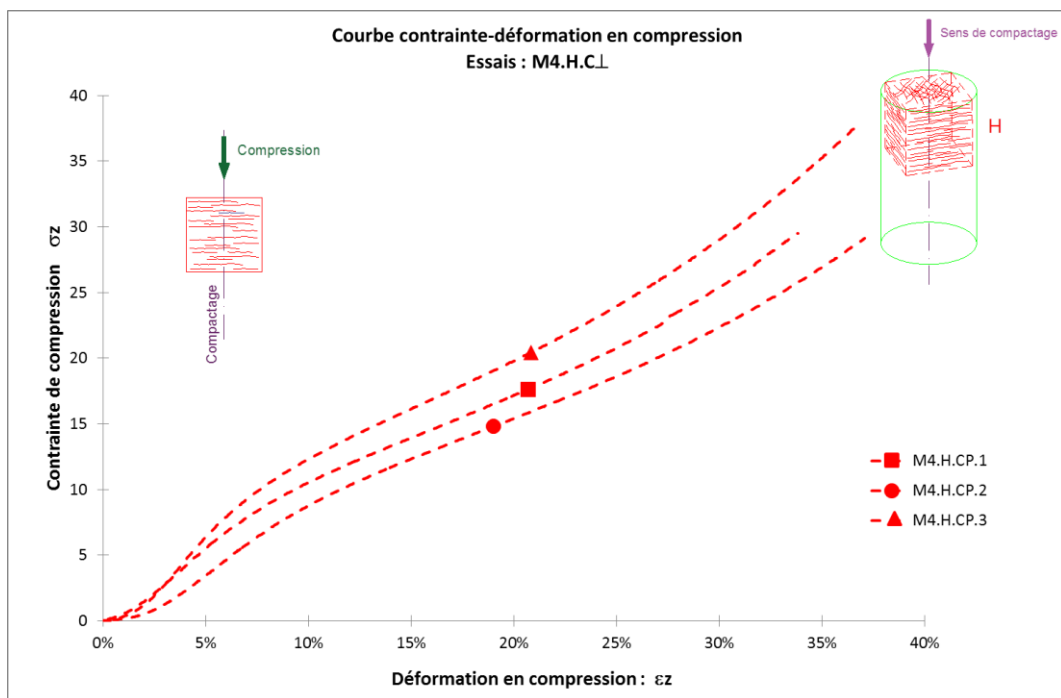


Figure 2-22 : Les courbes typiques contrainte-déformation en compression simple dans les sens perpendiculaires ( $C_{\perp}$ ) pour la partie haute de formulation M4.

Les figures (Figure 2-23 et Figure 2-24) montrent des courbes typiques contrainte-déformation lorsque la compression est appliquée perpendiculairement à la direction de compactage des éprouvettes M1 et M4, pour la partie basse de la formulation M1 et la partie haute de la formulation M4.

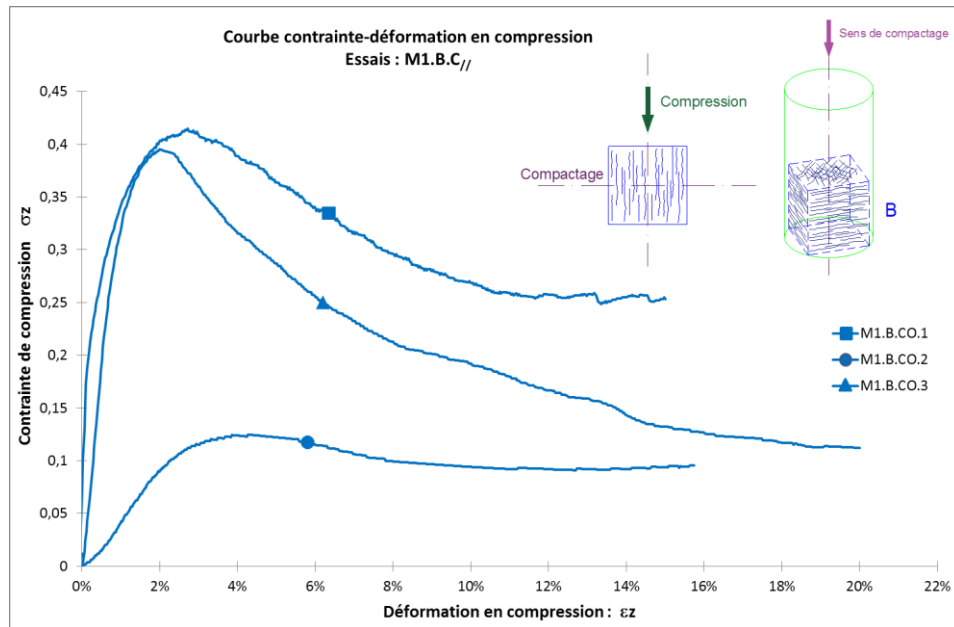


Figure 2-23: Les courbes typiques contrainte-déformation en compression simple dans les sens parallèles (C//) pour la partie basse de formulation M1.

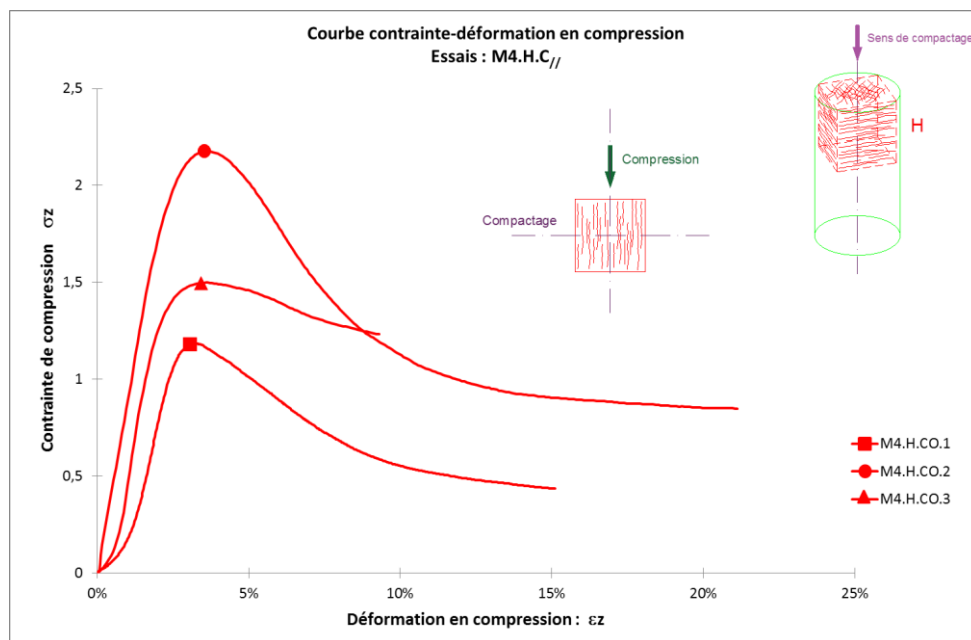


Figure 2-24: Les courbes typiques contrainte-déformation en compression simple dans les sens parallèle (C//) pour la partie haute de formulation M4.

Nous observons que chaque mélange pour la compression dans le sens parallèle aux plans d'anisotropie ( $C//$ ), a un comportement fragile. Il faut noter aussi que la dispersion est très élevée dans le cas de compressions orthogonales à la direction de fabrication, parallèle aux plans d'anisotropie ( $C//$ ). Les résultats doivent être corrélés aux défauts entre les couches de chènevottes ainsi qu'au comportement en traction de celles-ci. En effet, au cours des essais, les échantillons ont montré une décohésion des couches de chènevottes dans le sens vertical, associée à un faciès de rupture en "accordéon" (Figure 2-25). Ceci revient à une amorce de rupture par traction (dans le sens orthogonal à la sollicitation), et un flambement des couches de chènevottes. Un défaut de cohésion initial entre deux couches de chènevottes est donc susceptible de modifier fortement le comportement du matériau dans le sens transversal.

Néanmoins, la tendance d'une corrélation entre la résistance à la compression et l'état de compactage (ou masse volumique) est observée. Cela signifie que pour un plus haut taux de chènevottes (la formulation M4), le comportement à la compression transversale présente les plus grandes résistances, bien qu'il y ait moins de liant. Cette résistance à la compression plus élevée est probablement due à la limitation de la porosité et à un comportement plus rigide lorsque la compacité augmente.



Figure 2-25: la rupture de l'éprouvette M4 en « accordéon » dans la compression parallèle ( $C//$ ).

Le comportement très instable et variable des échantillons dans la direction transversale, ajouté à une faible résistance à la compression, les rendent inaptes à une mise en œuvre dans le sens transversal comme matériau porteur, ou même dans un mur auto porté.

Les tests complémentaires effectués sur des cubes de Chanvribloc® de tailles différentes (cubes de 7 cm, 10 cm et 15 cm) (Figure 2-26) ont montré que dans le sens parallèle au sens de fabrication, orthogonale aux plans d'anisotropie ( $C\perp$ ), la dispersion des résultats est d'autant élevée que l'échantillon est petit (Figure 2-27, Figure 2-28, Figure 2-29). Ceci est probablement lié au rapport entre la taille de l'échantillon (entre 7 et 15 cm) et la taille des hétérogénéités, les

particules de chènevotte pouvant mesurer jusqu'à 3 cm de longueur. Leurs tailles varient donc du cinquième à la moitié de la taille des éprouvettes.



Figure 2-26: Cubes de Chanvribloc® de tailles différentes (70, 100, 150 mm)

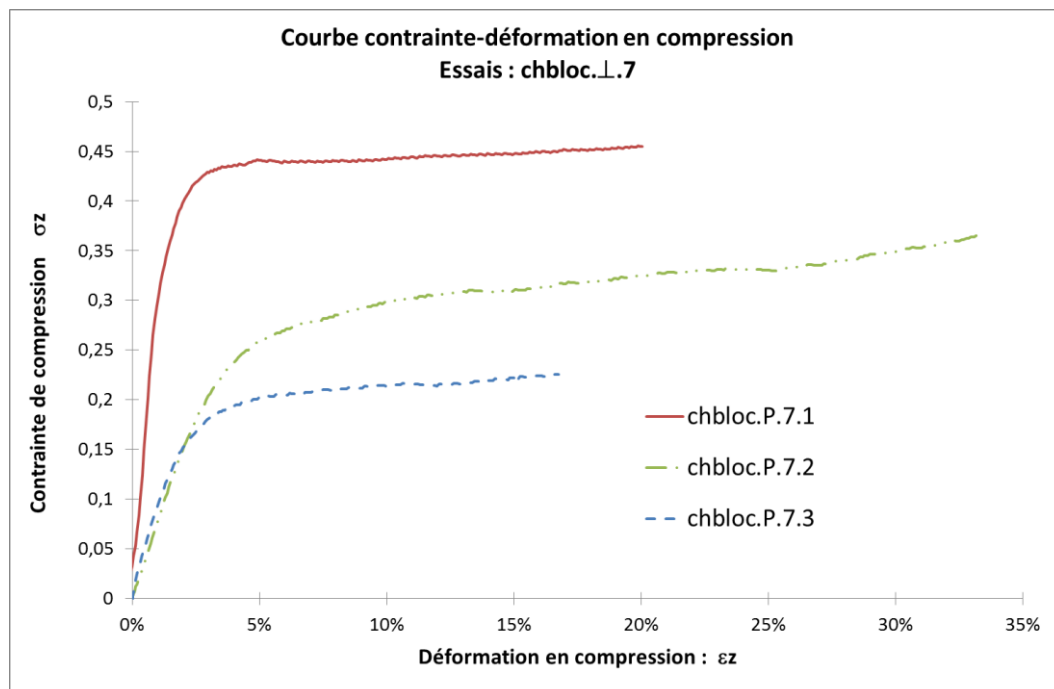


Figure 2-27: Courbe contrainte-déformation en compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ) de Chanvribloc® 7cm.

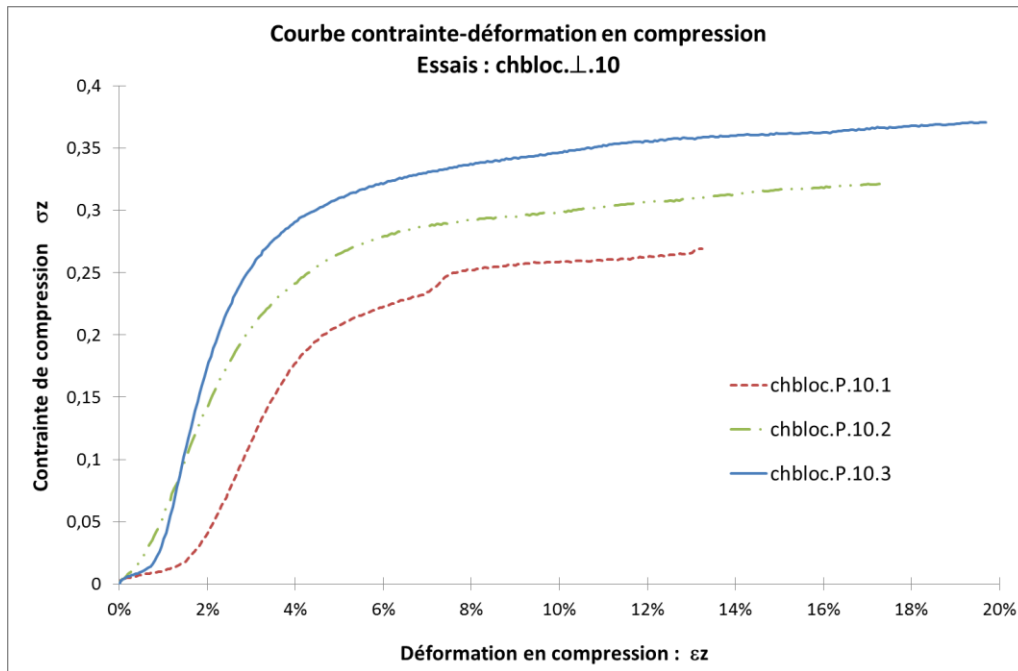


Figure 2-28 : Courbe contrainte-déformation en compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ) de Chanvribloc® 10cm.

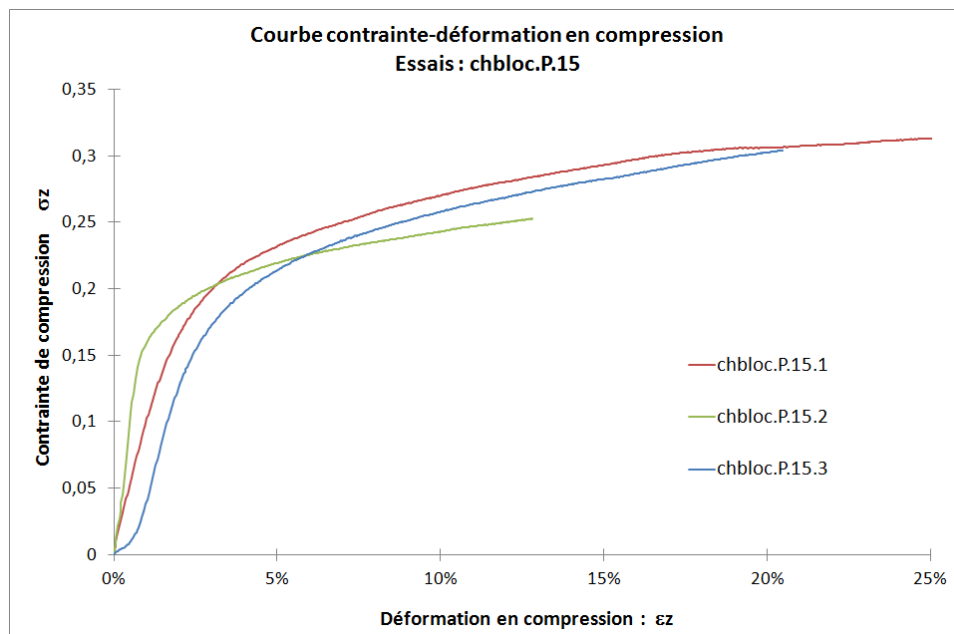


Figure 2-29: Courbe contrainte-déformation en compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ) de Chanvribloc® 15cm.

Les tests dans le sens parallèle ( $C_{//}$ ) ont été réalisés sur des cubes de 7 cm. Les résultats ont montré une plus grande dispersion des résultats que dans le sens orthogonale ( $C_{\perp}$ ) (Figure 2-30).



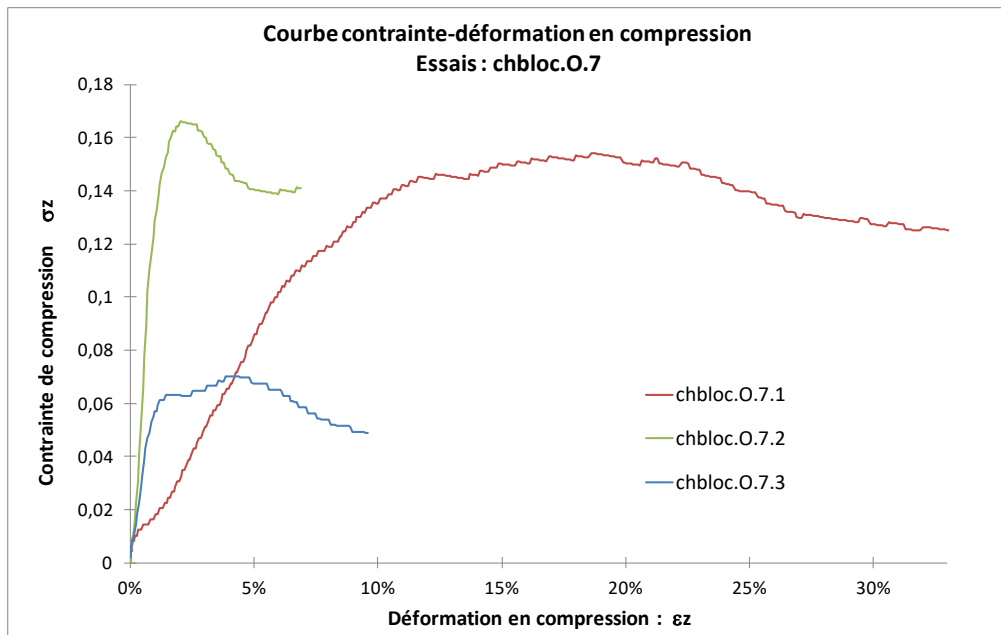


Figure 2-30: Courbe contrainte-déformation en compression parallèle ( $C_{//}$ ) de Chanvribloc® 7cm.

#### 2.4.1.1 Valeurs des paramètres de compression pour les trois formulations

Pour la compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ), nous avons adopté la méthode de Tronet (Tronet 2013) (§ 2.1.2.3) pour identifier les paramètres :  $\sigma_e$ ,  $f_{co}$ ,  $E_{cp}$ ,  $E_2$ , pour chaque essai puis nous avons calculé les moyennes sur trois essais avec leur écart type voir tableau (Tableau 2-5). La limite d'élasticité  $\sigma_e$  en compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ) est toujours supérieure à la résistance à la compression  $\sigma_c$  dans le sens parallèle ( $C_{//}$ ).

Formulations		Limites d'élasticité				Paramètres élastiques de compression // ou ⊥						
		σ <sub>e</sub> ⊥ [MPa]		σ <sub>c</sub> // [MPa]		E <sub>//</sub> [MPa]		E <sub>⊥</sub> [MPa]		v <sub>//</sub> ⊥	v <sub>//</sub> //	v <sub>⊥</sub> //
		Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne	Ecart Type	Moyenne		
M1	Haut	2	0,2	1	0,4	40	14	38	10	0,15	0,48	0,46
	Bas	1	0,1	0,4	0,1	40	7	20	3	0,08	0,9	0,77
M4	Haut	9	0,7	2	1	82	6	135	29	0,03	0,59	0,76
	Bas	5	0,6	1	0	76	8	85	10	0,05	0,16	0,71
Chanvribloc	7 cm	0,4	0,1	0,1	0,1	8	6	8	1	0,09	0,15	0,08
	10 cm	0,3	0,1					7	2	0,02		
	15 cm	0,3	0					8	2	0,06		

Tableau 2-5 : Les moyennes de plusieurs paramètres en compression

Nous pouvons remarquer pour les essais de compression parallèle (C//), des valeurs de coefficients de Poisson (v<sub>//</sub> //, v<sub>⊥</sub> //) anormales supérieures à 0,5. Pour un matériau isotrope, le coefficient de Poisson ne peut pas être supérieur à 0.5. Si un des coefficients de Poisson est supérieur à 0.5, c'est qu'il y a une anisotropie, éventuellement de l'isotropie transverse. Dans le cas isotrope transverse, ce coefficient doit être inférieur à 1, dans une direction, et contraint par une autre inégalité dans l'autre direction (Cowin 1986).

Afin de vérifier les coefficients de Poisson mesurés dans chaque direction et le degré d'anisotropie dans le matériau, nous pourrions appliquer l'équation suivante :

$$\frac{v_{//\perp}}{E_{\perp}} = \frac{v_{\perp//}}{E_{//}}$$

Le tableau (Tableau 2-6) compare les valeurs expérimentales aux valeurs calculées à partir des mesures de v<sub>//</sub>⊥ et des modules d'Young pour M1, M4.

Formulations		$\nu_{\perp //}$ calculé	$\nu_{\perp //}$ mesuré
M1	Haut	0,158	0,46
	Bas	0,160	0,77
M4	Haut	0,018	0,76
	Bas	0,045	0,71

Tableau 2-6 : Evaluation de l'anisotropie

Les résultats du (Tableau 2-6) nous montrent que les formules appliquées aux paramètres élastiques d'un matériau isotrope transverse ne s'appliquent pas ici. Ceci peut être dû à plusieurs raisons :

- Le mode de rupture en « accordéon » très prononcé dans l'essai de compression parallèle  $C_{//}$ , qui apparait très tôt dans l'essai
- La taille des particules qui est grande relativement à la taille des éprouvettes (L/H).
- Les couches de chènevottes, parallèles au sens de la contrainte principale qui s'effondrent par flambement et engendrent une grande dispersion des résultats (Figure 2-25, Figure 2-26).

Dans les prochains paragraphes, nous allons étudier l'influence de ces paramètres pour les deux sens de compression ( $C_{//}$ ), ( $C_{\perp}$ ), en fonction de la masse volumique de chaque éprouvette et les comparer avec d'autres résultats de la littérature.

#### 2.4.1.2 Hétérogénéité de comportement dans une éprouvette cylindrique

Le béton de chanvre est un matériau fortement hétérogène. L'hétérogénéité ne provient pas seulement de la microstructure du matériau. Dans notre cas, c'est le mode de mise en œuvre qui entraîne une nouvelle forme d'hétérogénéité. En effet, le compactage consiste en théorie à appliquer une contrainte de compression uniforme sur tout l'échantillon, mais le frottement le long de la cellule de compactage induit une hétérogénéité significative du comportement mécanique dans un même bloc cylindrique (gradient d'élasticité et de résistance), où nous allons extraire les cubes dans les parties haute et basse. Ce processus de compactage doit être techniquement amélioré afin de minimiser ce gradient de propriétés et assurer une meilleure homogénéité des éléments préfabriqués.

Le tableau (Tableau 2-7) montre l'évaluation de  $\sigma_{e \text{ haut}}/\sigma_{e \text{ bas}}$ ,  $E_{// \text{ haut}}/E_{// \text{ bas}}$ ,  $\sigma_{c \text{ haut}}/\sigma_{c \text{ bas}}$  pour les formulations M1 et M4. Nous pouvons remarquer que la limite d'élasticité de la partie haute du cylindre (cube H)  $\sigma_{e \text{ haut}}$  est deux fois plus grande que la limite d'élasticité de la partie basse

de cylindre  $\sigma_{e\text{ bas}}$ . La même remarque s'applique pour la résistance en compression  $\sigma_c$  pour les deux parties haute et basse.

Formulations	$\sigma_{e\text{ haut}} / \sigma_{e\text{ bas}}$	$\sigma_{c\text{ haut}} / \sigma_{c\text{ bas}}$	$E_{//\text{ haut}} / E_{//\text{ bas}}$	$E_{\perp\text{ haut}} / E_{\perp\text{ bas}}$
M1	2	2,5	1	1,9
M4	1,8	2	1,1	1,6

Tableau 2-7 : Evaluation paramètres d'hétérogénéité dans les éprouvettes entre H et B pour M1, M4.

Tronet [Tronet et al. 2014] ont trouvé suivant le modèle de Cooper-Eaton, que le frottement est un facteur important, et que la contrainte en bas du cylindre reste très faible jusqu'à la fin du réarrangement des particules de chanvre, et que les contraintes dans la partie basse  $\sigma_{Z\text{ LP}}$  sont inférieures à celles de la partie haute  $\sigma_{Z\text{ UP}}$  à la fin du compactage pour la formulation M4 (Figure 2-31) où :

$C_0$  : Compacité initiale [-]

$C$  : Compacité [-]

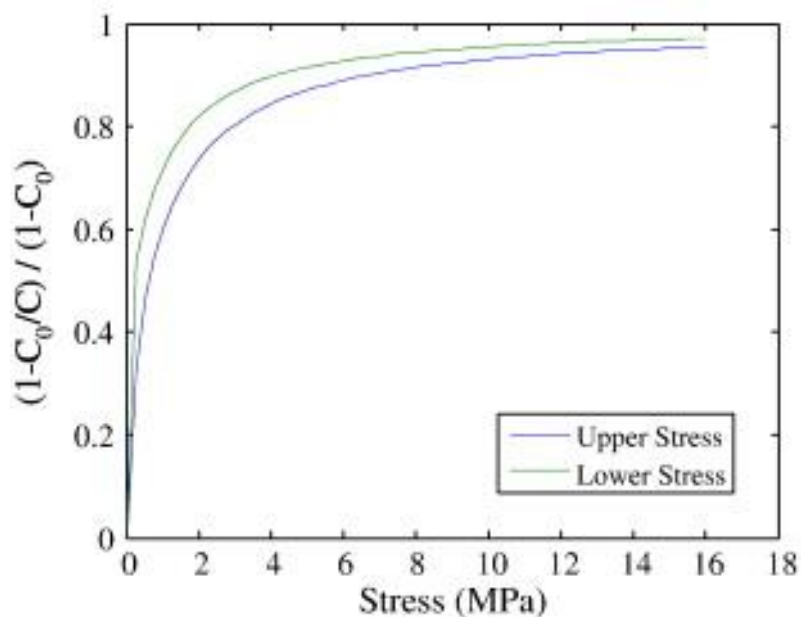


Figure 2-31 : Les contraintes axiales dans la partie haute et basse d'un cylindre suivant le modèle de Cooper-Eaton, formulation M4, [Tronet et al. 2014]

En effet, le compactage consiste en théorie à appliquer une contrainte de compression uniforme sur tout l'échantillon, mais les frottements du matériau sur les parois du moule, même lubrifié, dissipent une partie non négligeable de l'énergie de compactage sur toute la hauteur de l'éprouvette.

Tronet (Tronet et al. 2014) a montré l'équation différentielle qui aboutit à une solution exponentielle

$$\sigma_{zup} = \sigma_{zlp} \exp\left(\frac{2\alpha\mu h}{R}\right) + \frac{c}{\alpha\mu} [\exp\left(\frac{2\alpha\mu h}{R}\right) - 1]$$

Ou :

$\sigma_{zup}$  : contrainte moyenne axiale sur le poinçon supérieur

$\sigma_{zLP}$  : contrainte moyenne axial sur le poinçon inférieur

$\mu$  : coefficient de frottement paroi / échantillon

$\alpha$ : ratio de transmission

C : cohésion

h : la hauteur compactée de l'échantillon

R : le rayon de l'échantillon cylindrique

Néanmoins, la taille de l'échantillon a un effet négligeable comparé à son élancement : la comparaison du travail expérimental de Pierre Tronet (Tronet 2013) avec la présente étude montre que les valeurs de la limite d'élasticité obtenues sur des cubes (rapport d'élancement de 1) et sur des cylindres (rapport d'élancement égal à 2) sont similaires, mais que l'écroutissage plastique du matériau est considérablement amplifié avec les cubes. Dans la phase d'écroutissage plastique, la diminution du rapport d'aspect conduit à l'augmentation de la rigidité.

### ***2.4.1.3 Limite d'élasticité en fonction de la masse volumique***

L'influence de la masse volumique de chaque éprouvette testée sur les contraintes maximales  $\sigma_c$  de compression dans le sens parallèle de compactage (C//), et  $\sigma_c$  dans le sens perpendiculaire (C⊥), est montrée sur les (Figure 2-32 et Figure 2-33).

La (Figure 2-32) montre que les deux parties hautes et basses de la formulation M4 qui ont des valeurs de masse volumique plus importantes que les autres formulations, présentent de

meilleurs résultats en contrainte de compression dans le sens parallèle (C//) par rapport aux deux parties de la formulation M1 et au Chanvrebloc®.

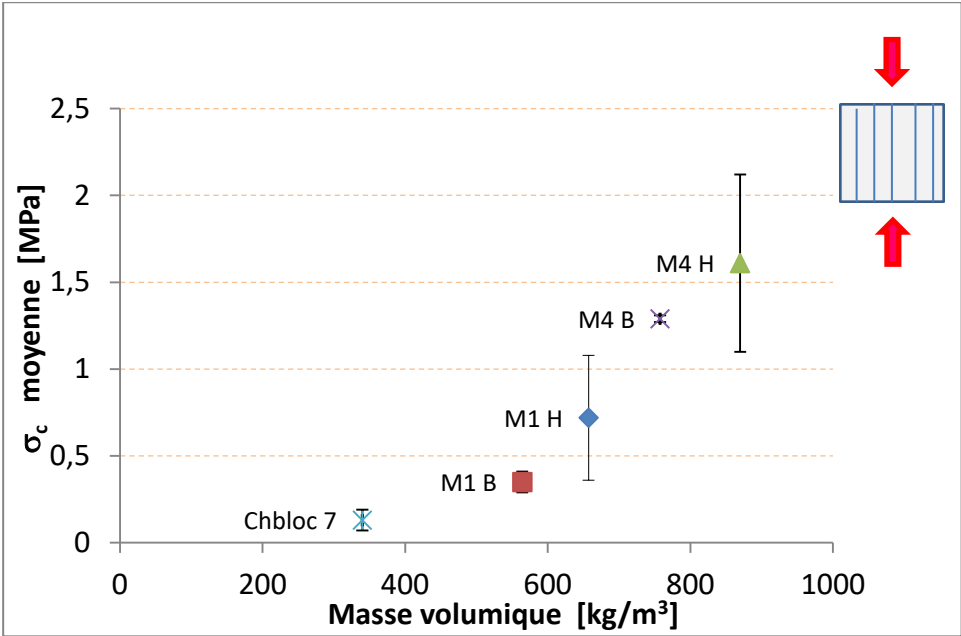


Figure 2-32: Contraintes maximales de compression en fonction de la masse volumique

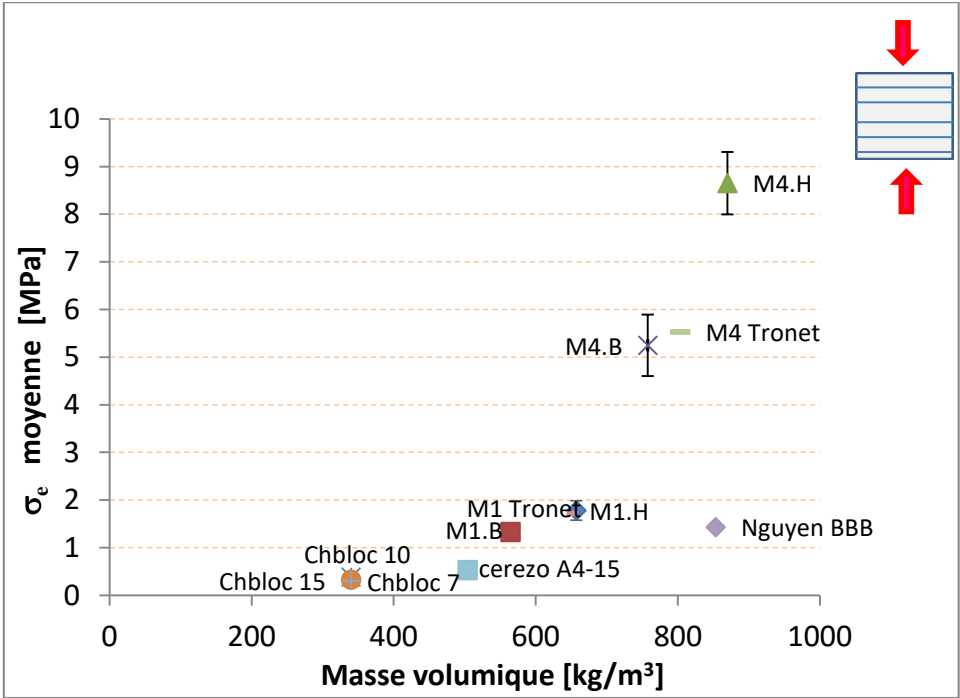


Figure 2-33: Limite d'élasticité moyenne σ<sub>e</sub> en fonction la masse volumique pour plusieurs formulations

La (Figure 2-33) confirme ainsi que la formulation M4 partie haute (H) présente de meilleurs résultats en limite d'élasticité par rapport à la formulation M1 et d'autres formulations de la littérature. Nous pouvons constater que la formulation cylindrique M4 de Pierre Tronet (Tronet, 2013) a la même valeur à peu près de la partie la plus faible de notre éprouvette cubique M4B, et que la formulation M1 en cylindre a aussi la même valeur que celle de notre éprouvette cubique M1H et n'est pas loin de la valeur de la partie basse de M1B.

Les Chanvribloc<sup>®</sup> dans les deux figures précédentes ont les plus faibles valeurs de contrainte de compression. La (Figure 2-33) montre que les éprouvettes de Chanvribloc<sup>®</sup> 7, 10 et 15 cm ont les mêmes valeurs de limite d'élasticité, c'est-à-dire que la taille d'éprouvette n'a pas d'influence significative.

Nous pouvons constater sur cette figure que la résistance à la compression des cubes extraits du bas des éprouvettes cylindriques est très proche de la résistance mesurée sur des cylindres de mêmes formulations par Tronet et al. [Tronet, Lecompte, Picandet, Baley 2016]. Ceci confirme bien que la résistance mesurée sur un bloc correspond à la résistance de la partie la plus faible de ce bloc, et montre l'effet important du frottement à la paroi au cours du procédé de compactage [Tronet et al. 2014]

La (Figure 2-34) présente le rapport  $\sigma_e / \sigma_c$  en fonction de la masse volumique des éprouvettes. Les résultats confirment la forte anisotropie de ce type de matériau, même dans le cas du Chanvribloc<sup>®</sup>, qui n'est pourtant pas fortement compacté. Nous pouvons noter que la limite d'élasticité pour chaque éprouvette est égale à au moins deux fois la contrainte maximale de compression pour la même éprouvette ( $\sigma_e > 2 \sigma_c$ ). Nous pouvons remarquer que M4 se distingue peu. Sans doute que le fait de mettre moins de liant dans le mélange M4 a tendance à limiter la résistance par traction entre les couches de chènevottes, et donc à pénaliser, la résistance relative dans le sens transversal.

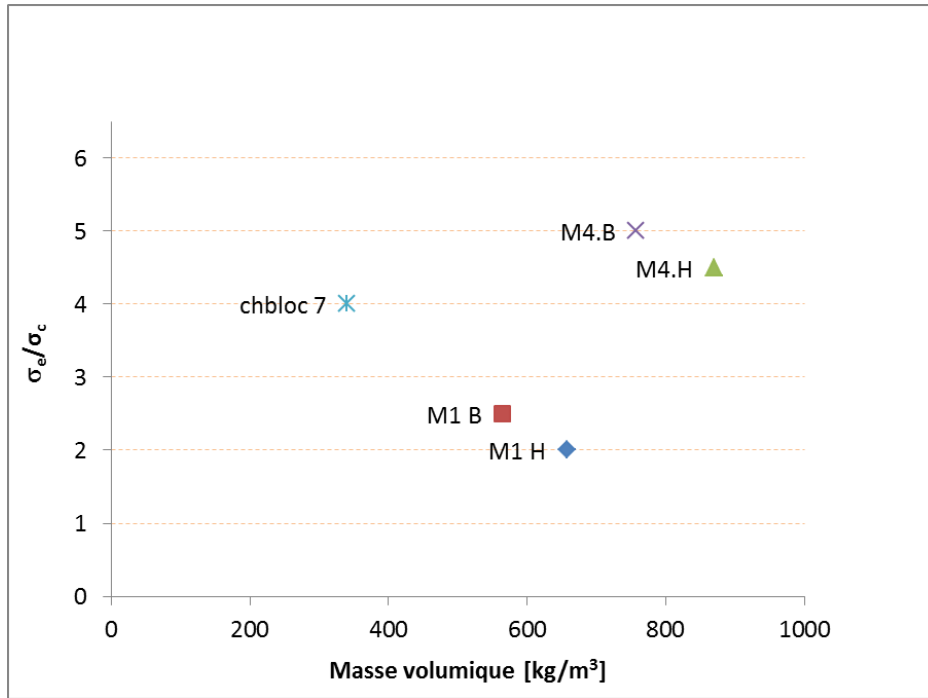


Figure 2-34: la limite d'élasticité moyenne en compression orthogonale  $\sigma_e$  par rapport la contrainte maximale moyenne en compression parallèle  $\sigma_c$  en fonction de la masse volumique des éprouvettes.

#### 2.4.1.4 Le module d'élasticité apparent en fonction de la masse volumique

La (Figure 2-35) présente le module  $E_{//}$  moyen en fonction de la masse volumique des formulations étudiées. Nous pouvons remarquer que l'éprouvette M4H présente la plus grande rigidité par rapport aux autres formulations.

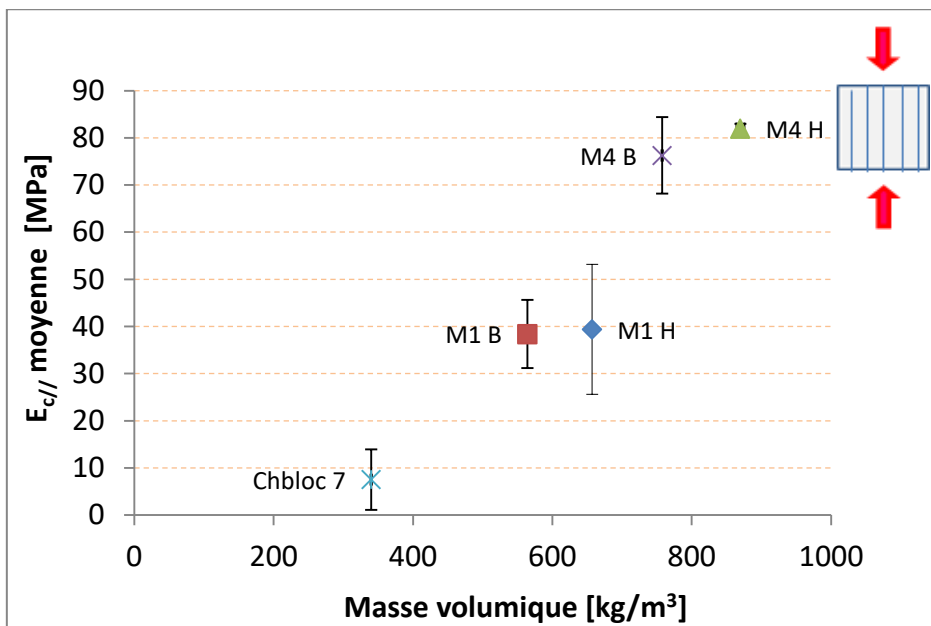


Figure 2-35: Module d'élasticité apparent  $E_{//}$  en compression parallèle.



Le module  $E_{\perp}$  en fonction de la masse volumique des formulations est présenté dans la (Figure 2-36).

L'éprouvette M4H présente toujours la meilleure rigidité parmi nos formulations, mais quand on les compare avec les données de la littérature, la formulation M4 cylindrique de Tronet présente de meilleurs résultats pour le module d'élasticité apparent.

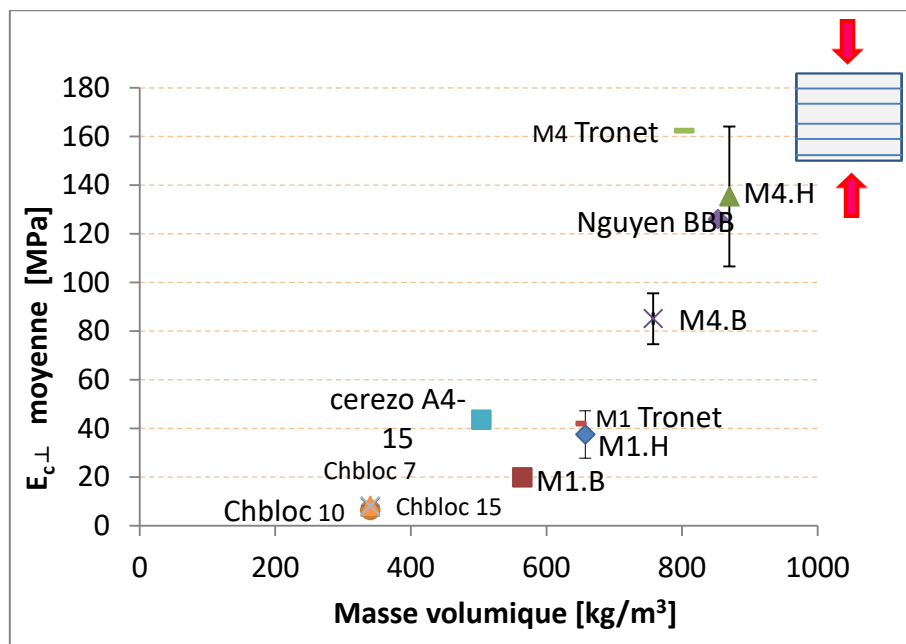


Figure 2-36: Module d'élasticité apparent  $E_{\perp}$  en compression orthogonale.

La (Figure 2-37) présente le module  $E_{\perp}$  par rapport au module  $E_{//}$  en fonction de la masse volumique des éprouvettes. Elle confirme que nos matériaux sont anisotropes. Nous pouvons remarquer que dans la formulation M1 que  $E_{\perp} / E_{//} < 1$ , tandis que dans la formulation M4 qui est plus compactée que M1, le module d'élasticité apparent  $E_{\perp}$  a plus grandes valeurs par rapport au module d'élasticité apparent  $E_{//}$  ( $E_{\perp} / E_{//} > 1$ ).

Par contre, l'éprouvette cubique de Chanvribloc de 7cm présente des modules équivalents dans les deux directions de compression. Nous observons par ailleurs qu'avec un taux de compactage élevé à l'état frais (M4) la rigidité dans le plan d'anisotropie est supérieure à la rigidité dans le plan perpendiculaire au plan d'anisotropie, comme l'avaient observé Nozahic et Amziane (Nozahic & Amziane 2012).

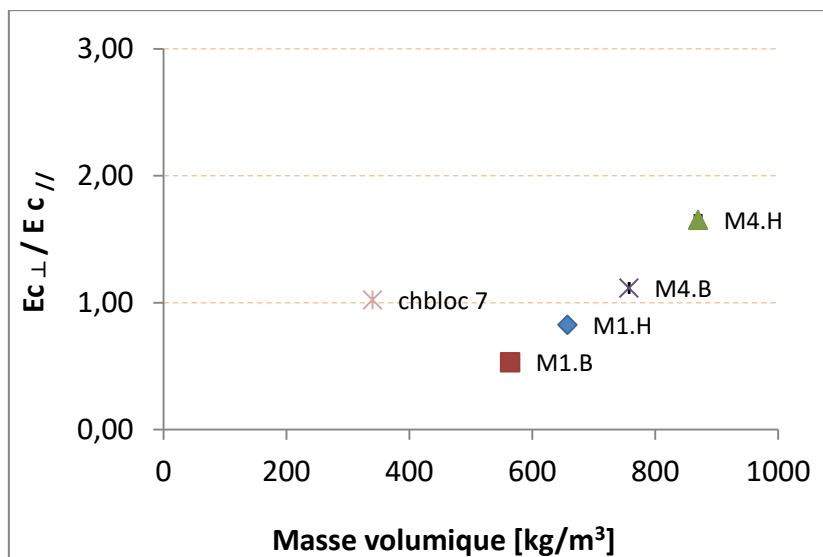


Figure 2-37: le module d'élasticité apparente moyenne en compression orthogonale  $E_{c\perp}$  par rapport le module de Young moyenne en compression parallèle  $E_{c\parallel}$  en fonction de la masse volumique des éprouvettes.

#### 2.4.1.5 Module d'écroutissage apparent $E_2$

Le module d'écroutissage apparent  $E_2$  correspond à la pente de la partie linéaire de la zone d'écroutissage plastique pour les essais de compression orthogonale ( $C\perp$ ). La (Figure 2-38) présente le module d'écroutissage apparent  $E_2$  en fonction de la masse volumique de chaque éprouvette. Le module d'écroutissage semble dépendre plus fortement de la masse volumique dans le cas d'une forte fraction de chènevotte (mélange M4). Les modules mesurés par Tronet sur des cylindres donnent des résultats intermédiaires : le module d'écroutissage d'un cylindre complet semble être la moyenne des modules locaux dans la hauteur du cylindre.

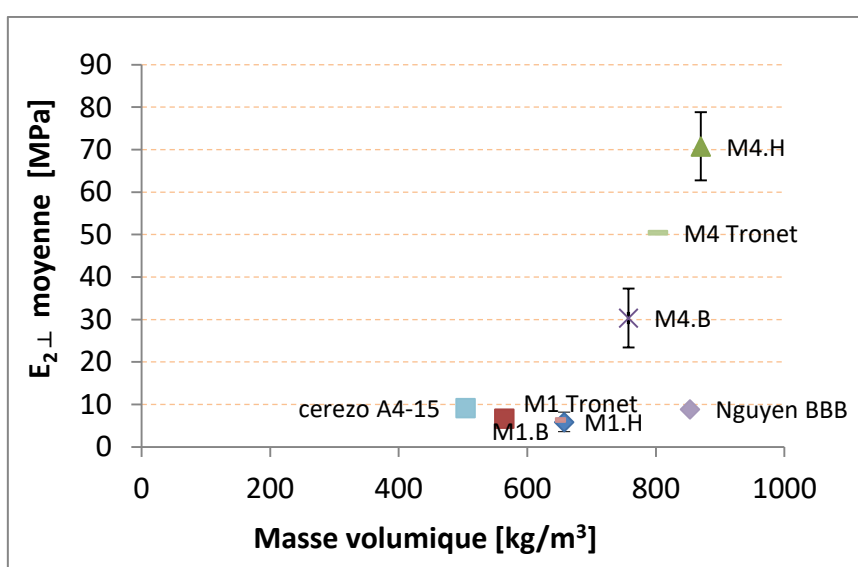


Figure 2-38: Le module d'écroutissage apparent  $E_2$  en fonction de la masse volumique de chaque éprouvette.

### 2.4.1.6 Limite et module d'élasticité en fonction la fraction volumique de chanvre

La (Figure 2-39) montre la limite d'élasticité  $\sigma_e$  en fonction de la fraction volumique  $\Phi_c$  de chanvre pour les formulations M1 et M4.

(Pour rappel  $\Phi_c = \frac{\text{masse de chanvre}/\text{m}^3 \text{ de mélange}}{1465}$ ) voir (C§ : 3.5.4)

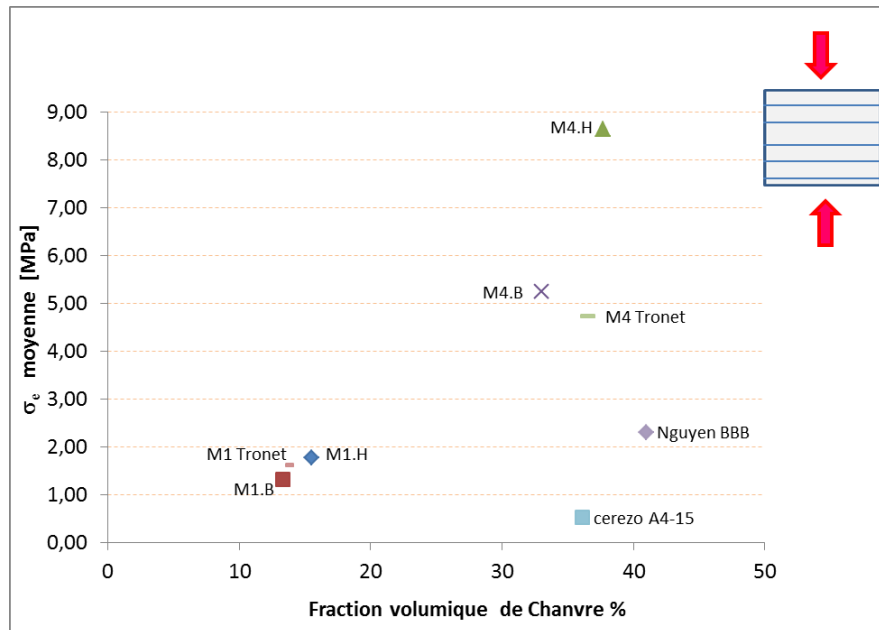


Figure 2-39: La limite d'élasticité  $\sigma_e$  en fonction la fraction volumique de chanvre.

Nous pouvons remarquer que la valeur de  $\sigma_e$  de la formulation M1 de Tronet correspond au résultat de  $\sigma_e$  du cube extrait en partie basse de la formulation M1 (M1B), et que la valeur de  $\sigma_e$  de la formulation M4 de Tronet a presque la même valeur que celle du cube de la partie basse de la formulation M4 (M4B). Nous pouvons remarquer que la partie haute (H) de la formulation M4 possède les résistances les plus élevées.

La (Figure 2-40) montre la résistance en compression  $\sigma_c$  en fonction de la fraction volumique de chanvre dans la compression parallèle ( $C_{//}$ ). Les éprouvettes haute et basse de la formulation M4 ont toujours une plus grande résistance en compression  $\sigma_c$  par rapport aux éprouvettes haute et basse de M1, sans dépasser la valeur de 2 MPa. La comparaison des valeurs de  $\sigma_c$  en compression parallèle ( $C_{//}$ ) avec les valeurs de  $\sigma_e$  en compression orthogonale ( $C_{\perp}$ ) pour la même fraction volumique de chanvre montre que la compression ( $C_{\perp}$ ) assure une limite d'élasticité  $\sigma_e$  plus grande.

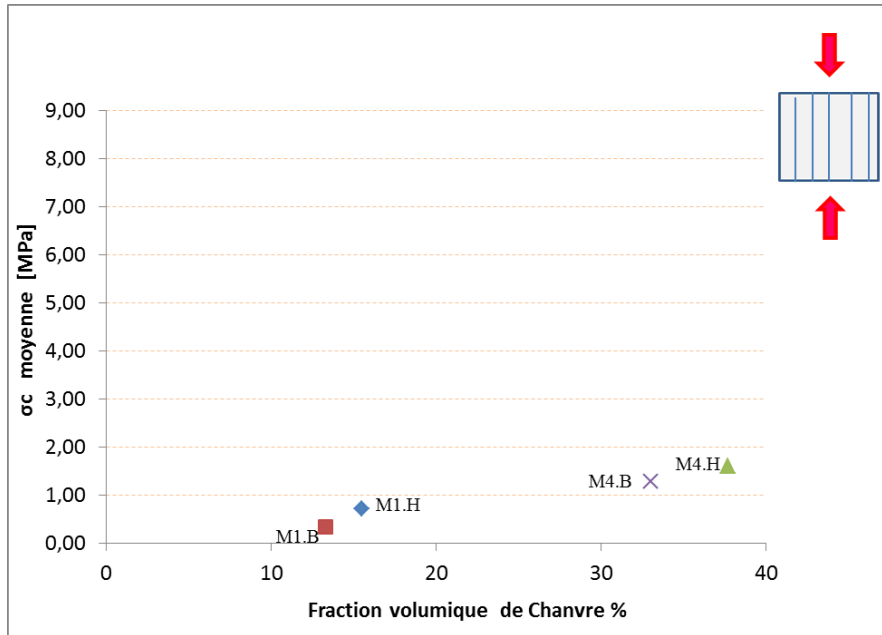


Figure 2-40 : La résistance en compression  $\sigma_c$  en fonction la fraction volumique de chanvre

Les figures (Figure 2-41, Figure 2-42) présentent le module d'élasticité apparent moyen en compression orthogonale  $E_{c\perp}$  et en compression parallèle  $E_{c//}$ , en fonction la fraction volumique de chanvre.

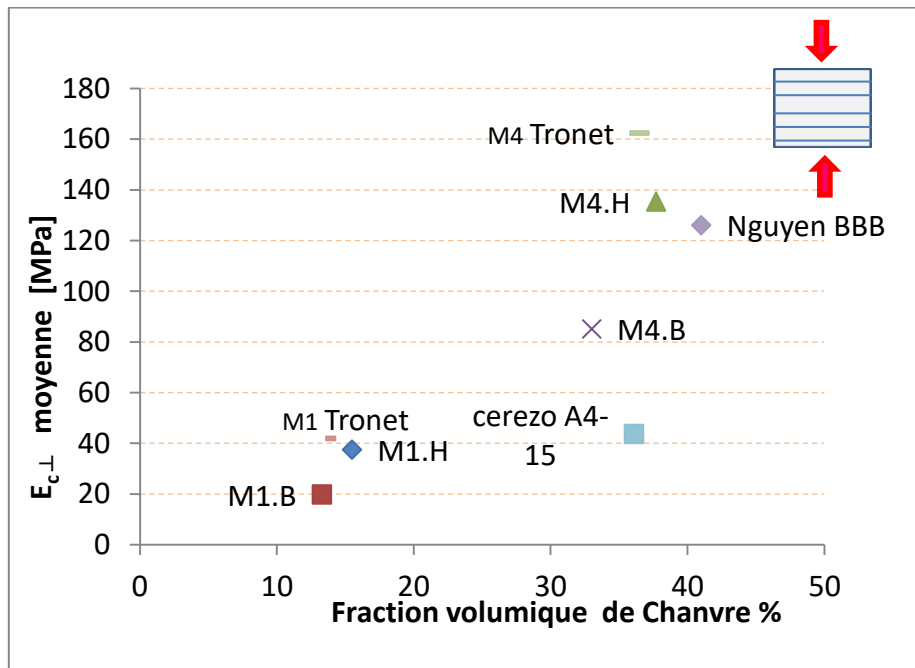


Figure 2-41 : Le module d'élasticité apparent moyenne en compression parallèle  $E_{c\perp}$  en fonction la fraction volumique de chanvre

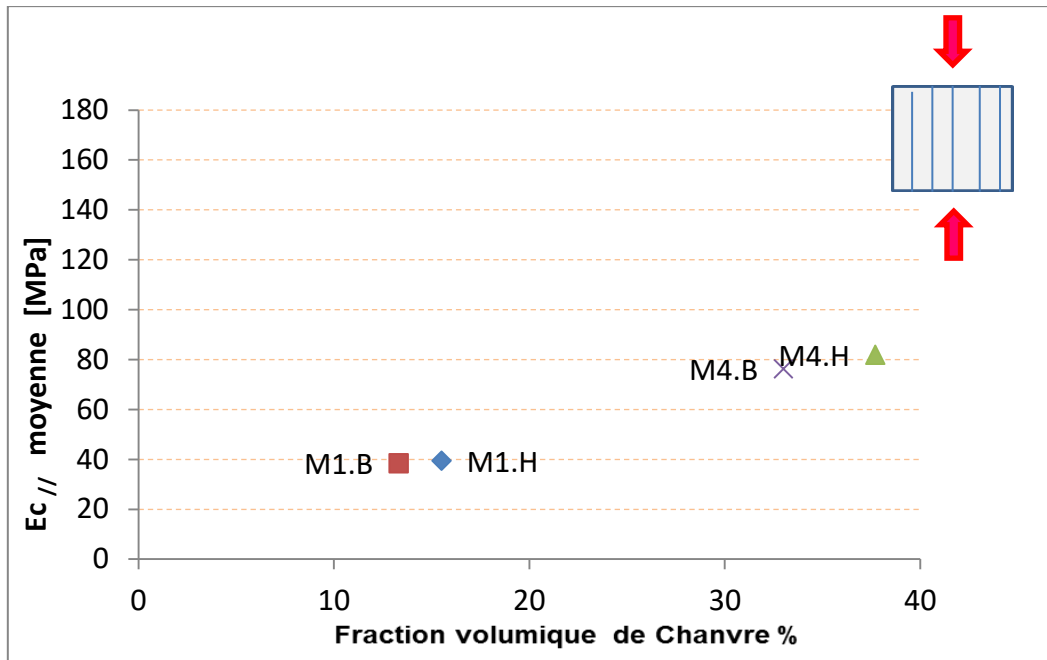


Figure 2-42 : Le module d'élasticité apparente moyenne en compression orthogonale  $E_{c//}$  en fonction la fraction volumique de chanvre

De même, les deux éprouvettes H et B de la formulation M4 donnent de meilleurs résultats que les deux éprouvettes H et B de la formulation M1 en compression orthogonale au plan d'anisotropie  $E_{\perp}$  et en compression parallèle au plan d'anisotropie  $E_{//}$ . La comparaison des éprouvettes cubiques M1 et M4 et des éprouvettes cylindriques de mêmes formulations avec la même fraction volumique de chanvre montre que les éprouvettes cylindriques ont les plus grandes valeurs en module d'élasticité apparente moyen en compression orthogonale  $E_{c\perp}$ .

Tronet (Tronet 2016) a proposé un modèle pour exprimer la limite élastique en fonction du dosage massique en chènevotte dans le béton de chanvre :

$$\sigma_y = \sigma_B \cdot \left( B \cdot \left( \frac{1}{\rho_B} + \frac{t-1}{\rho_W} \right) \right)^a + \sigma_S \cdot \left( S \cdot \left[ \frac{1}{\rho_S} + (B/S) \cdot \left( \frac{1}{\rho_B} + \frac{t-1}{\rho_W} \right) \right] \right)^b \quad (2-1)$$

Avec :

$\sigma_y$  : La limite d'élasticité.

$\sigma_B$  : La contrainte spécifique du liant (126,2 MPa)

B : La quantité de liant [kg en m<sup>3</sup> de mélange de béton de chanvre]

$\rho_B$ : La masse volumique de liant (2450 kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_W$ : La masse volumique de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$\sigma_S$ : La contrainte spécifique de chènevotte (233 MPa)

S: La quantité de chènevotte (kg en m<sup>3</sup> de mélange de béton de chanvre)

$\rho_S$ : La masse volumique de chènevotte ( 1465 kg/m<sup>3</sup>)

t: le taux d'hydratation, ici égale à 1,1 (Tronet 2016)

a = est une valeur constante des essais de compression sur pâtes de liant avec différents rapports E / L, qui est près de 2 pour le ciment et 3 pour la chaux, ici égale à 2,98 (valeur de Nguyen, 2010 a)

b = 4,9 (paramètre d'ajustement)

t, a, b, valeurs retenus de (Tronet 2016)

A partir de cette équation empirique, il serait possible de prédire à la fois la formulation (chaux, chènevotte) pour obtenir les résistances souhaitées. Ces valeurs utilisées ne sont valables que pour des rapports E/L de l'ordre de 0,55.

On voit (Figure 2-43) que le modèle fonctionne bien et permet d'expliquer la grande différence entre M4H et M4B en terme de résistance : une relativement faible variation de la fraction volumique de chènevotte a un gros effet sur la résistance finale.

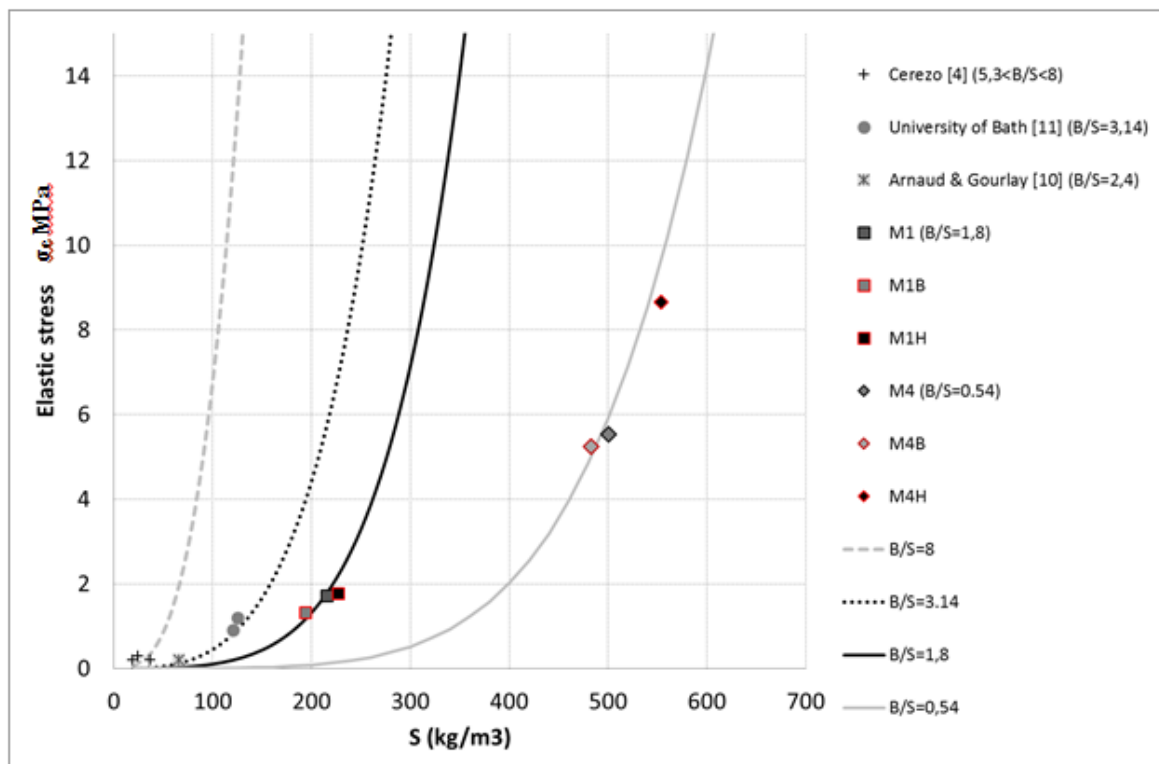


Figure 2-43 : Limite élastique en fonction du dosage en chènevotte dans le béton de chanvre, avec de la chaux Tradical ® PF70-Tronet (Tronet 2013).

## 2.5 Conclusion

Les recherches précédentes ont majoritairement porté sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de chanvre.

Le comportement en compression du béton de chanvre varie en fonction du dosage en liant. Si le matériau contient moins de liant, en compensant ce manque de liant par une compression à l'état frais (Nguyen et al. 2009, Tronet et al. 2011), un comportement beaucoup plus ductile du matériau durci est obtenu, avec une phase élastique, une phase de transition, une partie plastique à faible pente (écrouissage) et une dernière partie avec une augmentation plus rapide de la contrainte (densification). L'évolution des caractéristiques mécaniques, est d'autant plus importante que le dosage en granulats est grand.

Le granulat végétal est fortement compressible, c'est-à-dire qu'il a une grande capacité de déformation. Sa réponse laisse penser que ce matériau a des propriétés parasismiques intéressantes.

En général, le béton de chanvre possède un comportement élasto-plastique avec des déformations plastiques présentes dès les faibles niveaux de sollicitation. Pour des taux de chanévotte suffisants, le matériau ne présente pas de rupture fragile marquée et il est susceptible de subir de 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).

La faible résistance mécanique du béton de chanvre proviendrait d'une part des particules très souples, et d'autre part de l'arrangement imparfait de ces particules (Bouloc 2006). Le compactage peut aider à augmenter la résistance en compression du béton de chanvre (Cérézo 2005).

Les deux formulations de béton de chanvre testées sous compression uniaxe M1 et M4, présentent une grande capacité de déformation, pouvant aller jusqu'à 80%, sans présenter de rupture fragile. Pour un faible dosage en granulats (formulation M1), le comportement est de type ductile avec un fort endommagement en fin d'essai. Pour une composition plus riche en granulats (formulation du M4), le comportement est de type ductile suivi d'un fort écrouissage avec une élévation significative de la contrainte de compression lorsque le dosage en granulats augmente.

Les déformations et les contraintes présentées dans les résultats de nos essais de compression simple correspondent aux déformations vraies et des contraintes vraies.

En raison du frottement pendant le processus de moulage et de compression, un gradient de propriétés mécaniques apparaît entre la partie supérieure et la partie inférieure du cylindre de béton de chanvre compacté, avec le même ordre de grandeur pour M1 et M4. Ce phénomène a été expliqué par (Tronet 14a) : au cours du processus de compactage, la paroi de la cellule de compression de cylindre porte une partie de la charge de compression. Ensuite, la pression subie par le mélange est plus faible dans la partie inférieure que dans la partie supérieure du cylindre. Il en résulte un état de compactage plus faible dans la partie inférieure, caractérisé par une faible densité à l'état frais comme à l'état durci.

Nous avons trouvé que la limite d'élasticité en compression orthogonale aux plans d'anisotropie ( $C_{\perp}$ ) est toujours supérieure à la résistance à la compression dans le sens parallèle ( $C_{//}$ ). En comparant cette contrainte avec les résultats de Tronet et al. (TRO 14b, LEC 15), on constate que la résistance d'un cylindre est proche de la résistance de son maillon le plus faible, associé avec le cube extrait de la partie basse de chaque cylindre. Il confirme que le frottement le long de la cellule de compactage induit une hétérogénéité significative du comportement mécanique dans un même bloc cylindrique (gradient d'élasticité et de résistance). Ce processus de compactage doit être techniquement amélioré, en utilisant deux pistons mobiles par exemple, afin de minimiser ce problème et d'assurer une meilleure homogénéité des éléments préfabriqués.



Nous trouvons effectivement deux modules d'Young différents dans les sens  $C_{\perp}$  et  $C_{//}$ , ce qui confirme l'anisotropie de ce matériau d'un point de vue mécanique, et le comportement isotrope transverse de ce matériau.

La taille des échantillons a un effet négligeable comparé à son élancement : la comparaison du travail expérimental de Pierre Tronet (TRO 14b) avec la présente étude montre que les valeurs de la limite d'élasticité obtenues sur des cubes (rapport d'élancement de 1) et sur des cylindres (rapport d'élancement égal à 2) sont similaires, mais que l'écroutissement plastique de la matière est considérablement amplifié avec les cubes. On peut donc dire qu'il n'y a pas d'effet de taille dans cette gamme de longueur sur la contrainte moyenne mesurée.

# **Chapitre 3. Comportement au cisaillement des mélanges chaux/chanvre**



### 3.1 Introduction

Toute paroi structurale d'un bâtiment subit des sollicitations combinées, le plus souvent de compression (charges permanentes et de service) et de cisaillement (contreventement).

Une des principales limitations dans le développement du béton de chanvre pour le bâtiment neuf est son coût de mise en œuvre. Ce coût est, entre autres, due à son association avec des composants structuraux en bois, en considérant les mélanges chaux/chanvre comme simple matériau de remplissage (pas de contribution mécanique). Pourtant, les murs du béton de chanvre devraient être en mesure de supporter une partie de la charge et d'assurer au moins une partie du contreventement. Cela permettrait de réduire les sections de bois et d'éliminer les composants imposés pour le contreventement. Une économie de la fourniture et de la pose d'une partie de la structure est potentiellement réalisable. Des essais de contreventement ont déjà été menés sur une paroi chaux/chanvre réalisée par projection (Munoz et al. 2013). Les auteurs démontrent que la présence de la brique de chanvre est non seulement en mesure de remplacer les poutrelles de contreventement, mais aussi d'améliorer grandement la rigidité, la résistance et la ductilité du contreventement. Afin de mieux comprendre les comportements au cisaillement des mélanges chaux/chanvre et les leviers influençant ce comportement, nous avons développé un système de mesure de cisaillement combiné. Il s'agit d'une boîte de cisaillement instrumentée. Ce dispositif nous a permis de caractériser le comportement global des différentes formulations (M1, M4 et Chanvribloc) au cisaillement. L'utilisation d'une caméra et du logiciel de traitement d'images ARAMIS, nous a aussi permis, par une analyse des champs de déformation, de déduire la localisation du cisaillement et d'obtenir les paramètres élastiques associés. Dans une première partie, nous présentons le système de mesure original développé au laboratoire. Ensuite, nous présentons les résultats macroscopiques et enfin, le traitement des données pour obtenir les champs de déformations et les paramètres élastiques

### 3.2 Caractérisation du comportement au cisaillement

Pour réaliser des essais de cisaillement sur des milieux granulaires ou sur des composites, un certain nombre de voies ont été explorées dans la littérature. Le système le plus utilisé en génie civil, en mécanique des sols, est la boîte de Casagrande. Ce système consiste à caractériser le comportement frottant et dilatant de milieux pulvérulents par cisaillement localisé. L'adaptation de la boîte de Casagrande ou d'un dispositif équivalent pour caractériser le comportement au cisaillement du béton de chanvre pose des questions scientifiques délicates : y a-t-il localisation lors du cisaillement (dans une boîte de Casagrande, la localisation du cisaillement est induite par le dispositif) et quel est le degré d'homogénéité de la déformation dans l'échantillon ? Quel est le comportement intrinsèque d'un volume représentatif de mélange chaux/chanvre ? Quel est le niveau d'anisotropie de comportement en cisaillement ? Des essais plus élaborés, comme l'essai Arcan, présentent les mêmes limites. De plus, au vu de la littérature, avoir un volume représentatif pour l'essai Arcan sur de tels matériaux demanderait le développement d'un disque de cisaillement de l'ordre d'un mètre de diamètre.

Pour ces raisons, et pour nous rapprocher aussi des sollicitations qui seront appliquées au matériau en situation, c'est-à-dire inséré dans une structure poteaux poutre soumise à un effort latéral, nous avons développé le système présenté en (Figure 3-1-a, Figure 3-1-b).

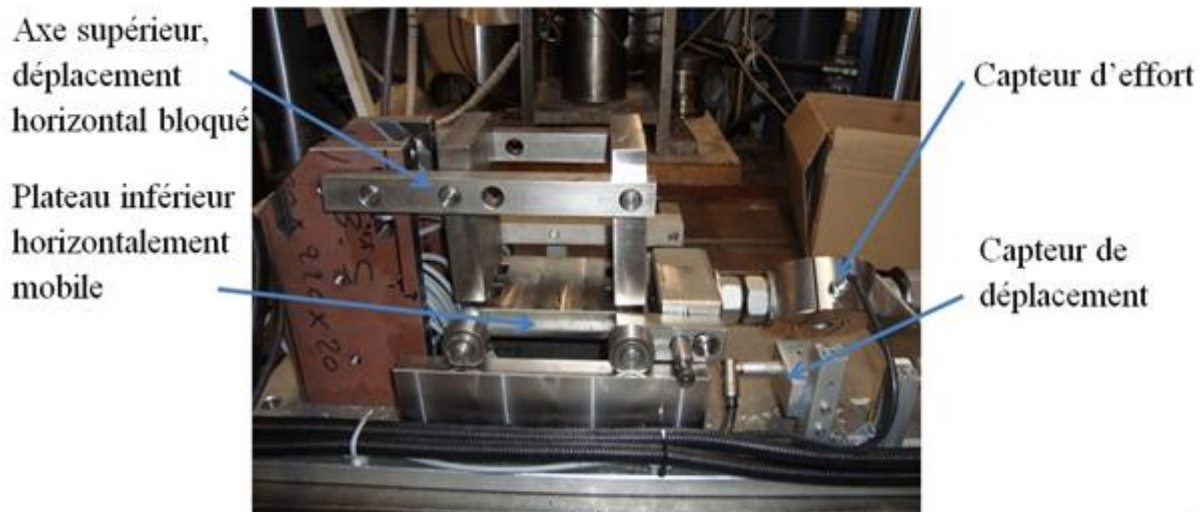


Figure 3-1-a : Dispositif expérimental de cisaillement proposé

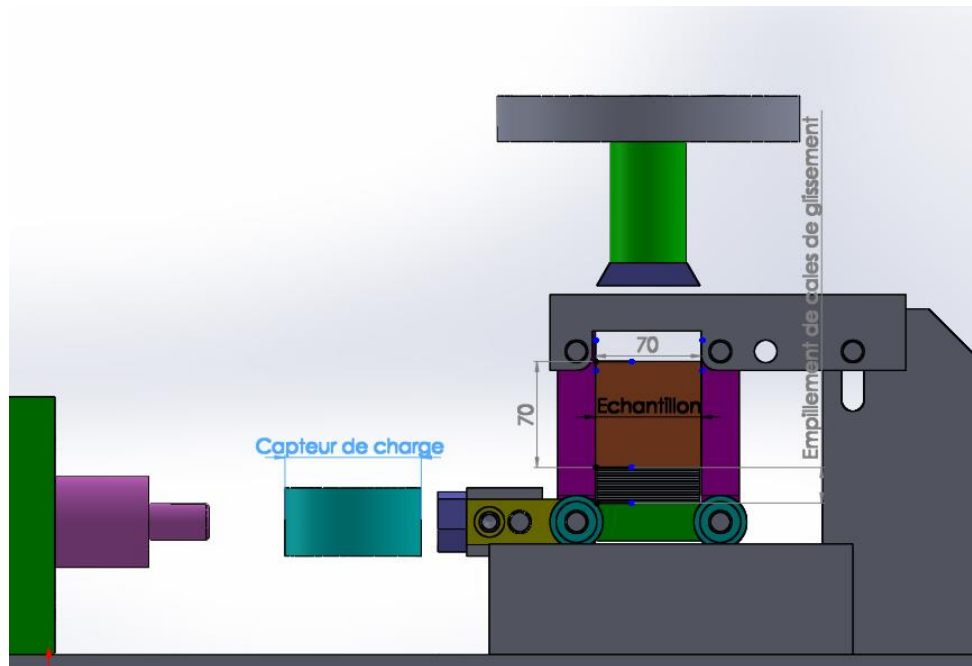


Figure 3-1-b : Dispositif expérimental de cisaillement proposé

Ce dispositif de cisaillement est constitué d'une boîte de cisaillement dont le volume intérieur en position initiale correspond à l'échantillon étudié. Des éprouvettes de différentes tailles tels que des cubes de 7 cm ou de 10 cm d'arrête peuvent être testées. L'échantillon doit être parfaitement ajusté entre ces 2 faces latérales. Le plateau inférieur est mobile et les faces latérales, reliées à un axe fixe en partie supérieure, sont supposées indéformables.

Une charge verticale peut être appliquée à l'échantillon, en plaçant le dispositif sous une presse de 250 kN de capacité. Le déplacement horizontal de la plaque inférieure de la boîte est réalisé par un vérin électrique à vis. Ce vérin a une vitesse réglable et génère l'effort de cisaillement qui est mesuré par un capteur de force. Couplé à un capteur de déplacement, nous pouvons donc déduire des résultats la contrainte moyenne de cisaillement en fonction de la déformation moyenne, en divisant l'effort de cisaillement par la surface de l'échantillon. La partie supérieure de la boîte est fixée horizontalement, mais est libre de se déplacer verticalement.

La charge de cisaillement, la charge verticale et les déplacements verticaux et horizontaux sont mesurés par les capteurs numériques.

La déformation moyenne de cisaillement peut être calculée comme le rapport entre le déplacement horizontal de la plaque inférieure et la longueur de l'échantillon. La déformation de cisaillement maximale possible avec cet appareil est d'environ 0,5. Cette boîte est destinée à simuler le comportement au cisaillement des bétons de chanvre au sein d'une structure poteau – poutre sans contreventement, avec une faible vitesse de cisaillement ( $0,015 \text{ s}^{-1}$ ).

### 3.2.1 Les difficultés de mise en point et les avantages

La boîte de cisaillement peut présenter plusieurs avantages : les directions principales tournent pendant le test, comme elles le font dans un mur lors de sollicitations de contreventement. L'utilisation d'échantillons relativement petits devrait permettre à chaque type de mur (mince ou épais, compacté, banché ou projeté ...) d'être testé. Un principal inconvénient théorique de cette boîte de cisaillement est que les contraintes principales ne peuvent pas être obtenues directement à partir des données. Ceci rend compliqué la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus dans une configuration de sollicitation triaxiale ou de cisaillement direct. L'autre principal inconvénient est que la contrainte et la déformation ne sont pas uniformes au sein de l'échantillon. En particulier, la partie de l'échantillon dans les angles aigus du parallélogramme formé lors de l'essai tend à être plus densifiée que dans le reste de l'échantillon. Un autre problème pratique est que les forces appliquées à la boîte de cisaillement ne sont pas alignées, de sorte qu'elles forment un couple qui tend à incliner la boîte et à faire basculer l'échantillon au cours des tests.

Les tests préliminaires ont révélé 2 écueils principaux :

- L'absence de rupture en fin de course :

La course maximale du dispositif est de 50 mm. L'analyse des résultats avec cette course ne nous a pas permis d'observer de seuil ou de pic d'effort de cisaillement. Une augmentation de la course maximale reste envisageable, mais n'est d'une part plus du tout représentative d'une sollicitation sur une paroi de bâtiment, même en cas de séisme, et d'autre part l'échantillon confiné dans la boîte de cisaillement a un comportement très ductile. La localisation probable du cisaillement ne se manifeste pas à l'échelle macroscopique par un seuil ou un pic.

- La rotation de l'éprouvette au cours de l'essai :

De même qu'observé sur une paroi projeté par Munoz et al. (Munoz et al.2013), l'échantillon cisailé subit une rotation et un soulèvement au sein du système (Figure 3-2). L'éprouvette pivote, et dans le cas d'une contrainte verticale insuffisante, la surface inférieure perd le contact avec le plateau inférieur.



Figure 3-2 : Montage avec papier abrasif, décollage de l'éprouvette

Un plateau d'application de la charge verticale a été développé pour venir s'adapter à la presse du laboratoire de capacité 250 kN. Une fois mis en place, le système de pression verticale ne tolère aucun déplacement horizontal, et la force doit être appliquée par une plaque solidaire de la presse au niveau de l'axe de rotation supérieur des faces latérales qui lui, reste immobile. Afin d'ajuster la hauteur de l'échantillon de cette sorte, de fines cales de 1 mm d'épaisseur (type clinquants d'acier) sont interposées entre l'échantillon et la plaque inférieure du système (c§ Figure 3-3).



Figure 3-3 : Dispositif expérimental de cisaillement sélectionné



### 3.3 Essai de cisaillement

Pour les tests de cisaillement combinés, trois directions de sollicitation ont été explorées. Le repère est déterminé selon le sens du compactage à la mise en œuvre des éprouvettes pour la nomenclature des essais réalisés, voir (Figure 3-4) :

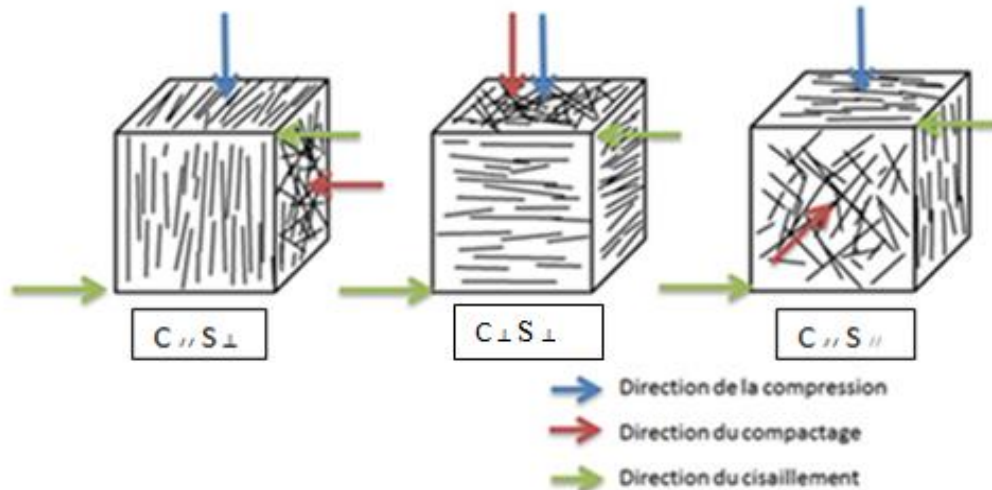


Figure 3-4 : Directions de sollicitation pour l'essai de cisaillement/compression

- C//S⊥ : Compression parallèle aux plans d'anisotropie (ou orthogonale à l'axe d'isotropie), cisaillement (« shear ») orthogonal aux plans d'anisotropie (ou parallèle à l'axe d'isotropie)
- C⊥S⊥ : Compression et cisaillement orthogonaux aux plans d'anisotropie
- C//S// : Compression et cisaillement parallèles aux plans d'anisotropie.

Nous rappelons que les tests ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de 7 cm de côté, extraites de cylindres compactés de diamètre 10 cm x hauteur 20 cm pour les formulations M1 et M4 et d'autres extraites de briques Chanvribloc®. Pour les essais de C⊥S⊥, trois contraintes de compression différentes ont été appliquées : 2, 1 et 0.3 MPa sur les parties haute et basse des éprouvettes cylindriques de 20 cm de hauteur réalisées pour les formulations M1 et M4 voir (Figure 3-5). Dans la configuration C//S⊥, la résistance à la compression impose une contrainte normale maximale plus faible : 1 MPa. De même nous n'avons pas appliqué plus de 0.3 MPa pour la contrainte normale dans la configuration C//S//.

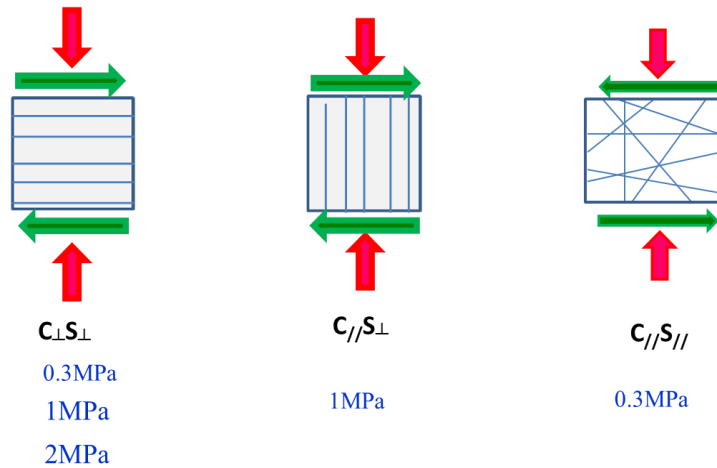


Figure 3-5 : Formulations étudiées et contraintes de compression appliquées

Les éprouvettes de type « Chanvribloc® » ont une résistance très faible à la compression et sont assez difficiles à extraire des blocs. Nous avons augmenté leur taille en augmentant l'épaisseur pour produire des parallélogrammes à base carré (7 cmx7 cmx10 cm) et limité la contrainte normale de compression à 0,3 MPa.

L'essai commence par l'application de l'effort de compression. Une fois que la valeur souhaitée est atteinte, la presse maintient cette valeur en ajustant le déplacement de la traverse tout au long de l'essai de cisaillement. On lance le cisaillement après avoir réglé la vitesse de déplacement du plateau, ici 0,1 mm/s. Une fois le déplacement maximal atteint (50 mm dans la présente étude) le mouvement s'inverse et la machine revient en position initiale à la même vitesse.

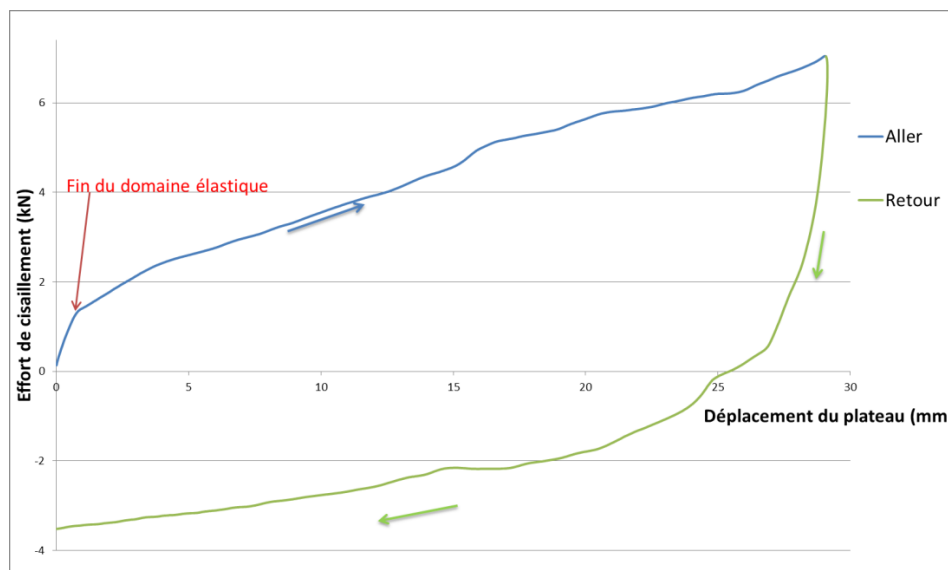


Figure 3-6 : Effort sur un cycle de déplacement de la partie inférieure lors d'un essai de cisaillement  $C_{\perp}S_{\perp}$ , M1H, 2MPa

On observe sur plusieurs essais un changement de pente assez marqué, qui pourrait correspondre à une transition entre un comportement élastique linéaire et un comportement plastique. Mais ce phénomène n'est pas observé à chaque fois. On note ensuite une augmentation assez linéaire de l'effort en fonction du déplacement. Arrivé en fin de course, la courbe du retour nous permet de mettre en valeur la déformation résiduelle lorsque la courbe croise l'axe des abscisses (Figure 3-6). De plus en juxtaposant la courbe du retour avec celle du trajet initial, on peut voir qu'elles ne se superposent pas. Cela peut être dû à la plasticité du matériau et au fait que le volume de l'éprouvette diminue constamment au cours de l'essai indépendamment du sens de déplacement du plateau (Figure 3-7 et Figure 3-8).

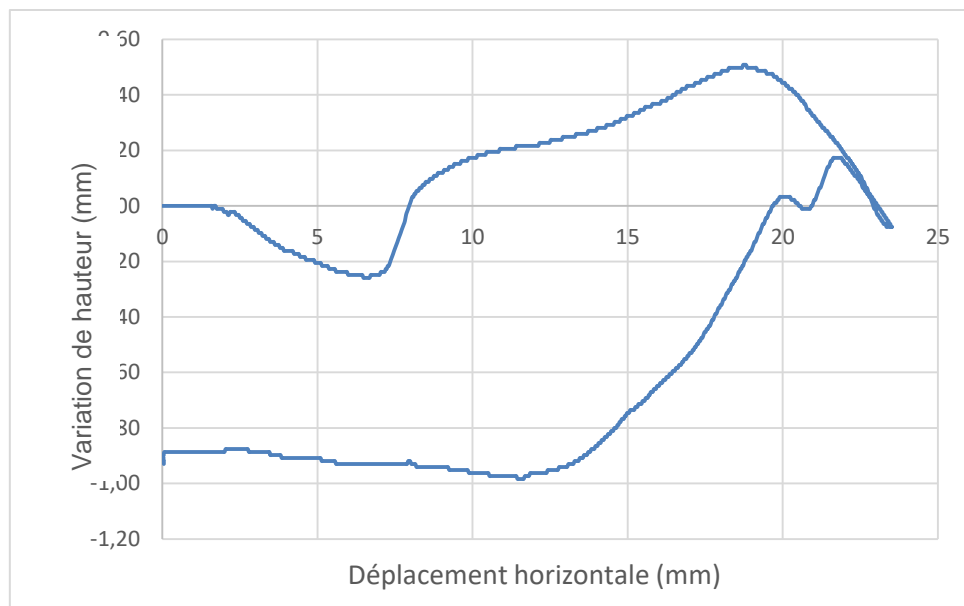


Figure 3-7 : Variation du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal de la partie inférieure, essai M1H C+S, 2MPa

Nous pouvons remarquer d'après les deux figures précédentes (Figure 3-7, Figure 3-8) que dans la phase du chargement de cisaillement, une augmentation très faible de volume apparaît, autour de 0,8%, avant une diminution de 1,5% de volume dans la phase de déchargement. Cela traduit un réarrangement granulaire qui a pour effet de briser les connexions liant-granulat. Aucune rupture n'est constatée d'un point de vue macroscopique, sur la courbe contrainte/déformation de cisaillement.

La possibilité de réaliser un cycle complet avec un déplacement du plateau qui prendrait des valeurs négatives est envisageable par de légères modifications du dispositif. On pourrait ainsi réaliser plusieurs cycles complets sur une même éprouvette et étudier l'hystérésis entre les différents cycles, mais ce n'est pas l'objectif initial de cette étude.

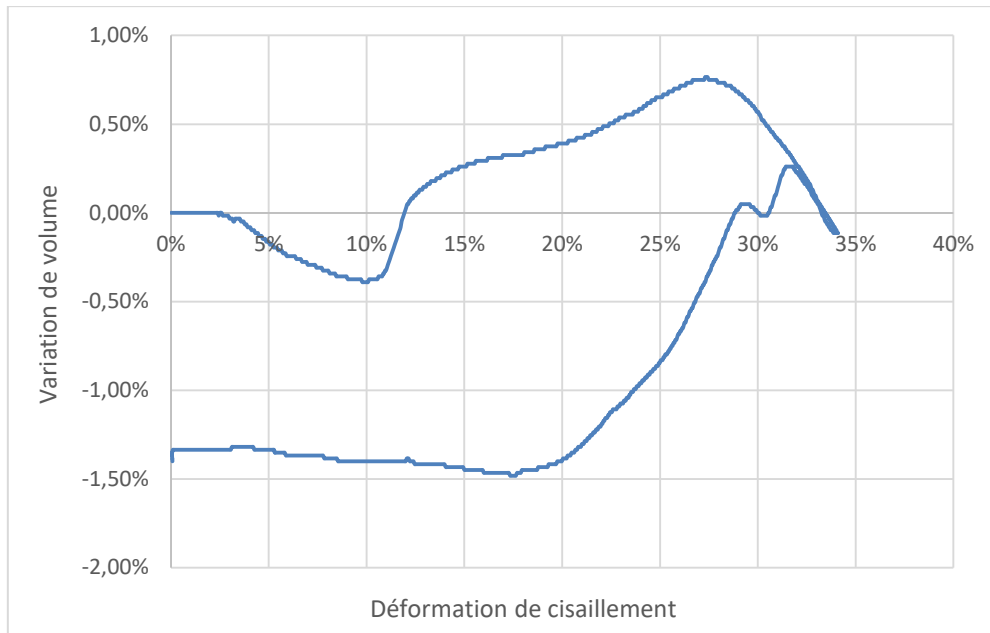


Figure 3-8 : Variation de volume d'éprouvette en fonction des déformations de cisaillement, essai M1H C⊥S⊥, 2MPa

### 3.4 Comportement au cisaillement des bétons de chanvre

#### 3.4.1 Reproductibilité des essais de cisaillement

On s'est intéressé à la réponse en cisaillement pour de fortes valeurs de déformation angulaire, 30 % de déformation angulaire en fonction de la contrainte de cisaillement. Chaque essai prévu a été répété trois fois, pour vérifier sa reproductibilité. Les évolutions de la contrainte de cisaillement selon la déformation angulaire obtenues à partir de trois essais sont superposées. Nous avons constaté une bonne reproductibilité des essais au cisaillement pour la plupart des essais réalisés avec les formulations M1 et M4. La figure (Figure 3-9) montre les résultats de trois essais de C⊥S⊥ de la formulation M1 en partie haute avec une contrainte normale,  $\sigma_n$ , égale à 2 MPa. Nous avons observé qu'aucune rupture brutale ne se produit au cours de ces essais.

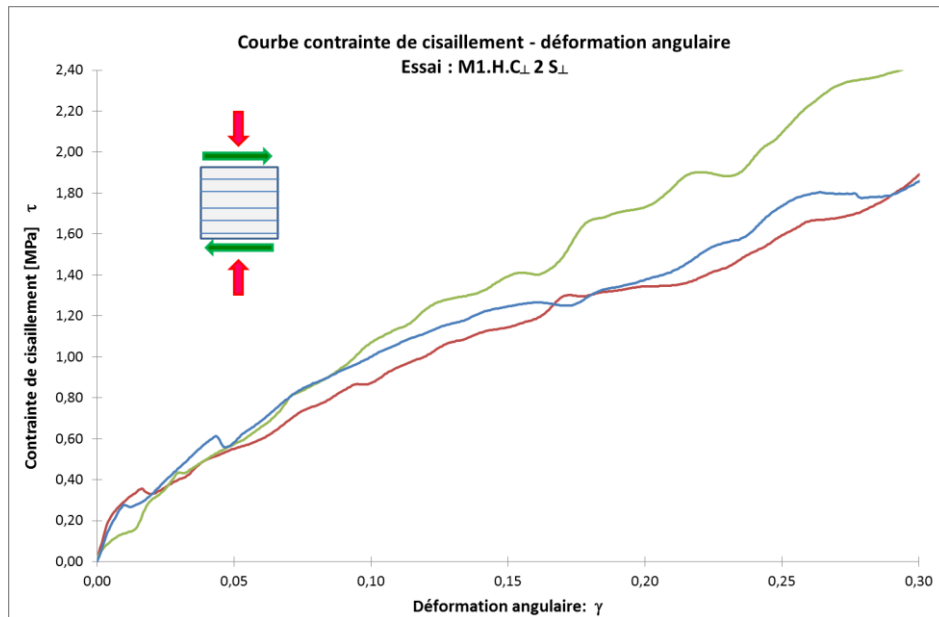


Figure 3-9 : Essai de cisaillement C<sub>⊥</sub>S<sub>⊥</sub> formulation M1, partie haute H,  $\sigma_n = 2$  MPa

Les résultats pour les trois essais dans la configuration C<sub>//</sub>S<sub>//</sub> montrent une bonne reproductibilité au début des essais jusqu'à 2,5% de déformation angulaire puis une dispersion des résultats voir (Figure 3-10). Cette dispersion peut-être due au glissement des couches de chènevotte et à la rupture de l'éprouvette sous la contrainte de compression appliquée. Au cours de l'essai, les couches continuent de glisser et sortent de deux côtés libres de la boîte de cisaillement voir (Figure 3-11).

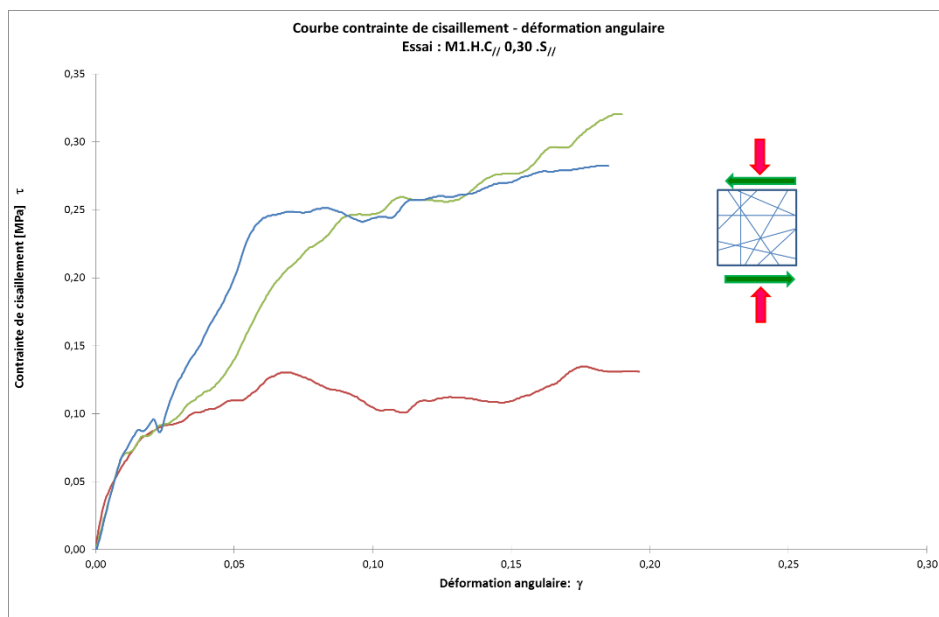


Figure 3-10 : Essai de cisaillement C<sub>//</sub>S<sub>//</sub> formulation M1, partie haute,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

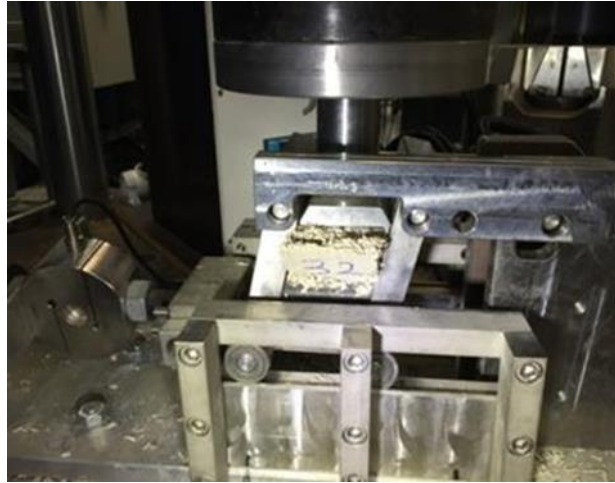


Figure 3-11 : Essai de cisaillement C// S// formulation M1,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

Suite à des problèmes de calage des éprouvettes dans le dispositif ou d'endommagement des éprouvettes lors de leur préparation, certains résultats discordants ont dû être écartés de notre analyse par la suite.

Une éprouvette réalisée à partir des « Chanvribloc® » a été testée. La machine a été conçue pour être polyvalente. La section d'éprouvette (70 x 100 x 70 mm) était plus importante que les autres éprouvettes des formulations M1, M4. La contrainte de compression a été limitée à 0,3 MPa. L'absence d'information sur la composition précise de ces blocs industriels limite fortement l'interprétation des résultats des tests, mais permet d'avoir des données sur un matériau effectivement utilisé sur chantier.

Les figures (Figure 3-12, Figure 3-13) présentent les résultats de plusieurs essais sur les éprouvettes de Chanvribloc®, Nous pouvons remarquer que la répétabilité des essais n'est pas très bonne, probablement du fait que ce matériau est beaucoup plus poreux que M1 et M4, avec des pores inter particule de taille élevée par rapport à la taille de l'échantillon. Les valeurs de résistance au cisaillement sont d'ailleurs beaucoup plus faibles que pour les autres formulations (M1, M4).

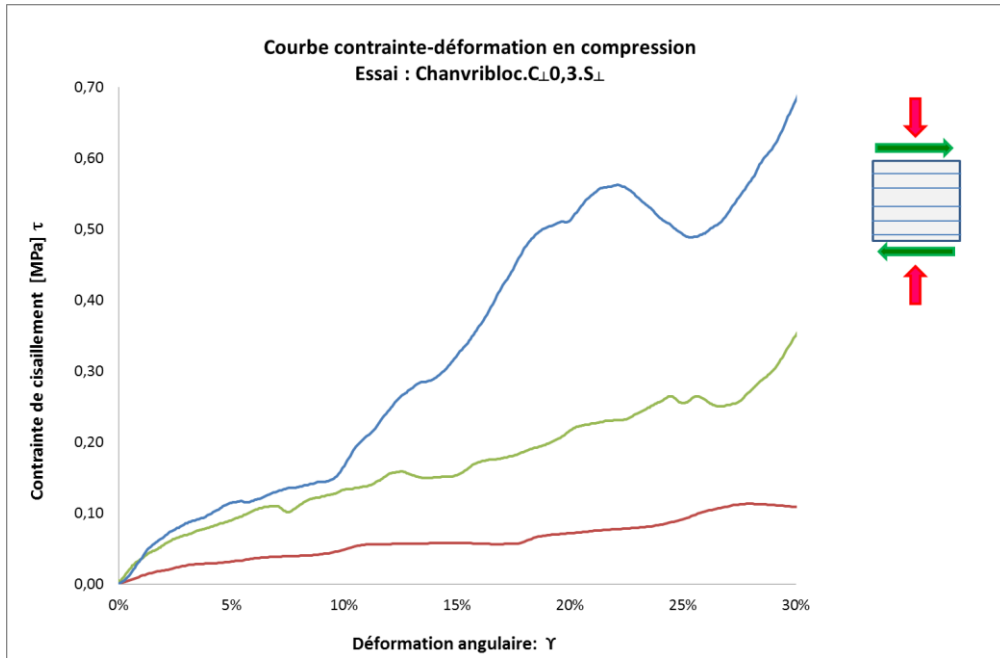


Figure 3-12 : Contrainte de cisaillement  $\tau$  (MPa), essai C $\perp$ S $\perp$ , Chanvribloc®,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

La figure (Fig.3-13) qui présente l'essai de cisaillement C//S $\perp$  avec  $\sigma_n = 0,3$  MPa, montre une contrainte de cisaillement similaire à l'essai de C $\perp$ S $\perp$ ,  $\sigma_n = 0,3$  MPa, c'est-à-dire que l'anisotropie vis-à-vis du cisaillement est négligeable pour ce matériau.

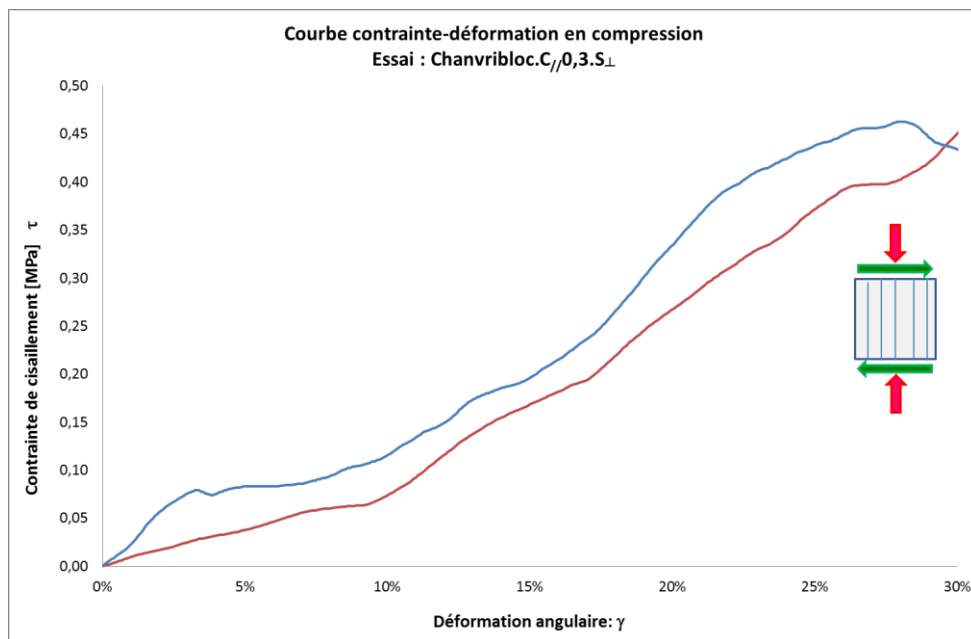


Figure 3-13 : Contrainte de cisaillement  $\tau$  (MPa), essai C//S $\perp$ , Chanvribloc®,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

La figure (Figure 3-14) présente le résultat pour un seul essai de type  $C_{//}S_{//}$  avec  $\sigma_n = 0,3$  MPa, Pour des raisons techniques, nous n'avons pu réaliser l'essai sur trois éprouvettes. Le résultat de cet essai est proche de ceux obtenus dans la configuration  $C_{\perp}S_{\perp}$  et  $C_{//}S_{\perp}$ .

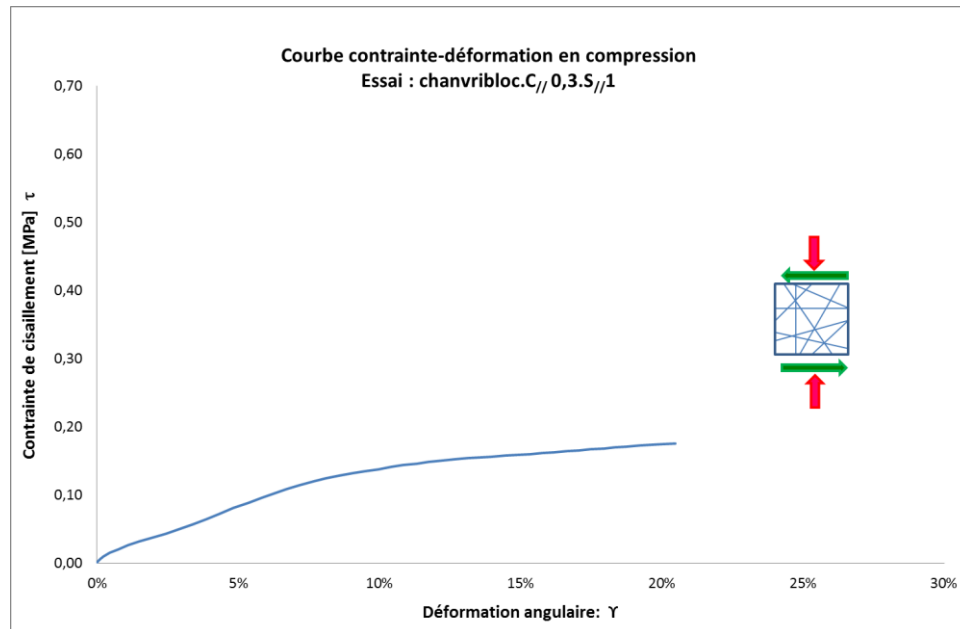


Figure 3-14 : Contrainte de cisaillement  $\tau$  (MPa), essai  $C_{//}S_{//}$  Chanvribloc®,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

Les tableaux (Tableau 3-1, Tableau 3-2) montrent les contraintes de cisaillement moyennes pour une déformation angulaire de 0,3 pour les différents essais réalisés sur la formulation M4 (partie haute M4H et partie basse M4B).



<b>M4H</b>		
<b>Formulations</b>	<b><math>\tau</math> (<math>\gamma=0,3</math>)</b>	<b><math>\tau</math> 0,3 moyenne</b>
M4HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 1	2,283	2,251
M4HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 2	1,911	
M4HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 3	2,559	
M4HC $\perp$ 1 S $\perp$ 1	3,485	3,341
M4HC $\perp$ 1 S $\perp$ 2	3,561	
M4HC $\perp$ 1 S $\perp$ 3	2,976	
M4HC $\perp$ 2 S $\perp$ 1	2,822	3,639
M4HC $\perp$ 2 S $\perp$ 2	5,174	
M4HC $\perp$ 2 S $\perp$ 3	2,922	
M4HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 1	1,599	1,472
M4HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 2	1,966	
M4HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 3	0,851	
M4HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 1	3,443	2,751
M4HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 2	2,312	
M4HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 3	2,499	

Tableau 3-1 : Contraintes de cisaillement  $\tau$  (MPa) au 30% de déformation angulaire, éprouvettes M4H

<b>M4B</b>		
<b>Formulations</b>	<b><math>\tau</math> (<math>\gamma=0,3</math>)</b>	<b><math>\tau</math> 0,3 moyenne</b>
M4BC $\perp$ 0,5S $\perp$ 1	1,948	2,154
M4BC $\perp$ 0,5 S $\perp$ 2	2,573	
M4BC $\perp$ 0,5 S $\perp$ 3	1,942	
M4BC $\perp$ 1 S $\perp$ 1	2,946	2,806
M4BC $\perp$ 1 S $\perp$ 2	2,497	
M4BC $\perp$ 1 S $\perp$ 3	2,975	
M4BC $\perp$ 2 S $\perp$ 1	3,498	3,433
M4BC $\perp$ 2 S $\perp$ 2	3,832	
M4BC $\perp$ 2 S $\perp$ 3	2,970	
M4BC $\parallel$ 0,5 S $\parallel$ 1	1,194	2,208
M4BC $\parallel$ 1 S $\parallel$ 2	3,228	
M4BC $\parallel$ 1 S $\parallel$ 3	2,203	
M4BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 1	1,358	2,170
M4BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 2	1,877	
M4BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 3	3,274	

Tableau 3-2 : Contraintes de cisaillement  $\tau$  (MPa) au 30% de déformation angulaire, éprouvettes M4B

Nous pouvons remarquer que, comme pour la compression (cf. Chapitre 2), les éprouvettes issues de la partie haute des éprouvettes cylindriques sont plus résistantes et plus rigides que celles issues de la partie basse.

Pour l'essai C $\perp$ S $\perp$ , il est possible de tracer des points sur un diagramme de Mohr ( $\sigma_n$ ,  $\tau$ ) vu que trois essais de cisaillement sont réalisés pour des valeurs de contrainte normale différentes avec des charges de compression (0,3, 1, 2MPa). Des valeurs apparentes macroscopiques d'angle d'écoulement interne,  $\Phi$ , et la contrainte théorique apparente à contrainte normale nulle, C, peuvent donc être déduites pour cette déformation. Ces valeurs ne sont pas les valeurs d'angle de frottement interne et de cohésion au sens de la mécanique des poudres ou des sols, puisqu'il ne s'agit pas d'un lieu d'écoulement, mais de la valeur de la contrainte tangentielle pour une déformation donnée. Les figures (Figure 3-15, Figure 3-16) présentent les valeurs apparentes fictives de  $\Phi$ , et de C, pour les éprouvettes M4H et M4B de l'essai C $\perp$ S $\perp$ .

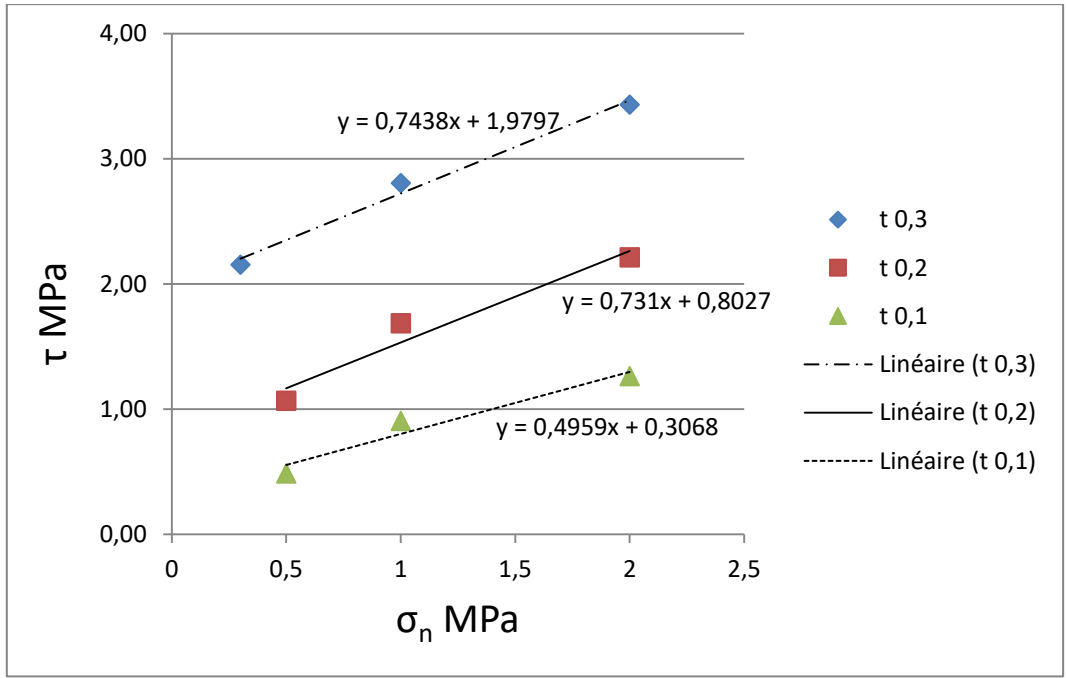


Figure 3-15: Valeurs apparentes fictives d'angle de frottement  $\Phi$  et cohésion apparente  $C$  pour M4B essai  $C \perp S \perp$

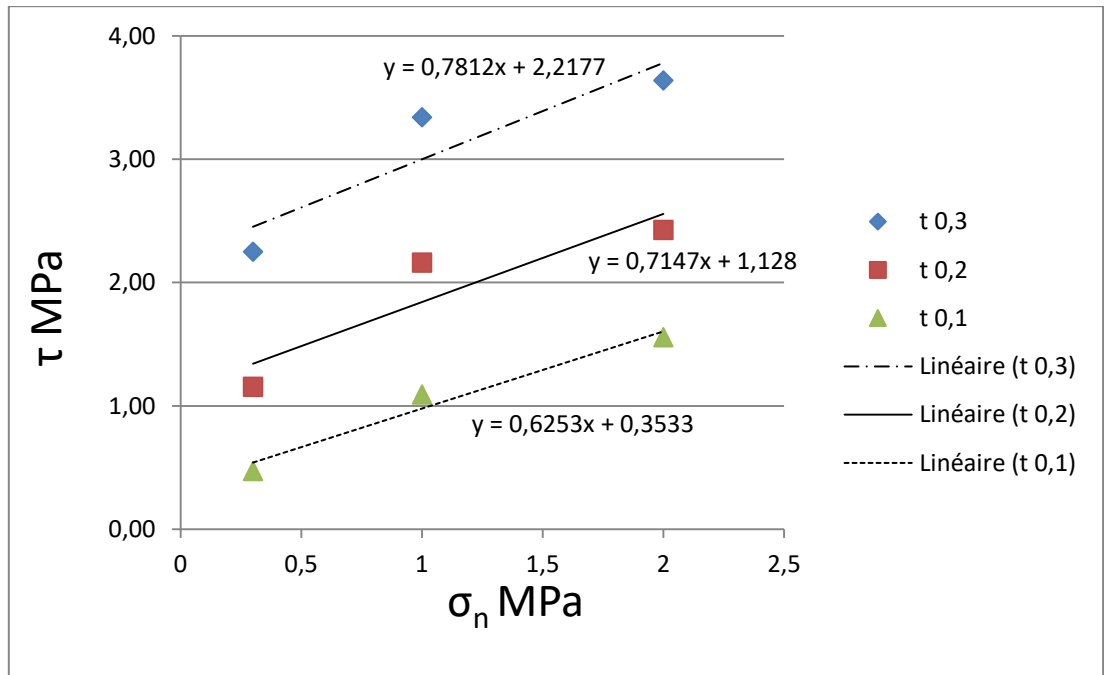


Figure 3-16 : Valeurs apparentes fictives d'angle de frottement  $\Phi$  et cohésion apparente  $C$  pour M4H essai  $C \perp S \perp$

Pour l'éprouvette M4H, à 30% de déformation ces valeurs sont  $\Phi_{0,3}(M4H) = 38^\circ$  et  $C_{0,3} = 2,2$  MPa, et pour M4B l'angle de frottement apparente est  $\Phi = 37^\circ$ , et la cohésion apparente est  $C = 1,9$  MPa.

Pour 20% de déformation, on trouve  $\Phi_{0,2}(M4H) = 36^\circ$  et  $C_{0,2} = 1,1$  MPa, et  $\Phi_{0,2}(M4B) = 36^\circ$  et  $C_{0,2} = 0,8$  MPa. A 10% de déformation  $\Phi_{0,1}(M4H) = 32^\circ$  et  $C_{0,1} = 0,4$  MPa, et  $\Phi_{0,1}(M4B) = 26^\circ$  et  $C_{0,1} = 0,3$  MPa.

Les tableaux (Tableau 3-3, Tableau 3-4) montrent les contraintes de cisaillement moyennes pour différents essais réalisés avec des échantillons extraits de la partie haute, H, et basse, B, d'une éprouvette de formulation M1.

<b>M1H</b>		
<b>Formulations</b>	<b><math>\tau</math> (<math>\gamma=0,3</math>)</b>	<b>moyenne</b>
M1HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 1	1,344	1,136
M1HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 2	0,980	
M1HC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 3	1,083	
M1HC $\perp$ 1 S $\perp$ 1	1,587	1,653
M1HC $\perp$ 1 S $\perp$ 2	1,924	
M1HC $\perp$ 1 S $\perp$ 3	1,449	
M1HC $\perp$ 2 S $\perp$ 1	2,431	2,019
M1HC $\perp$ 2 S $\perp$ 2	1,835	
M1HC $\perp$ 2 S $\perp$ 3	1,790	
M1HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 1	0,321	0,245
M1HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 2	0,282	
M1HC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 3	0,131	
M1HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 1	1,135	0,925
M1HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 2	0,916	
M1HC $\parallel$ 1 S $\perp$ 3	0,725	

Tableau 3-3 : Contraintes de cisaillement  $\tau$  (MPa) au 30% de déformation angulaire, éprouvettes M1H

<b>M1B</b>		
<b>Formulations</b>	<b><math>\tau</math> (<math>\gamma=0,3</math>)</b>	<b>moyenne</b>
M1BC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 1	0,946	0,643
M1BC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 2	0,295	
M1BC $\perp$ 0,3 S $\perp$ 3	0,689	
M1BC $\perp$ 1 S $\perp$ 1	1,281	1,127
M1BC $\perp$ 1 S $\perp$ 2	0,928	
M1BC $\perp$ 1 S $\perp$ 3	1,172	
M1BC $\perp$ 2 S $\perp$ 1	1,135	1,297
M1BC $\perp$ 2 S $\perp$ 2	1,299	
M1BC $\perp$ 2 S $\perp$ 3	1,458	
M1BC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 1	0,199	0,188
M1BC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 2	0,135	
M1BC $\parallel$ 0,3 S $\parallel$ 3	0,231	
M1BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 1	0,833	0,725
M1BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 2	0,591	
M1BC $\parallel$ 1 S $\perp$ 3	0,751	

Tableau 3-4 : Contraintes de cisaillement  $\tau$  (MPa) au 30% de déformation angulaire, éprouvettes M1B

La courbe  $\tau = f(\sigma_n)$  pour l'essai C $\perp$ S $\perp$  avec les trois valeurs de charge de compression (0,3, 1, 2 MPa) donne les valeurs apparentes macroscopiques d'angle d'écoulement interne et les contraintes théoriques apparentes à contrainte normale nulle, C, pour l'éprouvettes M1H et M1B (Figure 3-17 et Figure 3-18).

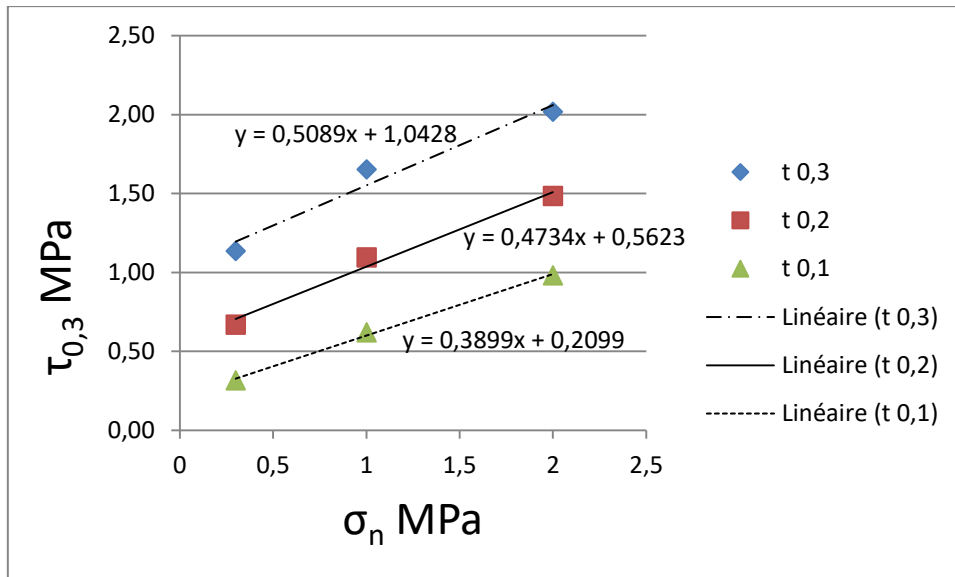


Figure 3-17 : Valeurs d'angle d'écoulement interne et contraintes théoriques apparente C, pour M1H essai C⊥S⊥

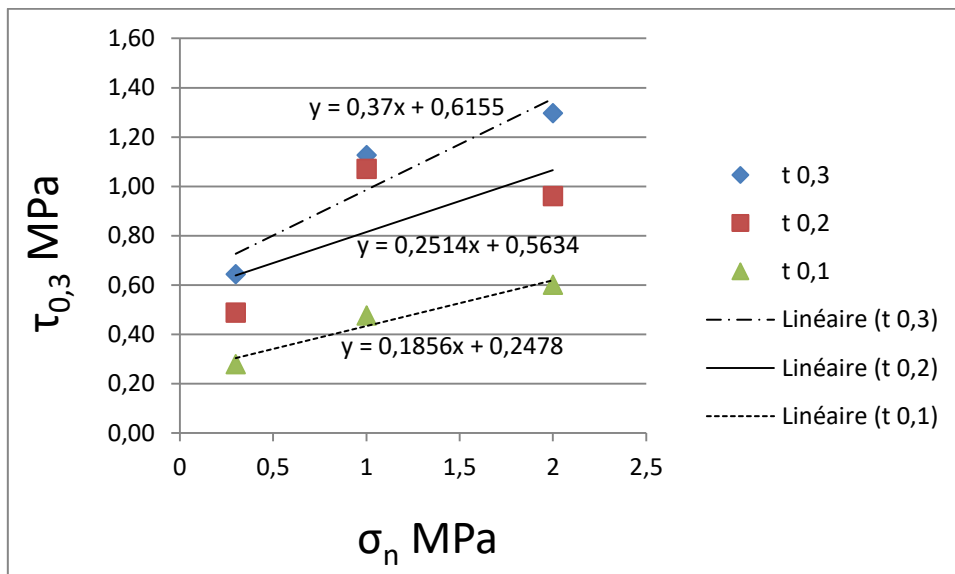


Figure 3-18 : Valeurs d'angle d'écoulement interne et contraintes théoriques apparente C, pour M1B essai C⊥S⊥

Nous pouvons remarquer que dès que la rigidité de l'éprouvette augmente, l'angle d'écoulement interne augmente aussi.

### 3.4.2 Influence de la formulation

Au cours du précédent chapitre, nous avons vu les différents mécanismes liés à la mise en œuvre par compactage gouvernent l'homogénéité des éprouvettes obtenues. Ici nous étudions l'influence des éprouvettes selon les valeurs de contrainte moyenne de cisaillement,  $t$ , à 10%, 20% et 30% de déformation angulaire.

Les figures (Figure 3-19, Figure 3-20, Figure 3-21) présentent les valeurs de contrainte moyenne  $\tau$  à 10%, 20% et 30% successivement pour M4H, M4B, M1H et M1B sous une contrainte normale de 1 MPa pour l'essai C//S $\perp$ .

Les trois figures montrent que l'augmentation du pourcentage de la déformation angulaire est directement et proportionnellement liée aux contraintes moyennes,  $t$ , des éprouvettes étudiées. Globalement à part pour M4, (Figure 3-19), les éprouvettes extraites de la partie haute des cylindres présentent une résistance au cisaillement plus élevée que celles extraites de la partie basse.

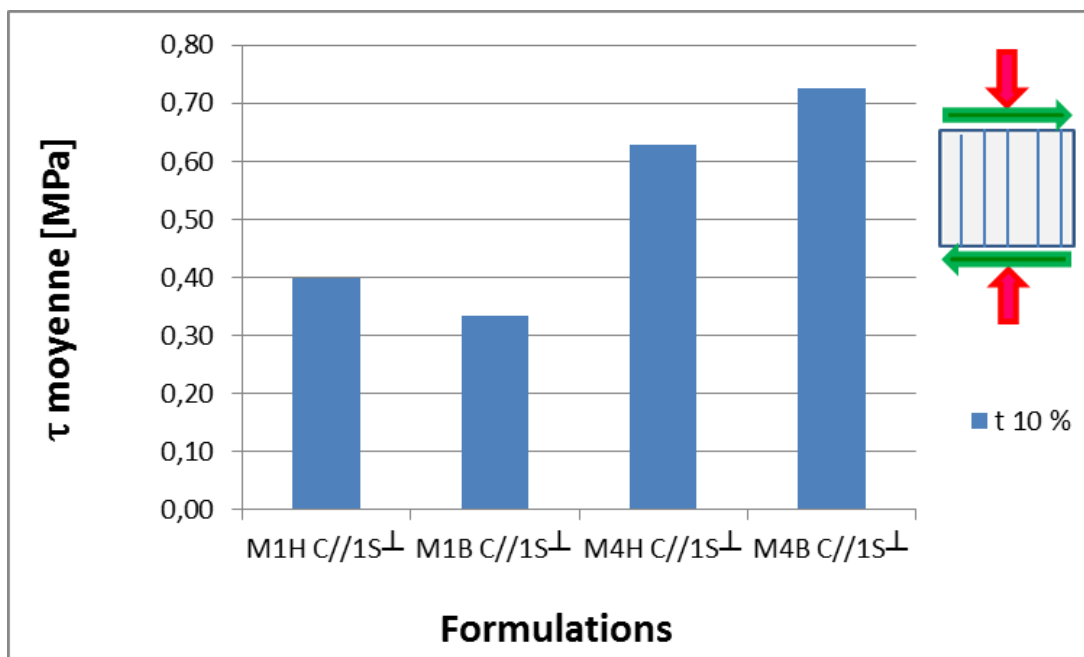


Figure 3-19 : Contrainte de cisaillement moyenne  $\tau$  à 10% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 1 MPa, essai C//S $\perp$ .

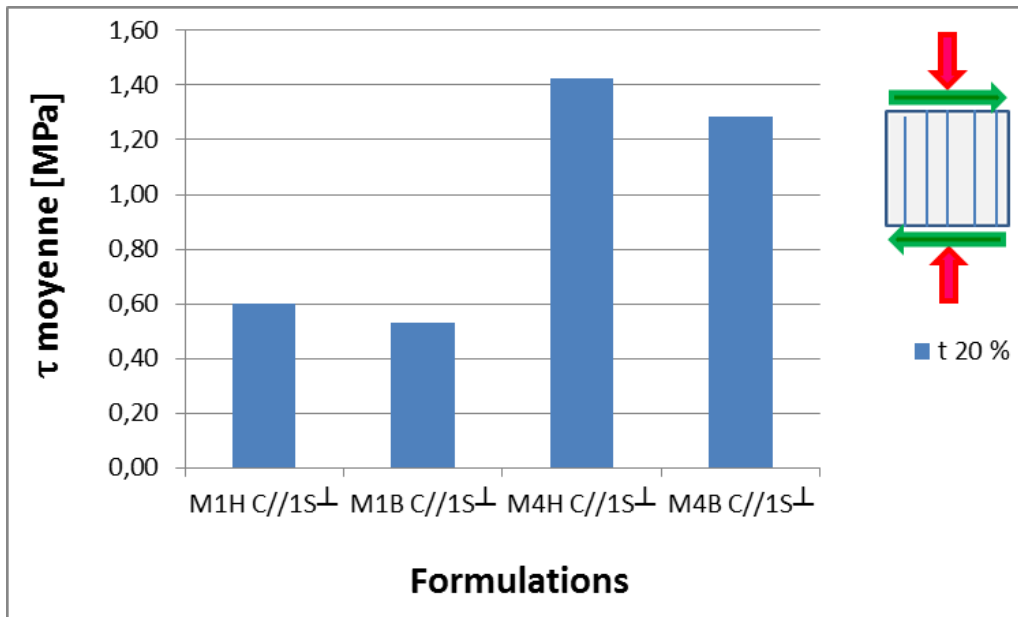


Figure 3-20 : Contrainte de cisaillement moyenne  $\tau$  à 20% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 1 MPa, essai C//S $\perp$ .

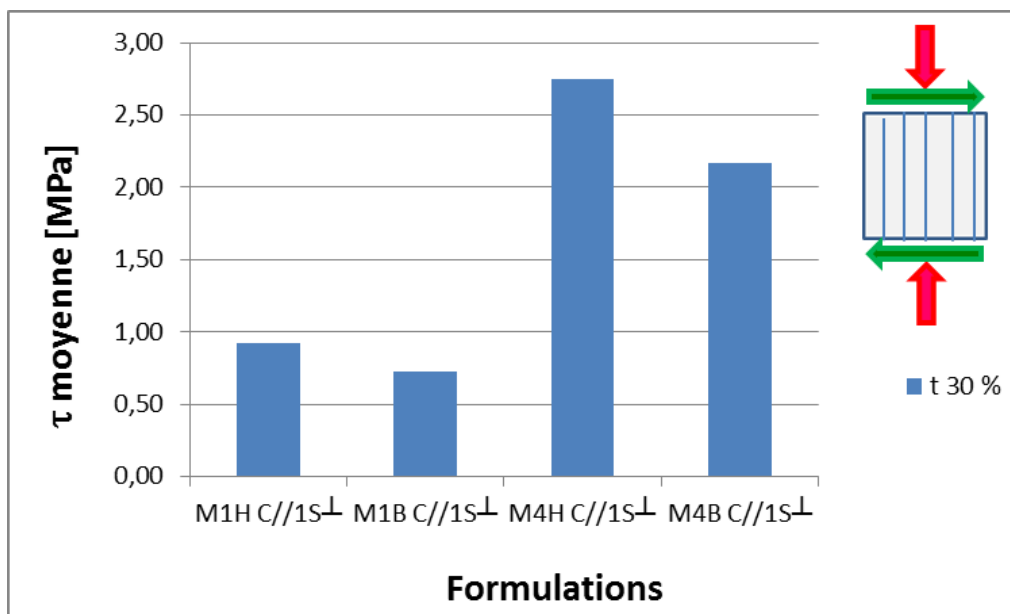


Figure 3-21 : Contrainte de cisaillement moyenne  $\tau$  à 30% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 1 MPa, essai C//S $\perp$ .



Les figures suivantes, (Figure 3-22 à Figure 3-24) montrent les valeurs de contrainte moyenne  $t$  à 10%, 20% et 30% successivement pour M1H, M1B et Chanvribloc® sous une contrainte normale de 0,3 MPa pour l'essai C//S//.

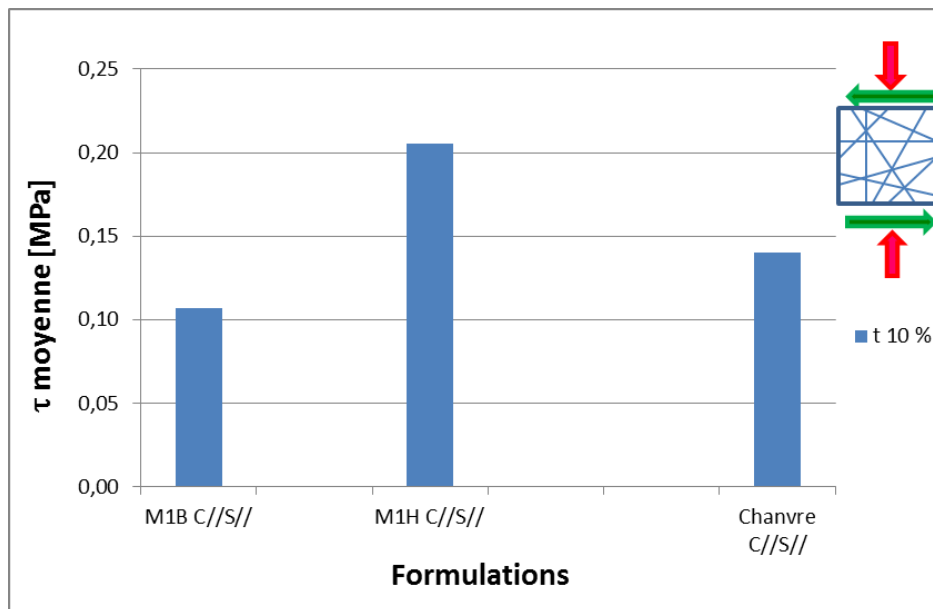


Figure 3-22 : Contrainte de cisaillement moyenne  $t$  à 10% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 0,3 MPa, essai C//S//.

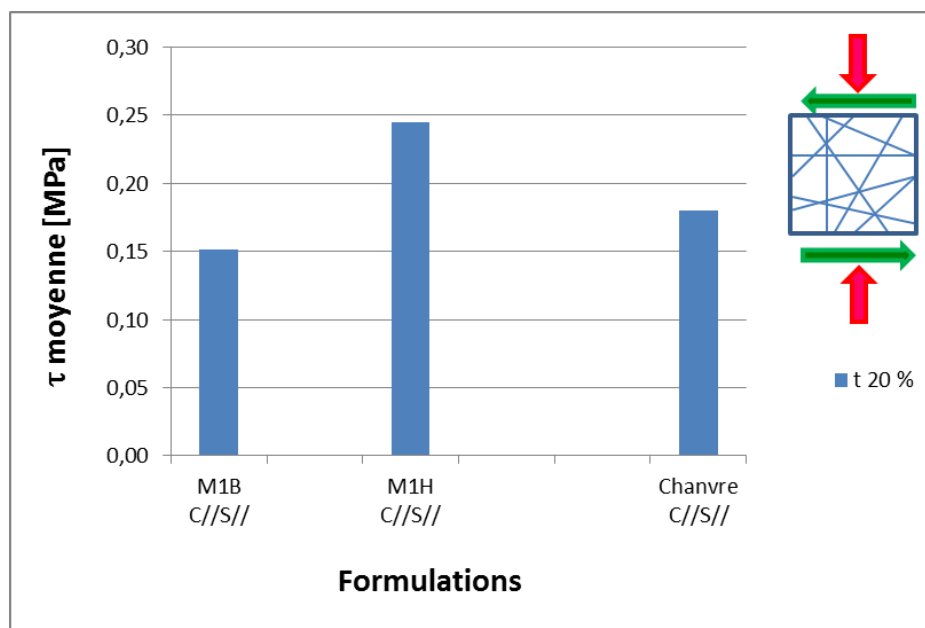


Figure 3-23 : Contrainte de cisaillement moyenne  $t$  à 20% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 0,3 MPa, essai C//S//.

L'éprouvette M1H montre toujours de meilleurs résultats de contrainte moyenne  $\tau$  à 10%, 20% et 30% de déformation angulaire. Les résultats ci-contre confirment que l'augmentation du pourcentage de la déformation angulaire est relative aux contraintes moyennes  $\tau$  dans les éprouvettes étudiées. Dans cet essai, le Chanvribloc® a montré pour 10% et 20% de déformation angulaire une valeur de contrainte moyenne plus importante que M1B, la partie basse de la formulation M1. En revanche, pour 30%, nous ne pouvons pas avoir de résultat pour le Chanvribloc® vu que l'éprouvette est ruinée avant qu'elle n'atteigne 30% de déformation angulaire.

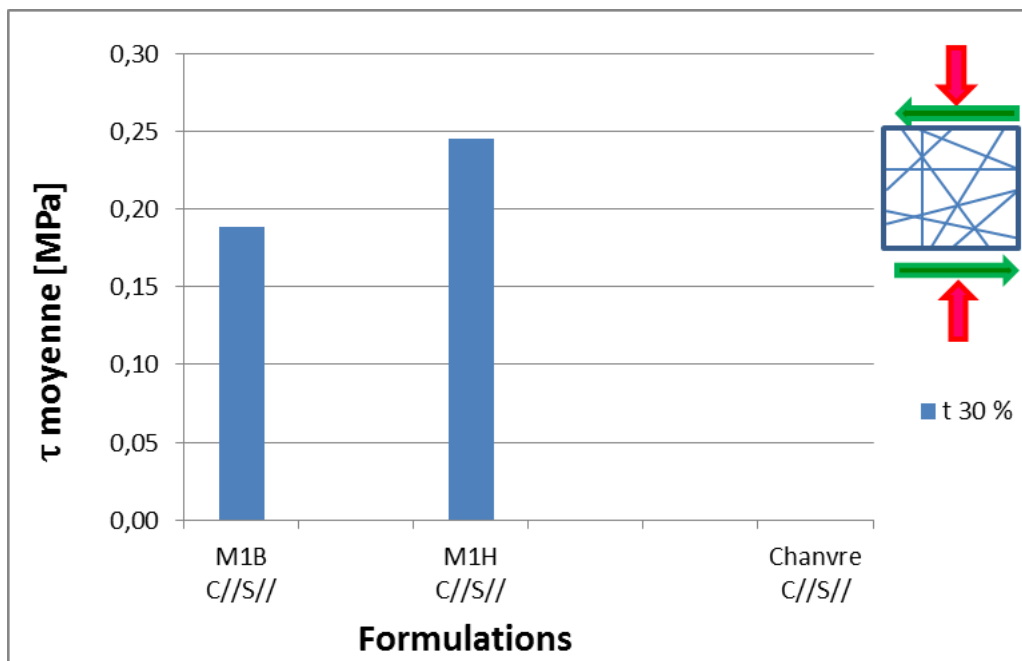


Figure 3-24 : Contrainte de cisaillement moyenne  $\tau$  à 30% de déformation angulaire pour plusieurs éprouvettes sous une contrainte normale de 1 MPa, essai C//S//.

Les Figures (Figure 3-25 à Figure 3-27) montrent des valeurs de coefficient apparent de cohésion  $C$  à 10%, 20% et 30% de déformation angulaire pour les éprouvettes M1H, M1B, M4H, M4B.

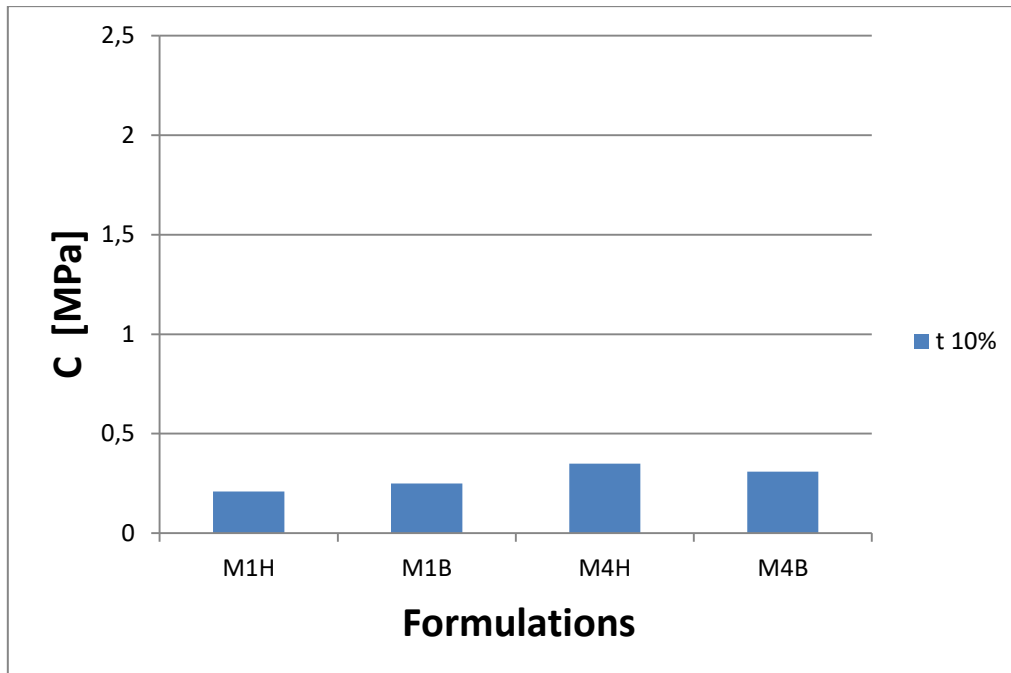


Figure 3-25 : Valeur de coefficient apparent de cohésion C (MPa) à 10% de déformation angulaire pour les éprouvettes M1H, M1B, M4H, M4B

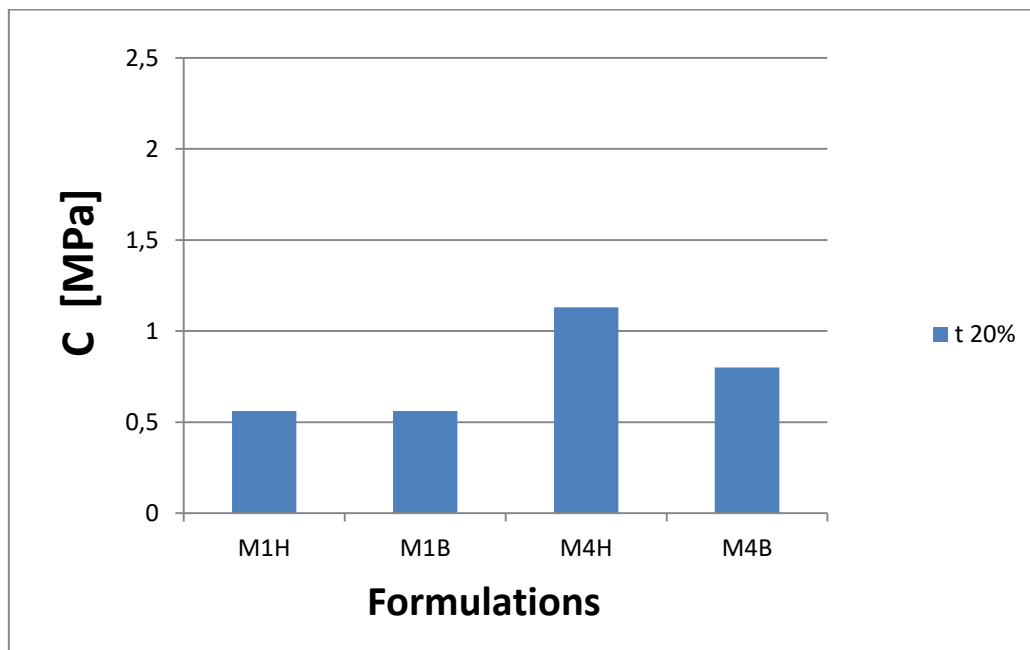


Figure 3-26 : Valeur de coefficient apparent de cohésion C (MPa) à 20% de déformation angulaire pour les éprouvettes M1H, M1B, M4H, M4B

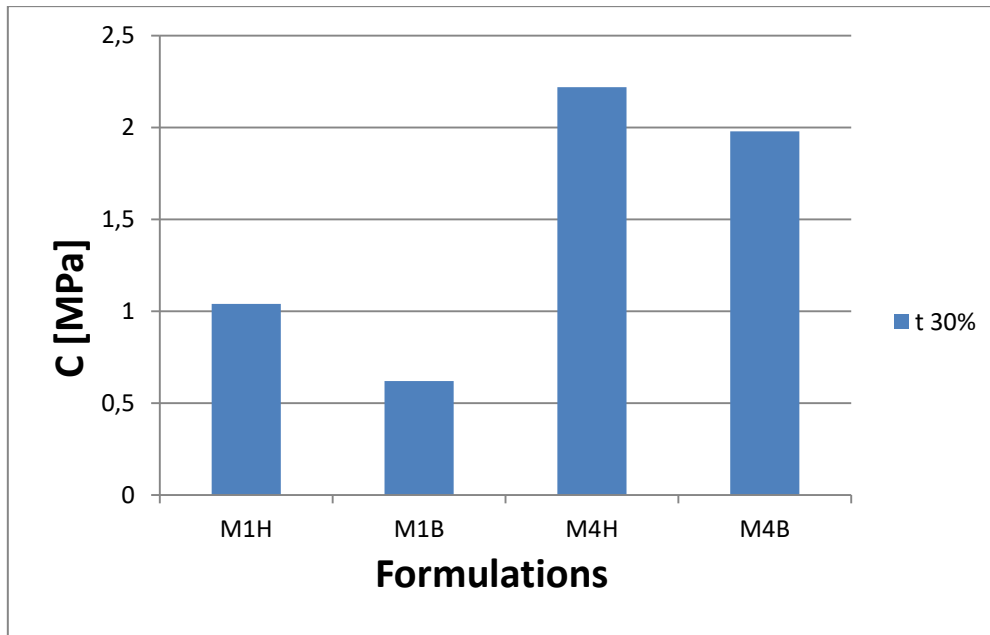


Figure 3-27 : Valeurs de coefficient apparent de cohésion C (MPa) à 30% de déformation angulaire pour les éprouvettes M1H, M1B, M4H, M4B

Nous pouvons remarquer que l'augmentation de la déformation angulaire conduit à l'augmentation du coefficient de cohésion apparente C.

### 3.4.3 Hétérogénéité liée à la résistance au cisaillement

Comme nous avons montré que la procédure de compactage joue un rôle important sur les caractéristiques mécaniques entre le bas et le haut de l'éprouvette cylindrique, les tableaux (Tableau 3-5) et (Tableau 3-6) montrent consécutivement la différence des contraintes moyennes  $\tau$  entre le haut et le bas des éprouvettes de formulations M1 et M4 à 10%, 20%, 30% de déformation angulaire.

Formulations	$\tau$ 30%	$\tau_H / \tau_B$	$\tau$ 20%	$\tau_H / \tau_B$	$\tau$ 10%	$\tau_H / \tau_B$
M1H	2,019	1,56	1,485	1,55	0,982	1,63
M1B	1,297		0,961		0,601	

Tableau 3-5 : Différence des contraintes moyennes  $\tau$  entre le haut et le bas des éprouvettes M1 10%, 20%, 30% de déformation angulaire (MPa)

Formulations	$\tau$ 30%	$\tau_H / \tau_B$	$\tau$ 20%	$\tau_H / \tau_B$	$\tau$ 10%	$\tau_H / \tau_B$
M4H	3,639	1,06	2,426	1,09	1,557	1,2
M4B	3,433		2,214		1,264	

Tableau 3-6 : Différence des contraintes moyennes  $\tau$  entre le haut et le bas des éprouvettes M4 10%, 20%, 30% de déformation angulaire (MPa)

Les valeurs du rapport  $\tau_H / \tau_B$  pour la formulation M1 à 10%, 20%, 30% (voir Tab.3-5), sont assez homogènes avec une moyenne proche de 1,5, c'est-à-dire que la résistance de la partie haute (H) est plus grande d'une fois et demi celle de la partie basse (B) de M1 pour les trois taux de déformation angulaire 10%, 20%, 30%. Tandis que dans le cas de la formulation M4, le rapport d'homogénéité de résistance au cisaillement entre le haut et le bas est proche de 1.

En comparant le rapport d'homogénéité de résistance au cisaillement avec celui obtenu en compression voir (§2.1.3.1), nous trouvons des valeurs d'hétérogénéité de résistance au cisaillement proches de celles obtenues en compression pour les formulations M1 et M4. Les valeurs d'hétérogénéité de la résistance au cisaillement de la formulation M4 sont par ailleurs proches de celles obtenues par Tronet (Tronet, 2013).

#### 3.4.4 Bilan

Les essais de cisaillement présentent une assez bonne reproductibilité en générale. Nous pouvons remarquer qu'aucune rupture brutale ne se produit sur l'ensemble des éprouvettes testées. Ces essais ne montrent pas un comportement fragile du matériau. Au contraire, la ductilité observée permet d'envisager certaines applications structurelles notamment dans les zones parasismiques.

De plus, le domaine considéré comme élastique est très réduit, voire impossible à détecter de manière macroscopique.

Nous avons aussi observé que la résistance au cisaillement est corrélée à la charge de confinement, c'est-à-dire que la résistance au cisaillement augmente en même temps que la contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette. L'observation des résultats pour les deux parties, haute et basse des éprouvettes cylindriques confectionnées, pour une contrainte maximale de compression de 2MPa à 30% de déformation angulaire, montre que la partie haute H de la formulation M4, donne les meilleurs résultats de résistance au cisaillement, autour de 1,8 MPa.

### 3.5 Rigidité de cisaillement R

En théorie, la rigidité de cisaillement R, est une grandeur physique intrinsèque à chaque matériau. Pendant le traitement des essais, nous avons trouvé que ces modules dépendent du chargement appliqué, ils ne sont donc pas intrinsèques au matériau.

Cette variation de R avec le chargement peut être due à plusieurs phénomènes :

- Une consolidation

- La rotation de l'échantillon au cours de l'essai. Cette hypothèse doit être confirmée pendant le traitement d'image par Aramis.

Pour calculer la rigidité de cisaillement R, nous avons pris R comme une pente sécante à 3% de déformation angulaire. Les données de celle-ci sont bien différentes du module de cisaillement G qui est la pente initiale dans la partie élastique dans le digramme contrainte-déformation réel.

Après avoir calculé la rigidité de cisaillement R pour chaque type d'essai ( $C_{\perp}S_{\perp}$ ,  $C_{//}S_{\perp}$ ,  $C_{//}S_{//}$ ), nous avons calculé R moyen pour les trois essais répétés comme le montre le tableau (Tableau 3-7).

Formulations	sens de charge	charge appliqué	N° l'essai	R (MPa)	R moyen	écart type
M1H	M1HC <sub>//</sub> S <sub>//</sub>	0,3 Mpa	1	3,308	3,517	0,583
		0,3 Mpa	2	4,175		
		0,3 Mpa	3	3,067		
	M1HC <sub>//</sub> S <sub>⊥</sub>	1 Mpa	1	5,342	6,270	1,277
		1 Mpa	2	7,727		
		1 Mpa	3	5,741		
	M1HC <sub>⊥</sub> S <sub>//</sub>	0,3 Mpa	1	5,328	4,861	0,605
			2	4,178		
			3	5,077		
		1 MPa	1	6,362	8,617	2,05
			2	10,370		
			3	9,118		
		2 MPa	1	13,181	14,055	1,058
			2	15,232		
			3	13,753		

Tableau 3-7 : Rigidité de cisaillement moyen R pour l'éprouvette M1H, MPa

Un tableau identique a été constitué pour chacune des éprouvettes étudiées, M1H, M1B, M4H, M4B et Chanvribloc®.

### 3.5.1 Rigidité de cisaillement moyen R pour différentes éprouvettes

Nous adoptons ici les notations du paragraphe précédent, pour distinguer le sens du module de rigidité au cisaillement R :

L'indice // est lié à un cisaillement dans un plan de cisaillement parallèle aux plans d'anisotropie

L'indice  $\perp$  est lié à un cisaillement dans un plan perpendiculaire aux plans d'anisotropie.

Nous allons donc distinguer  $R_{\perp\perp}$ ,  $R_{\perp//}$  et  $R_{//}$  (le premier symbole indique la direction du plan de cisaillement considéré, le second indique la direction de l'effort normal appliqué)

La (Figure 3-28) montre le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{//}$  pour l'essai de type  $C_{//}S_{//}$  avec un chargement en compression  $\sigma_n = 0,3$  MPa.

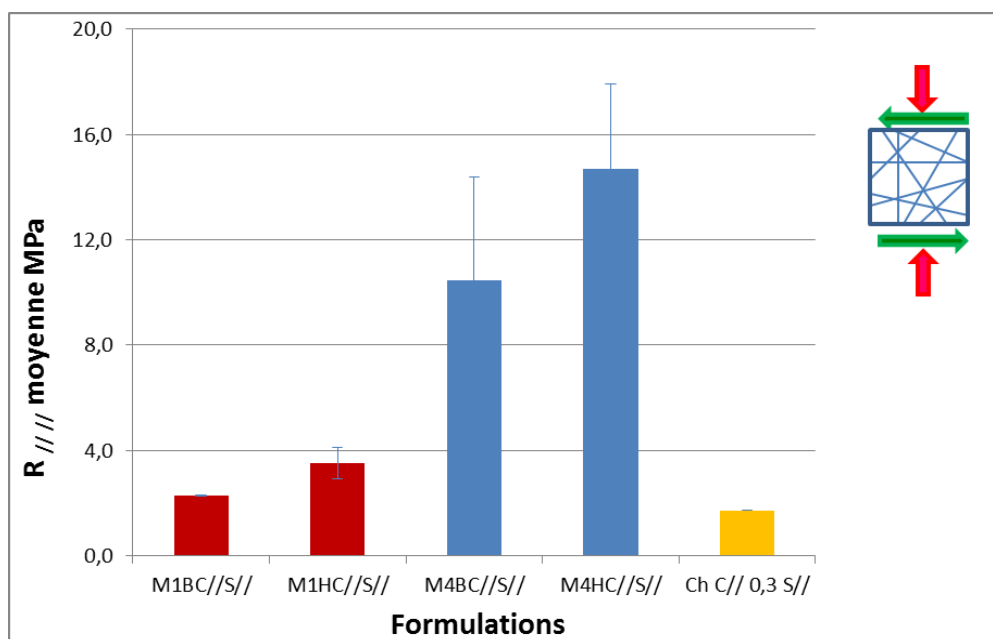


Figure 3-28 : Module de cisaillement moyen apparent  $R_{//}$ , configuration  $C_{//}S_{//}$ ,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

Nous pouvons remarquer que l'éprouvette M4H, dans les mêmes conditions de compression normale, a une plus grande valeur du module  $R_{//}$  et que l'éprouvette Chanvribloc® a la plus

faible valeur. Nous pouvons observer une valeur de R environ 4 fois supérieure pour la formulation M4 par rapport à la formulation M1.

La figure (Figure 3-29) montre le module de rigidité au cisaillement  $R_{\perp\perp}$  pour l'essai  $C_{\perp}S_{\perp}$ ,  $\sigma_n = 0,3$  MPa, où l'éprouvette M4H est en moyenne la plus rigide, mais de manière beaucoup moins significative que précédemment (cf. variabilité).

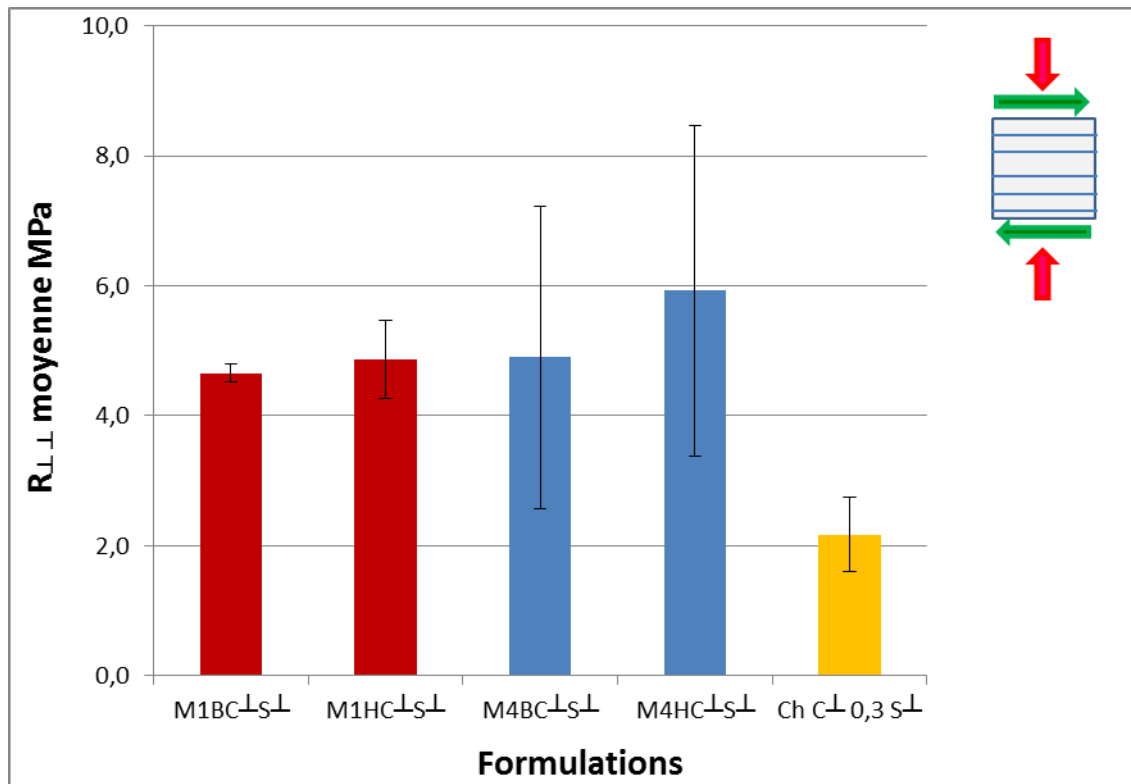


Figure 3-29 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$ , configuration  $C_{\perp}S_{\perp}$ ,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

La figure (Figure 3-30) présente  $R_{\perp//}$  pour plusieurs éprouvettes pour l'essai  $C_{//}S_{\perp}$ ,  $\sigma_n = 1$  MPa. Nous pouvons remarquer, comme précédemment, que les différences entre les éprouvettes sont peu significatives. Les résultats de la (Figure 3-31) montrent des variations plus marquées entre les formulations et des valeurs moyennes plus élevées pour le mélange M4. Sur un matériau isotrope, les valeurs de modules de cisaillement devraient être très voisines. Ceci démontre l'influence de l'anisotropie et du chargement sur le comportement au cisaillement du matériau.



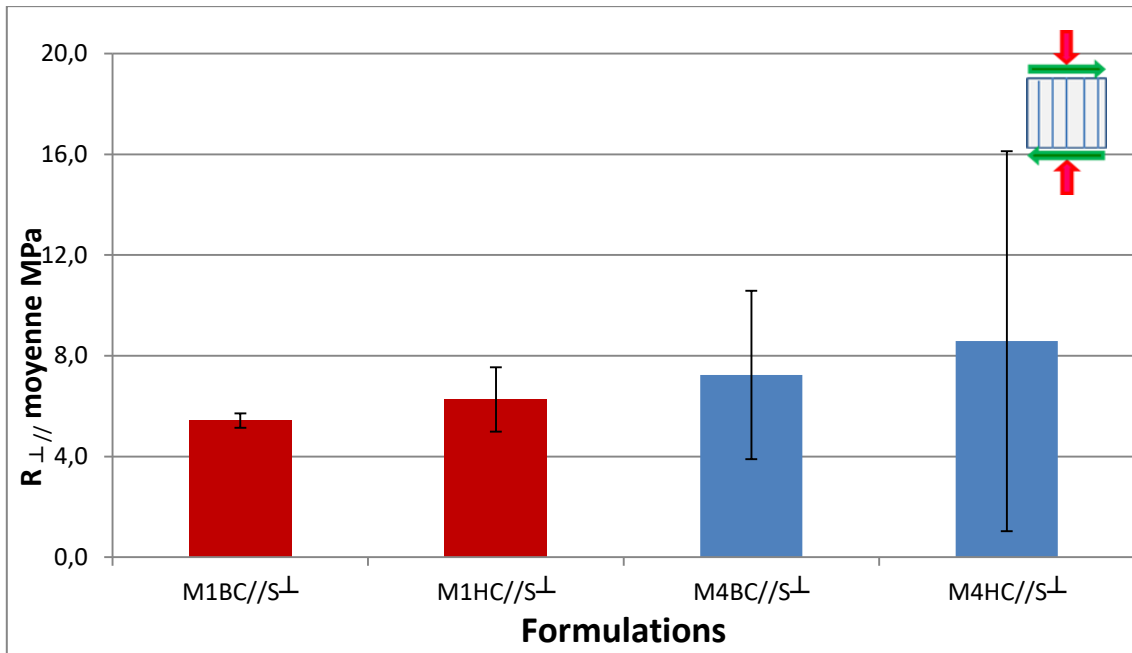


Figure 3-30 : Module de cisaillement apparent moyen  $R_{\perp//}$ , configuration C $\perp$ S $\perp$ ,  $\sigma_n = 1$  MPa

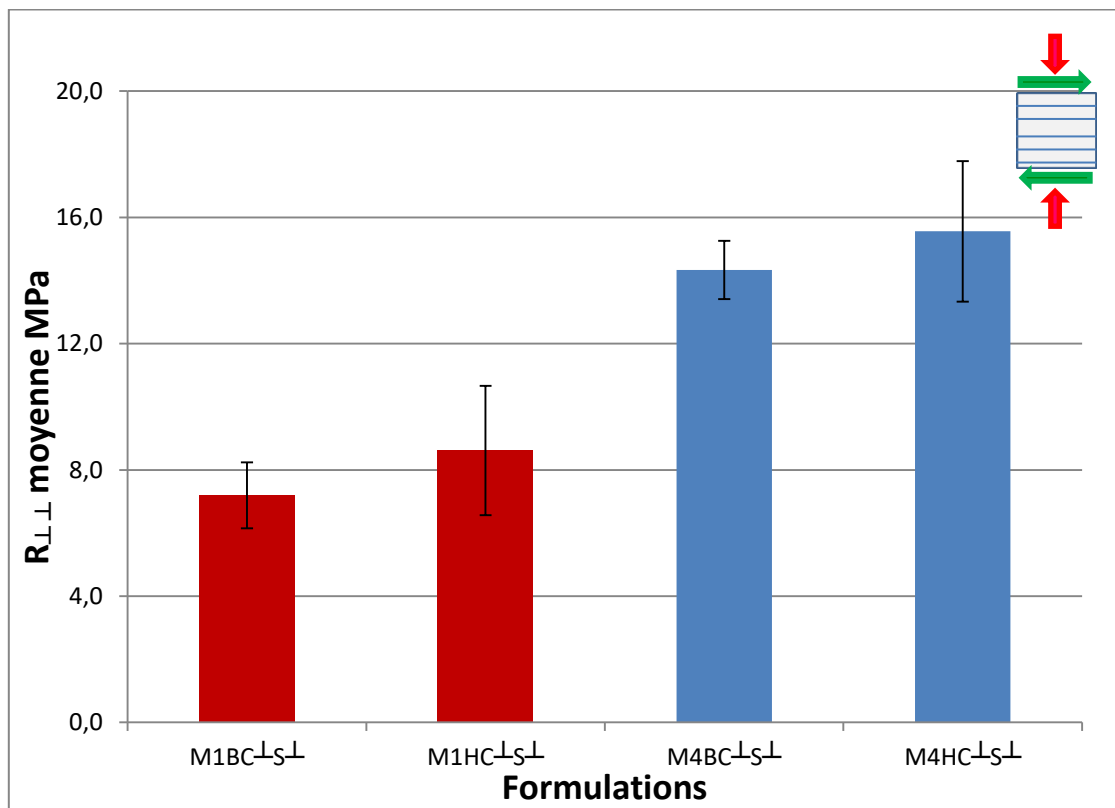


Figure 3-31 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  configuration C $\perp$ S $\perp$ ,  $\sigma_n = 1$  MPa

La figure (Figure 3-32) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  pour plusieurs éprouvettes pour l'essai  $C\perp S\perp$ ,  $\sigma_n = 2\text{MPa}$ . L'éprouvette M4H donne la plus grande valeur en  $R_{\perp\perp}$  parmi tous les essais réalisés précédemment, et l'éprouvette M1B présente la plus faible valeur en  $R_{\perp\perp}$ . Les éprouvettes M1H et M4B montrent des résultats proches entre eux.

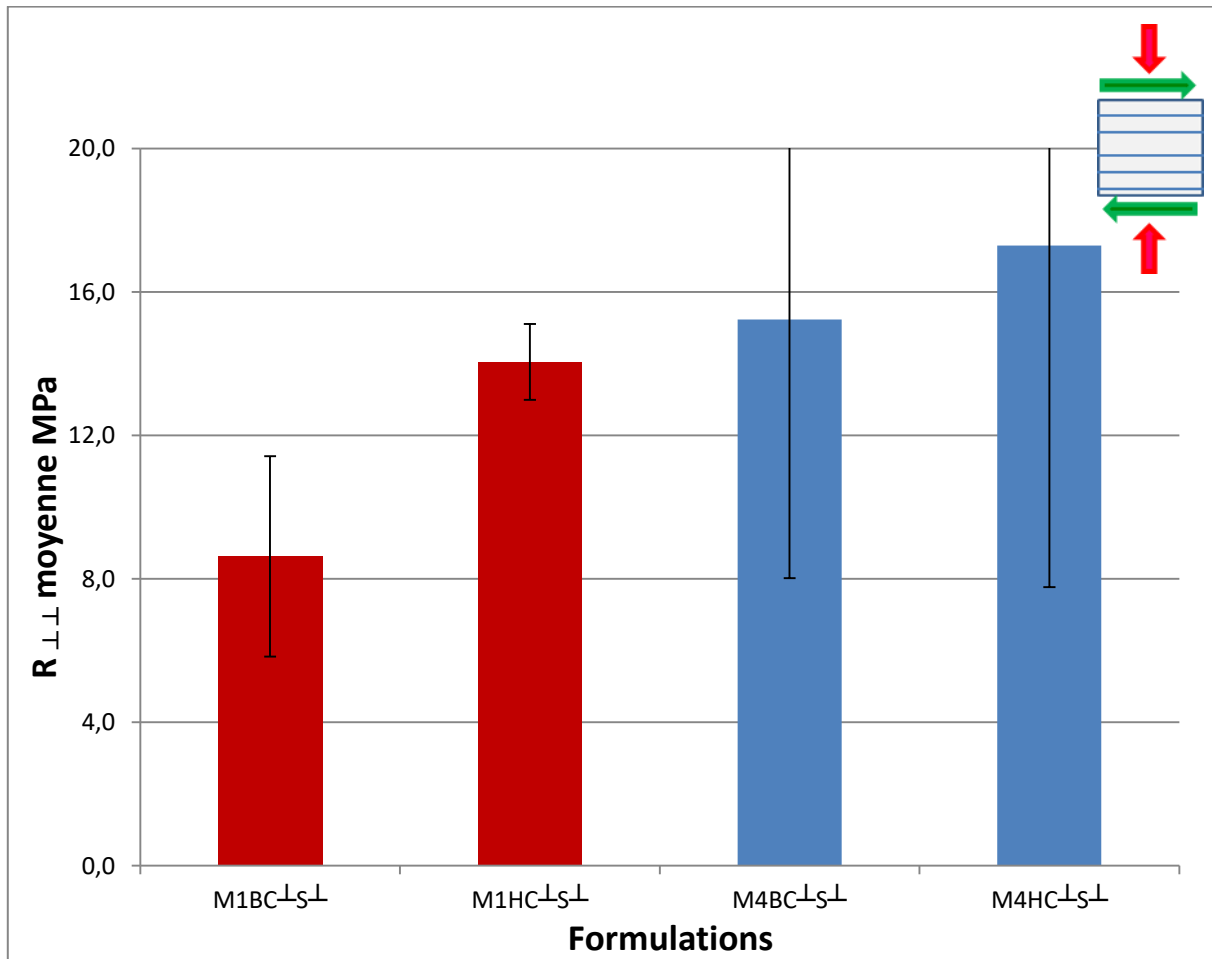


Figure 3-32 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$ , configuration  $C\perp S\perp$ ,  $\sigma_n = 2\text{MPa}$

### 3.5.2 R en fonction de la masse volumique des éprouvettes

La figure (Figure 3-33) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{//}$  en fonction la masse volumique de chaque type d'éprouvettes étudiées sous contraintes de compression de 0,3 MPa pour un essai  $C//S//$ . Nous pouvons remarquer que plus la masse volumique augmente, plus le module de cisaillement apparent augmente.

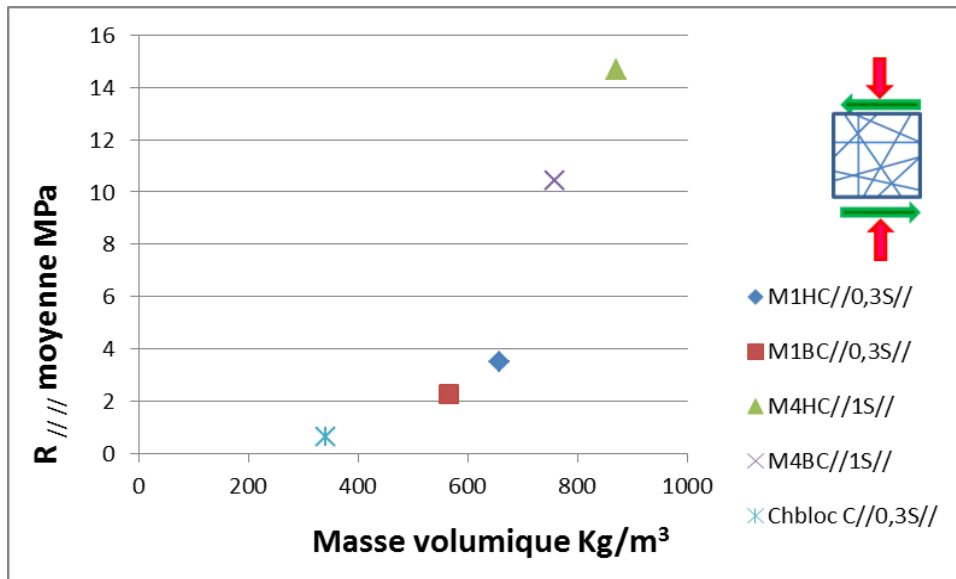


Figure 3-33 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{//}$  en fonction la masse volumique,  $\sigma_n = 0,3$  MPa, configuration  $C_{//}S_{//}$

La figure (Figure 3-34) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp//}$  en fonction la masse volumique des éprouvettes étudiées sous contraintes de compression de 1 MPa pour l'essai  $C_{//}S_{\perp}$ . Dans ce cas, la différence entre les éprouvettes, une fois de plus, semble moins marquée.

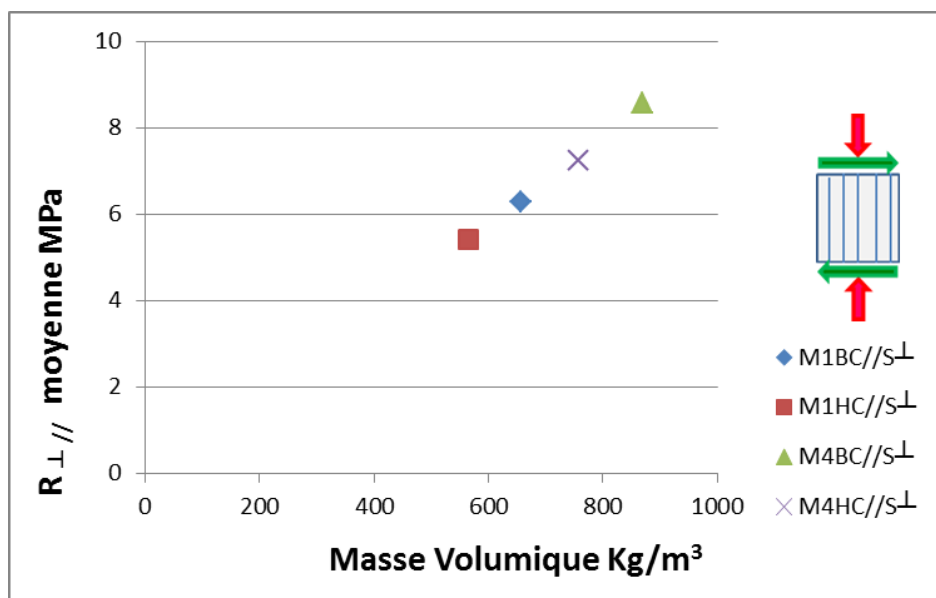


Figure 3-34 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp//}$  en fonction la masse volumique,  $\sigma_n = 1$  MPa, configuration  $C_{//}S_{\perp}$

La figure (Figure 3-35) présente le module de cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la masse volumique sous contraintes de compression de 0,3 MPa pour un essai  $C_{\perp S_{\perp}}$ . Pour l'éprouvette Chanvribloc® pas de changement marqué de valeur.

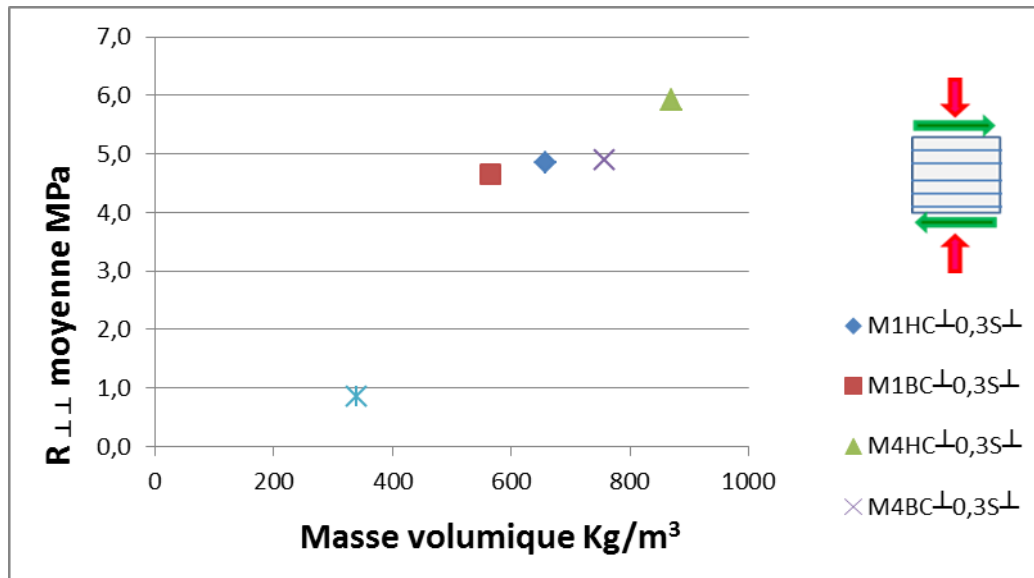


Figure 3-35 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la masse volumique,  $\sigma_n = 0,3$  MPa, configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$

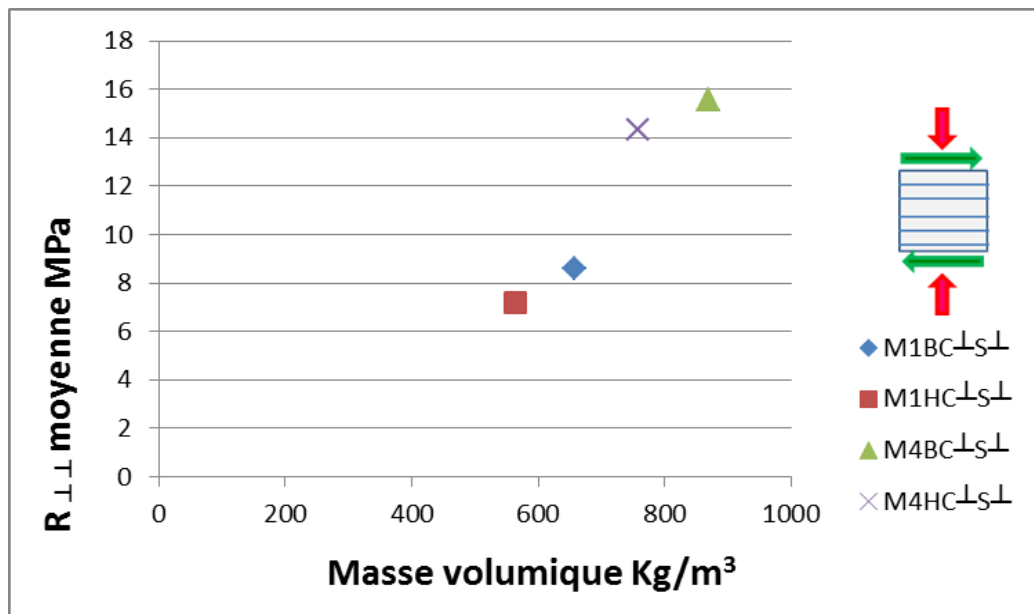


Figure 3-36 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la masse volumique,  $\sigma_n = 1$  MPa, configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$

Les figures (Figure 3-36 et Figure 3-37) présentent le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la masse volumique sous contraintes de compression de  $\sigma_n = 1$  MPa, 2 MPa pour un essai de type  $C_{\perp S_{\perp}}$ . L'application de trois charges de compression différentes : 0.3, 1, 2MPa pour l'essai  $C_{\perp S_{\perp}}$ , conduit à un module de rigidité  $R_{\perp\perp}$  qui augmente avec la charge de compression.

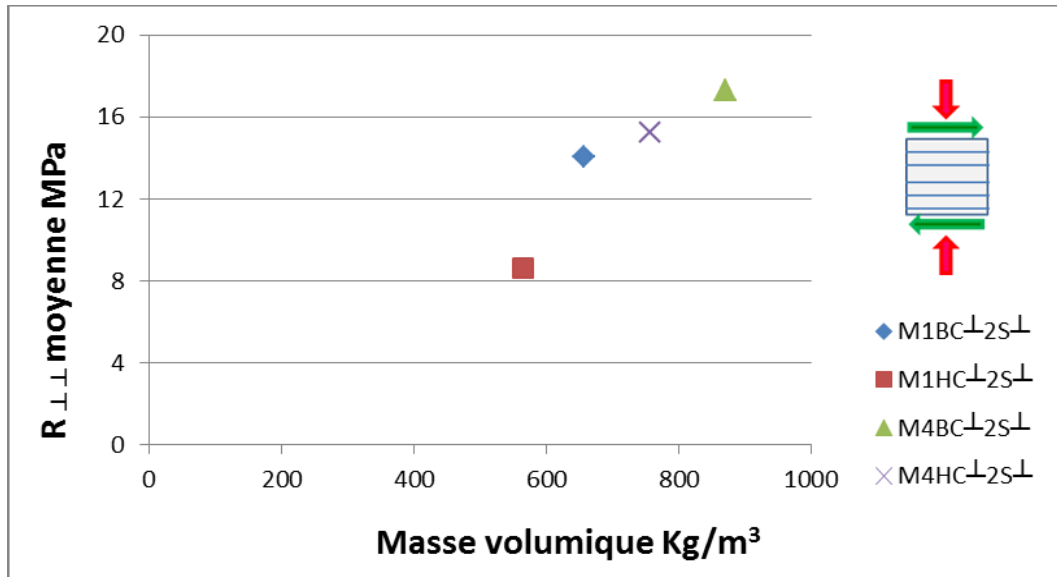


Figure 3-37 : Module de rigidité au cisaillement apparent moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la masse volumique,  $\sigma_n = 2$ MPa, configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$

### 3.5.3 R en fonction de la compacité des éprouvettes

La compacité est en théorie donnée par (Equation 3-1) :

$$compacité = \frac{\frac{Masse\ ch\grave{e}nevotte}{\rho\ ch\grave{e}nevotte} + \frac{Masse\ liant}{\rho\ liant} + \frac{Masse\ eau}{\rho\ eau}}{volume\ total} \quad (3-1)$$

Pour le cube extrait en haut de l'éprouvette cylindrique, on peut écrire l'équation (Equation.3-2) :

$$C_H = \frac{\phi_H}{V} = \frac{\frac{S_H + \frac{B_H}{\rho_B} + t \frac{B_H}{\rho_W}}{\rho_S}}{V} = S_H \frac{1 + (B/S) \left( \frac{1}{\rho_B} + \frac{t}{\rho_W} \right)}{V} \quad (3-2)$$

Avec

S : la masse de chènevotte par m<sup>3</sup> de mélange,

B : la masse de chaux par m<sup>3</sup> de mélange,

t : le taux d'hydratation, ici égale à 1,1 (Tronet 2016)

S<sub>H</sub> : la masse de chènevotte par m<sup>3</sup> dans l'échantillon,

B<sub>H</sub> : la masse de chaux par m<sup>3</sup> dans l'échantillon,

ρ<sub>S</sub> : la masse volumique des parois de la chènevotte (env. 1500kg/m<sup>3</sup>),

ρ<sub>B</sub> : la masse volumique des particules de chaux (env. 2500kg/m<sup>3</sup>),

ρ<sub>w</sub> : la masse volumique de l'eau,

V : le volume de l'échantillon.

En supposant qu'il n'y pas de ségrégation, on peut écrire pour une formulation donnée :

$$\frac{\rho_B}{C_B} = \frac{\rho_H}{C_H} = \frac{\rho_{moyen}}{C_{moyen}} \Rightarrow C_B = \frac{\rho_B}{\rho_{moyen}} C_{moyen}$$

Nous rappelons que pour l'essai C<sub>//</sub>S<sub>//</sub> les deux éprouvettes, partie haute et partie basse de la formulation M1, sont testées sous une contrainte de compression de 0,3 MPa, et les deux éprouvettes des formulations M4, haute et basse, ont été testées sous contrainte avec σ<sub>n</sub> = 1MPa durant l'essai de cisaillement. Les contraintes de compression appliquées sur l'éprouvette ont engendré une diminution de la hauteur totale de l'éprouvette testée, celle-ci conduit à changer la compacité de l'éprouvette au cours de l'essai. C'est la compacité obtenue après avoir appliqué la contrainte de compression σ<sub>n</sub>. La figure (Figure 3-38) montre le module de rigidité au cisaillement moyen apparent R<sub>//</sub> en fonction de la compacité C des éprouvettes lors d'un essai en configuration C<sub>//</sub>S<sub>//</sub>.

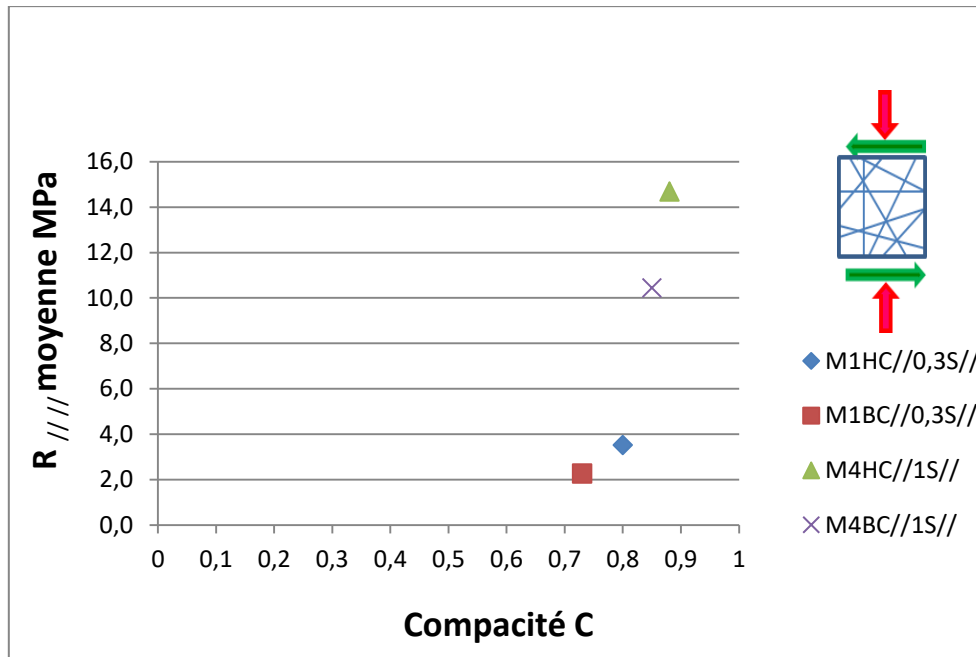


Figure 3-38 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{//}$  en fonction de la compacité finale pour  $\sigma_n = 0,3$ , configuration  $C_{//}S_{//}$

La figure (Figure 3-39) montre le module de rigidité au cisaillement moyen apparent  $R_{\perp}$  en fonction la compacité C des éprouvettes étudiées en essai de  $C_{//}S_{\perp}$  sous charge de compression 1 MPa.

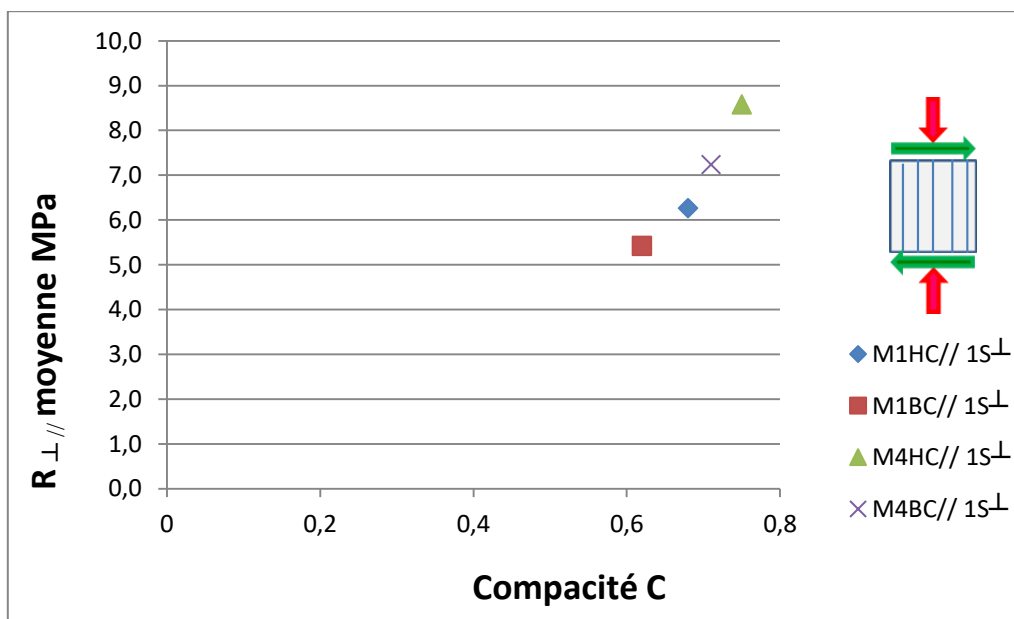


Figure 3-39 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp}$  en fonction de la compacité, configuration  $C_{//}S_{\perp}$  pour  $\sigma_n = 1\text{MPa}$

La figure (Figure 3-40) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la compacité pour l'essai de type  $C_{\perp S_{\perp}}$  avec  $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ .

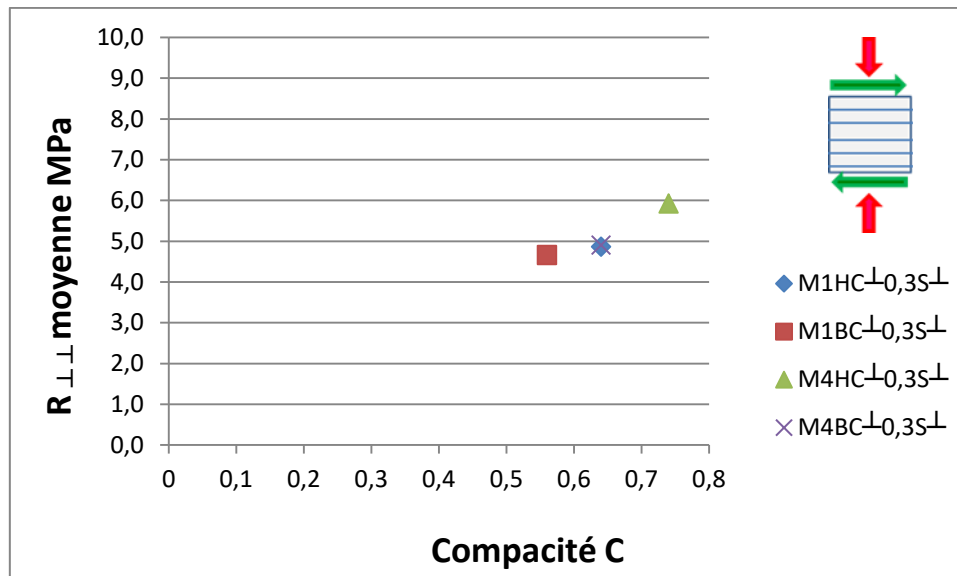


Figure 3-40 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la compacité pour  $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ , configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$

La figure (Figure 3-41) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la compacité pour l'essai de  $C_{\perp S_{\perp}}$  avec  $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$ .

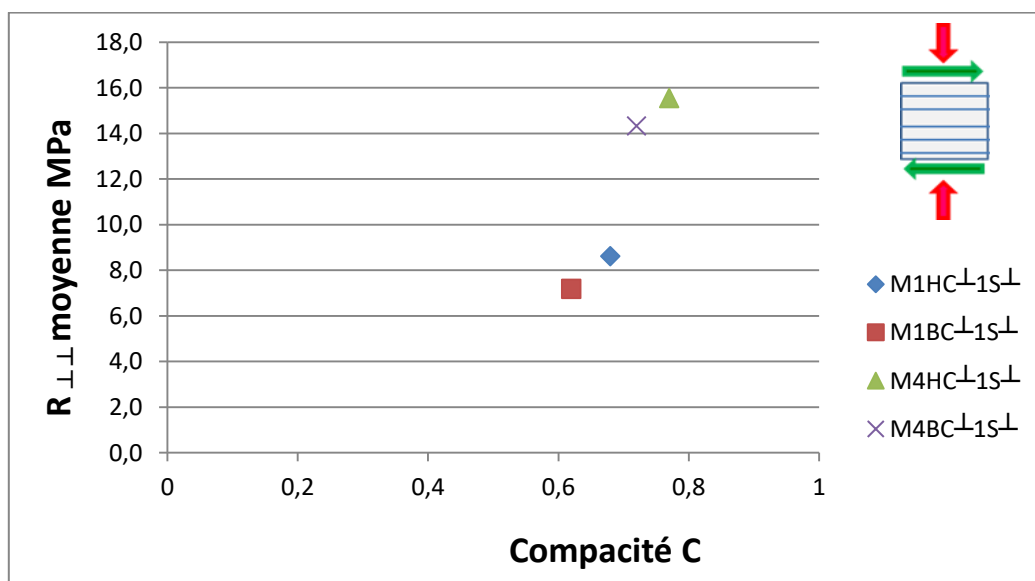


Figure 3-41 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction de la compacité, configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$  pour  $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$



La figure (Figure 3-42) présente le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la compacité pour l'essai de  $C_{\perp S_{\perp}}$  avec  $\sigma_n = 2\text{MPa}$ .

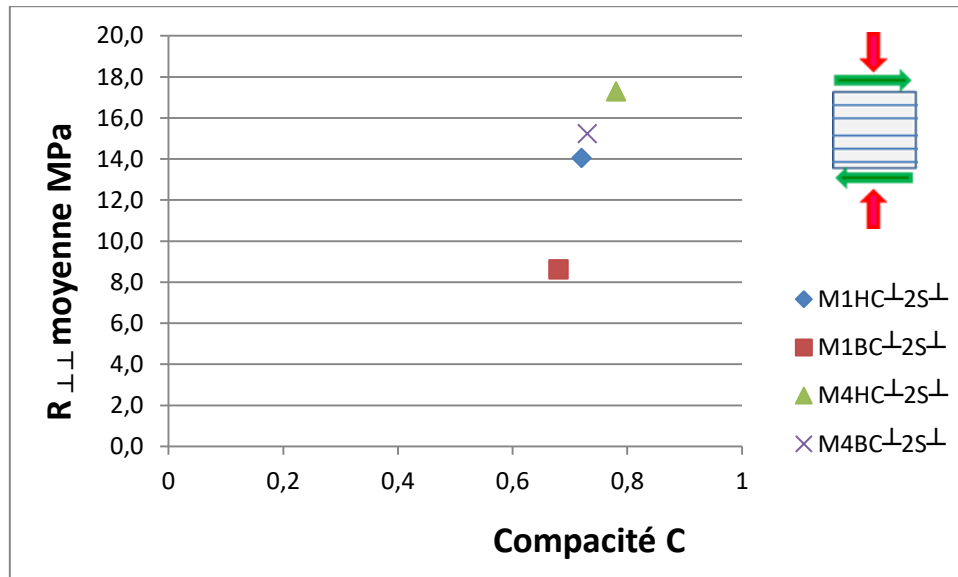


Figure 3-42 : Module de cisaillement moyen apparent  $R_{\perp\perp}$  en fonction de la compacité, configuration  $C_{\perp S_{\perp}}$  pour  $\sigma_n = 2\text{MPa}$

Au regard des figures précédentes, M4H présente de façon générale la meilleure rigidité parmi toutes les formulations étudiées. Quand la charge de compression ou la compacité augmente, la rigidité des éprouvettes augmente aussi.

### 3.5.4 R en fonction la fraction volumique de chanvre dans les éprouvettes

La fraction volumique de chanvre est un indicateur de la quantité volumique de chènevotte par mètre cube de matériau. Pour une éprouvette donnée, par exemple M1B, la fraction volumique de chènevotte dans cette éprouvette est  $\emptyset_{G-M1B}$ , avec :

$$\emptyset_{G-M1B} = G_{M1B} / \rho_{sG}$$

Où :  $\rho_{sG}$ , est la masse volumique des parois de chènevotte, mesurée à  $1465\text{kg/m}^3$  (Tronet 2013)

$G_{M1B}$ , est la fraction massique de chènevotte, G, par  $\text{m}^3$  de matériau durci

$$G_{M1B} : \rho_{M1B} / [1 + (L/G)_{M1} + (E/L)_{M1} (L/G)_{M1} (t-1)]$$

t, est le degré d'hydratation, considéré égal à 1.1 par Tronet (Tronet 2013), (Tronet et al. 2016)

La (Figure 3-43) montre le module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{///}$  en fonction la fraction volumique de chanvre. Nous rappelons ici que les éprouvettes de la formulation M1 sont testées sous une charge de compression de 0.3MPa, et que les éprouvettes de M4 sous une charge de compression de 1MPa.

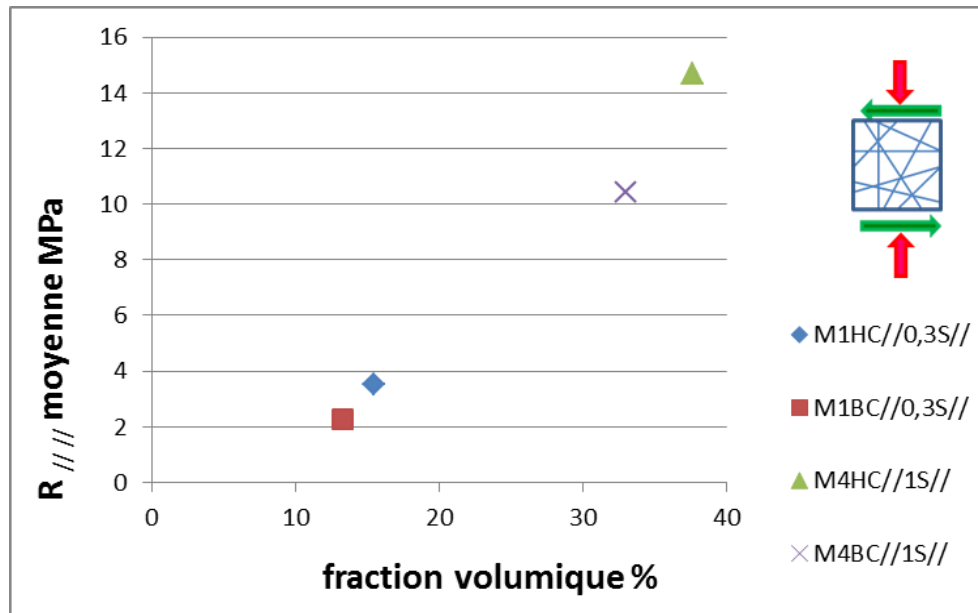


Figure 3-43 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R$  en fonction la fraction volumique solide de chènevotte, essai  $C_{///}S_{///}$ ,  $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$

La (Figure 3-44) présente le module de rigidité moyen  $R_{\perp}$  en fonction la fraction volumique de chanvre pour l'essai  $C_{///}S_{\perp}$ . Quand la fraction volumique augmente, le module de rigidité moyen  $R_{\perp}$  augmente. Ce résultat montre que l'augmentation de la concentration de chènevotte conduit à une augmentation de la rigidité ainsi que du module de rigidité au cisaillement moyen  $R$  des bétons de chanvre.

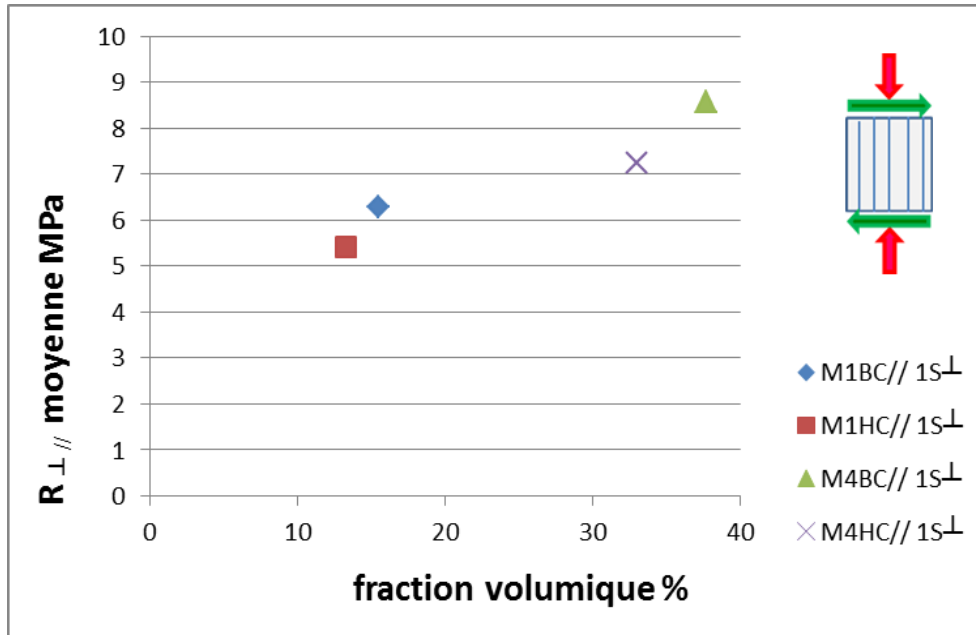


Figure 3-44 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp//}$  en fonction la fraction volumique solide de chènevotte, configuration  $C_{//}S_{\perp}$ ,  $\sigma_n = 1$  MPa

Les figures (Figure 3-45, à Figure 3-47) présentent l'évolution du module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la fraction volumique en chènevotte des éprouvettes des formulations M1, M4, sous une charge de compression de 0,3, 1, 2 MPa successivement pour l'essai  $C_{\perp}S_{\perp}$ .

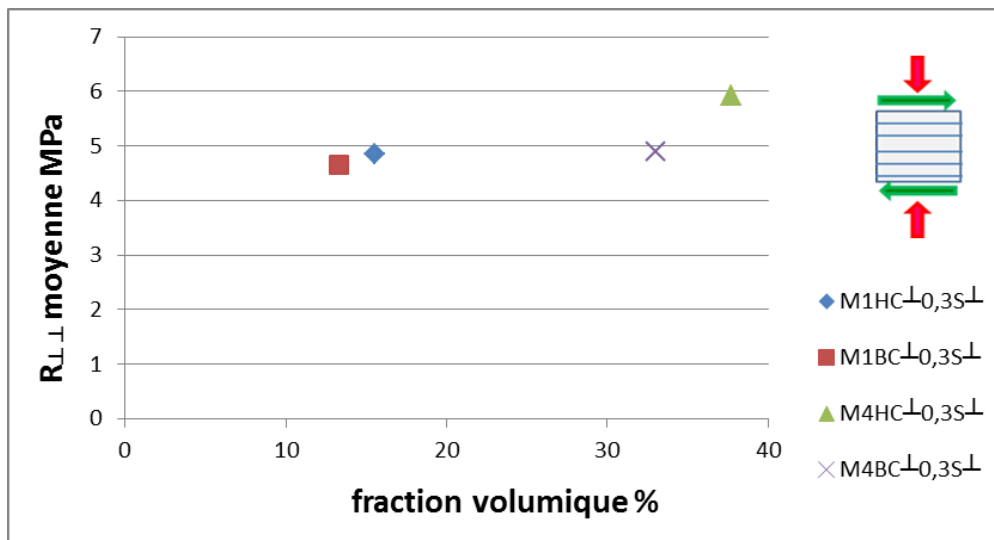


Figure 3-45 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la fraction volumique solide de chènevotte, configuration  $C_{\perp}S_{\perp}$ ,  $\sigma_n = 0,3$  MPa

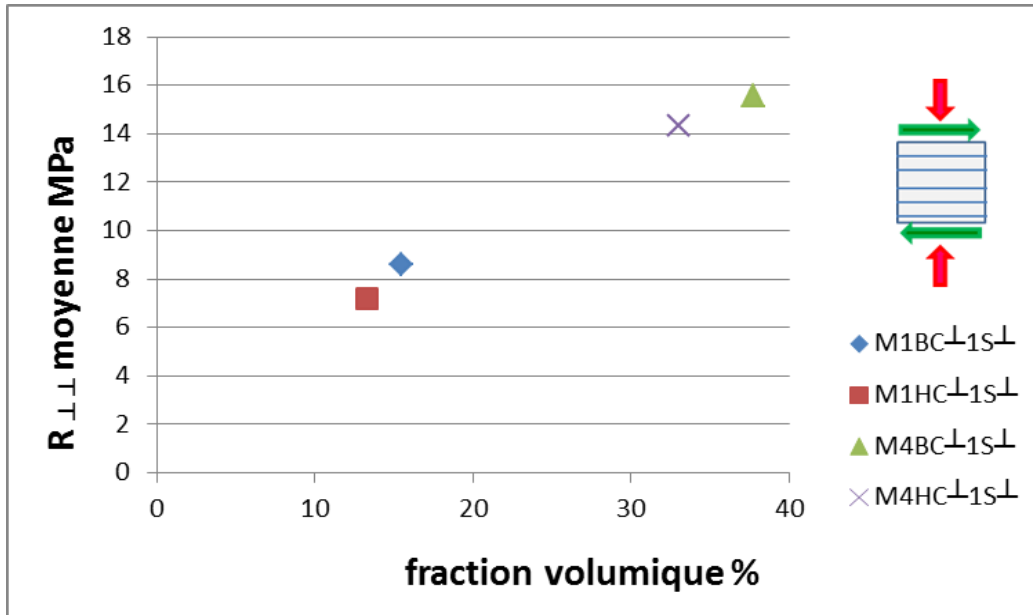


Figure 3-46 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la fraction volumique solide de chènevotte, configuration C $\perp$  S $\perp$ ,  $\sigma_n = 1$ MPa

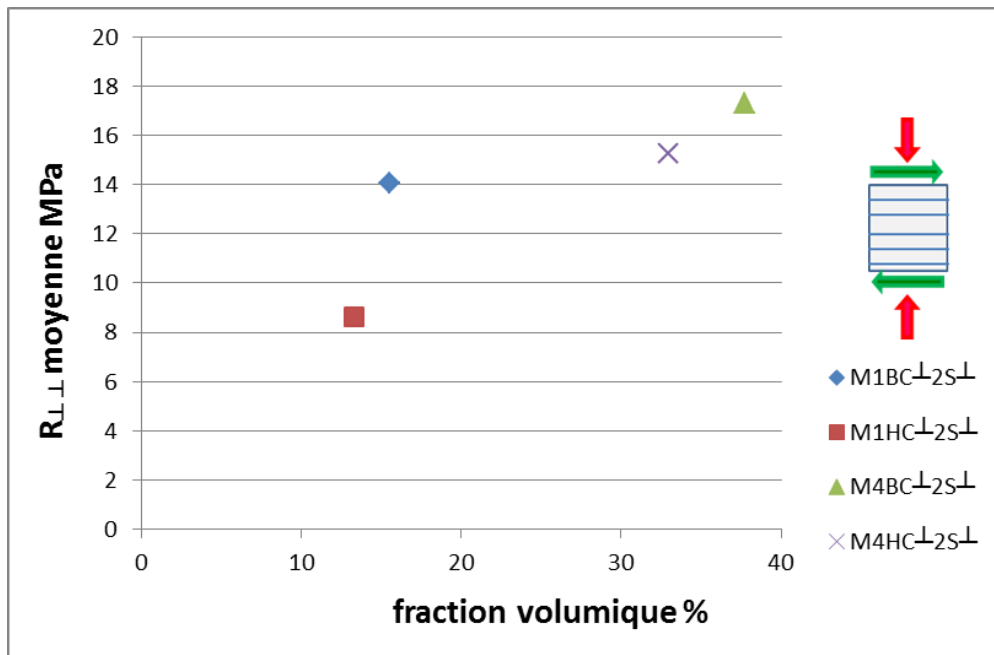


Figure 3-47 : Module de rigidité au cisaillement moyen  $R_{\perp\perp}$  en fonction la fraction volumique solide de chènevotte, configuration C $\perp$  S $\perp$ ,  $\sigma_n = 2$ MPa

Une simple comparaison des trois essais, montre que pour une fraction volumique de chanvre donnée, le module de rigidité au cisaillement moyen apparent  $R_{\perp\perp}$  augmente lorsque la charge de compression augmente.

## 3.6 Mesures des champs des déplacements et des déformations par ARAMIS

### 3.6.1 Introduction

Pour certains essais de cisaillement, nous avons utilisé la technique par mesure optique et traitement d'image ARAMIS. Celle-ci permet de visualiser et mesurer les champs de déplacements durant l'essai de cisaillement.

Pour mémoire, ARAMIS est un système de corrélation d'image numérique sans contact. Pour réaliser les mesures, une couche de peinture blanche est placée au-dessus de la surface de l'éprouvette suivie par un motif (mouchetis) de points noirs déposé sur cette surface.

Les pixels de la caméra numérique sont répartis en petits groupes appelés facettes (Figure 3-48).

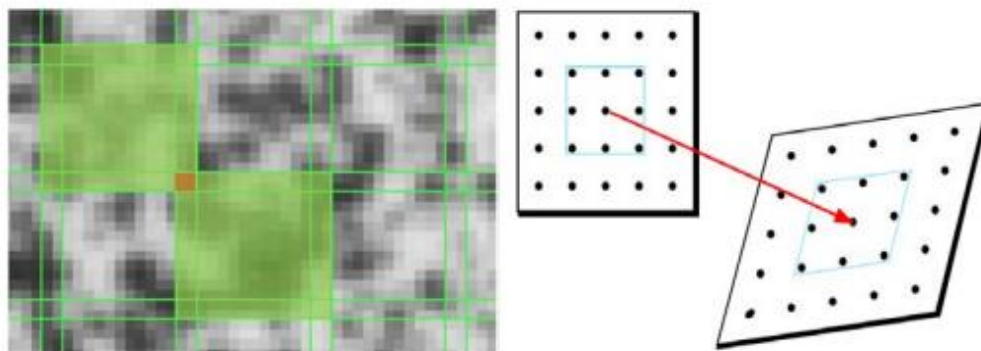


Figure 3- 48 : les facettes d'Aramis sur une éprouvette étudiée

Le logiciel mesure le champ de déplacement en calculant les mouvements relatifs entre les facettes (Figure 3-48). Chaque facette est devenue un point de données. La taille de la facette par défaut est de  $15 \times 15$  pixels avec un pas des facettes de 13 pixels, ce qui signifie que les facettes se chevauchent les uns sur les autres par 2 pixels. La précision de mesure diminue lorsque la taille de facette utilisée devient plus grande, cependant, toute déformation locale à l'intérieur de la facette est alors ignorée. En outre, plus de points de données seront calculées en augmentant le nombre de pixels qui se chevauchent entre les facettes.

Pendant l'essai, l'éprouvette est filmée par deux caméras à haute résolution pour l'étudier en (3D). Le champ de déplacement est enregistré sous la forme d'une cartographie en couleur, le ratio d'enregistrement correspond à une image par seconde.

La figure (Figure 3-49) montre les positions des caméras d'ARAMIS par rapport à l'éprouvette de l'essai de cisaillement. Nous avons utilisé deux caméras afin d'étudier les déformations en 3D.

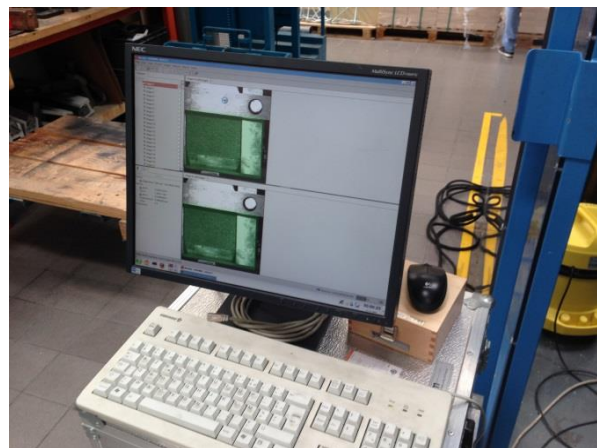
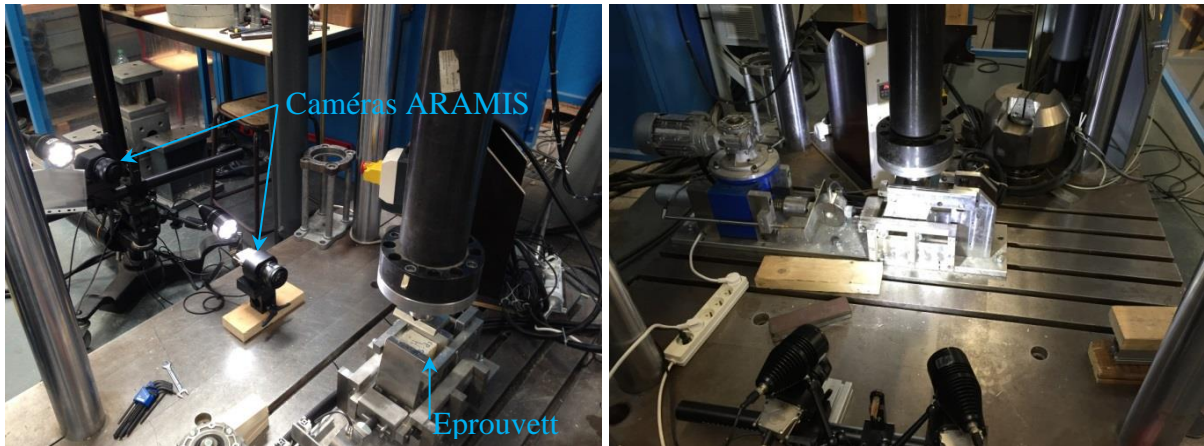


Figure 3- 49 : Les deux caméras d'Aramis avec le logiciel d'enregistrement Aramis

Les mesures enregistrées sont traitées par un logiciel spécial de traitement des images fourni par ARAMIS.

Nous obtenons ainsi les champs des déplacements et les champs des déformations correspondantes en fonction de chaque image « stage » enregistrée.

Il faut noter que les mesures de déplacements par le système ARAMIS peuvent être effectuées tant que les déformations de l'éprouvette restent petites et que la surface de l'éprouvette reste homogène. Malheureusement pendant certains de nos essais, les granulats de quelques éprouvettes se sont détachés et les caméras n'ont pas pu enregistrer correctement les images.

### 3.6.2 Mesures de cisaillement réalisées avec ARAMIS

Il faut préciser que les éprouvettes cubiques des essais de cisaillement mesurées avec ARAMIS appartiennent à la partie supérieure des éprouvettes cylindriques des formulations M1 et M4.

Le tableau (Tableau 3-8) montre les essais réalisés avec ARAMIS. Dans ce tableau nous avons mentionné les essais où les mesures par ARAMIS n'ont pas pu être effectuées pour deux raisons principales :

- 1- La première revient aux déformations excessives hors plan de la surface de l'éprouvette mesurée par les caméras. Ce défaut de mesure concerne les essais de type  $C_{//}S_{//}$  voir (Figure 3-50).
- 2- La deuxième raison est la grande rugosité de surface de l'éprouvette, plus prononcée dans le cas des éprouvettes M1.

Formulations	Référence d'essais	Contrainte de compression appliquée [MPa]	Remarques
M4	$C_{\perp 2} S_{\perp 3}$	2,0	-
	$C_{\perp 1} S_{\perp 1}$	1,0	-
	$C_{\perp 0,3} S_{\perp 1}$	0,3	-
	$C_{// 1} S_{\perp 3}$	1,0	-
	$C_{// 0,5} S_{// 3}$	0,5	Déformation excessive hors plane, essai annulé
M1	$C_{\perp 2} S_{\perp 1}$	2,0	-
	$C_{\perp 1} S_{\perp 3}$	1,0	-
	$C_{\perp 0,3} S_{\perp 1}$	0,3	-
	$C_{// 1} S_{\perp 2}$	1,0	Surface trop poreuse, essai annulé
	$C_{// 0,3} S_{// 1}$	0,3	-

Tableau 3- 8 : Liste des essais effectués avec Aramis

Les mesures par les cameras commencent en même temps que l'application de la charge de compression sur l'éprouvette.

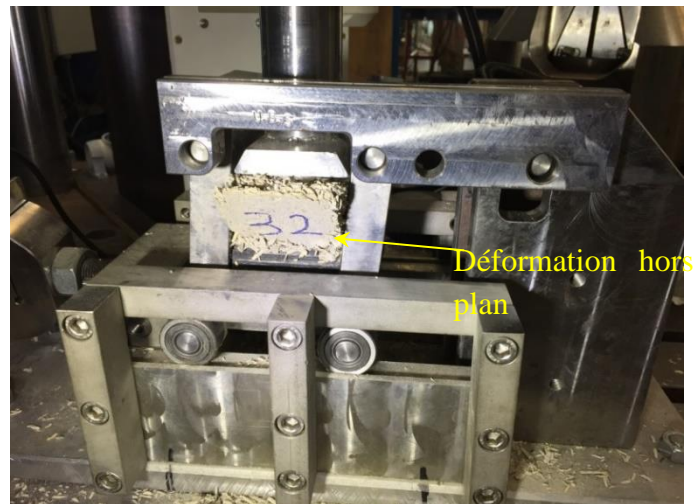


Figure 3-50 : Mesure échou par Aramis essais de type  $C_{II}S_{II}$

### 3.7 Résultats des essais

#### 3.7.1 Exemple de résultats : Eprouvettes M4 H C $\perp$ S $\perp$

Après avoir appliqué le mouchetis sur l'éprouvette, et installé celle-ci dans le dispositif de cisaillement (Figure 3-51), la camera commence ses prises de vues en même temps que l'application de la charge verticale sur l'éprouvette, une fois la consigne de charge verticale atteinte la sollicitation de cisaillement débute.



Figure 3- 51 : Essai de cisaillement M4H C $\perp$ 2S $\perp$ 3 avec Aramis



La figure (Figure 3-52) montre la courbe contrainte-déformation obtenue à partir des mesures données "macro" du dispositif de mesure de l'appareil de cisaillement (capteurs) pour l'essai M4HC⊥S⊥. La figure (Figure 3-53) montre la courbe de déformation angulaire  $\gamma$  avec la contrainte de compression appliquée  $\sigma_n = 2\text{MPa}$ , essai M4HC⊥S⊥. Nous pouvons remarquer que la contrainte de compression appliquée  $\sigma_n$  est quasi constante durant l'essai.

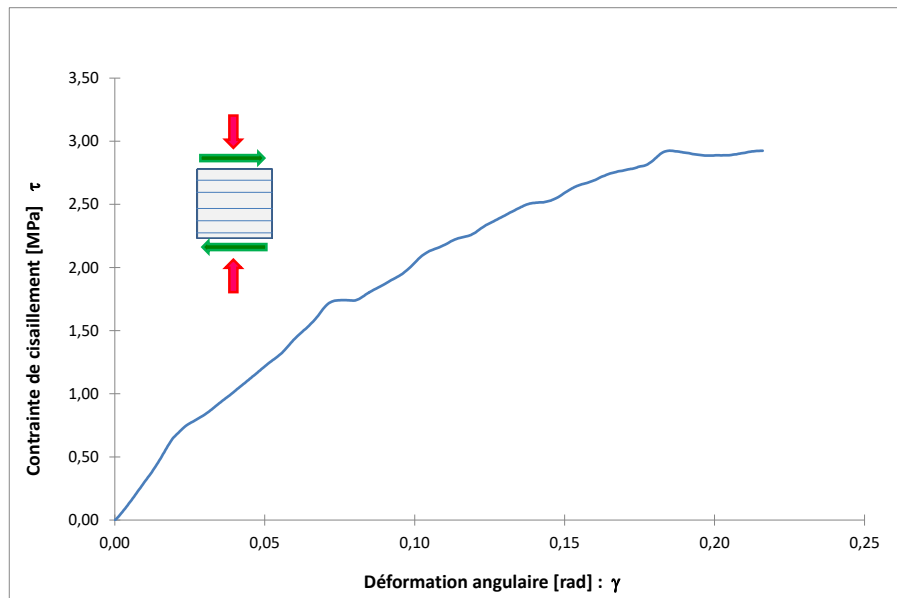


Figure 3-52 : Courbe contrainte de cisaillement-déformation angulaire, essai M4HC⊥S⊥3

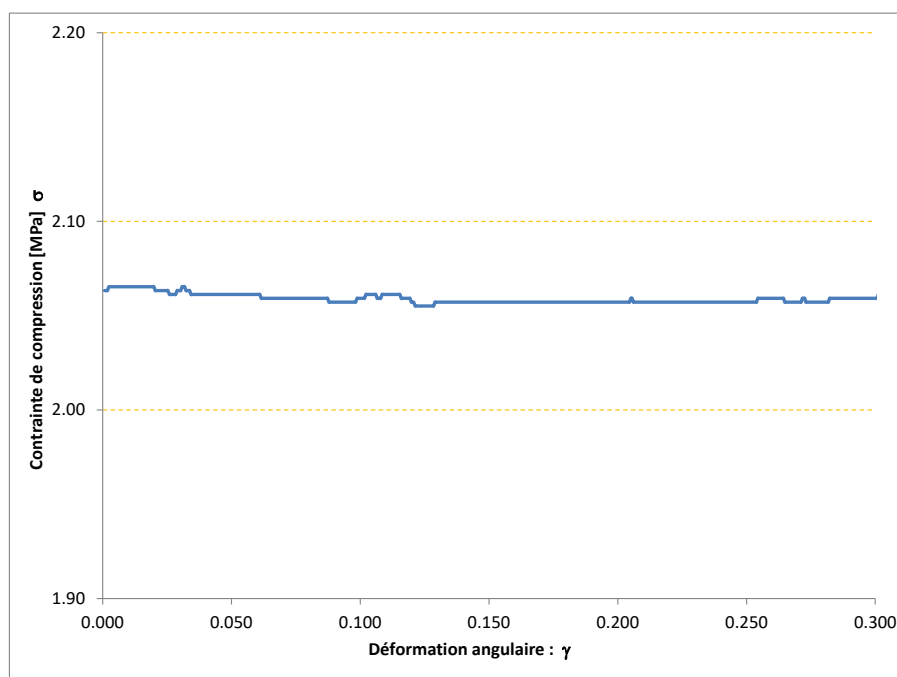


Figure 3- 53 : Courbe déformation angulaire – contrainte de compression, essai M4HC⊥S⊥

### 3.7.1.1 Evolution de la déformation $\epsilon_{yy}$

La figure (Figure 3-54) montre des cartographies de la déformation locale  $\epsilon_{yy}$  pour plusieurs valeurs de  $\gamma$  (déformation globale) pour l'essai M4H.C1S1 :

$\gamma = 0$ , (fin de compression début de cisaillement),  $\gamma = 7\%$ , 15% et 25%.

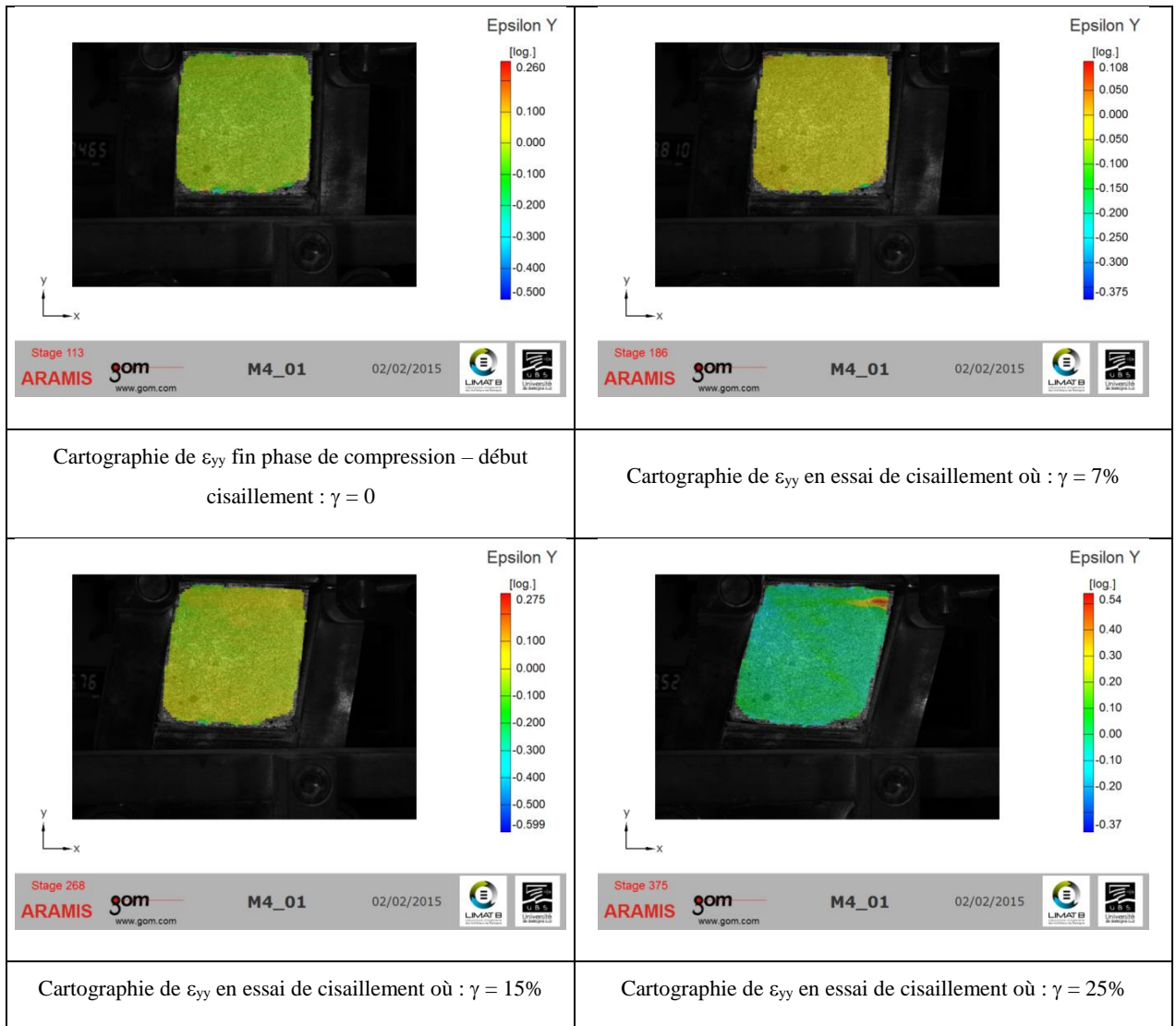


Figure 3-54 : Cartographie de  $\epsilon_y$  de l'essai de cisaillement M4H.C12.S13 avec plusieurs valeurs de déformation angulaire de  $\gamma$

Nous pouvons remarquer sur ces figures que la déformation verticale reste quasi homogène pendant le début de l'essai de cisaillement. Une zone de compression locale élevée a été observée à partir d'une déformation angulaire  $\gamma = 20\%$  environ.

### 3.7.1.2 Evolution de la déformation $\epsilon_{xx}$

La figure (Figure 3-55) montre la cartographie de la déformation locale  $\epsilon_{xx}$  pour plusieurs points de  $\gamma$ .

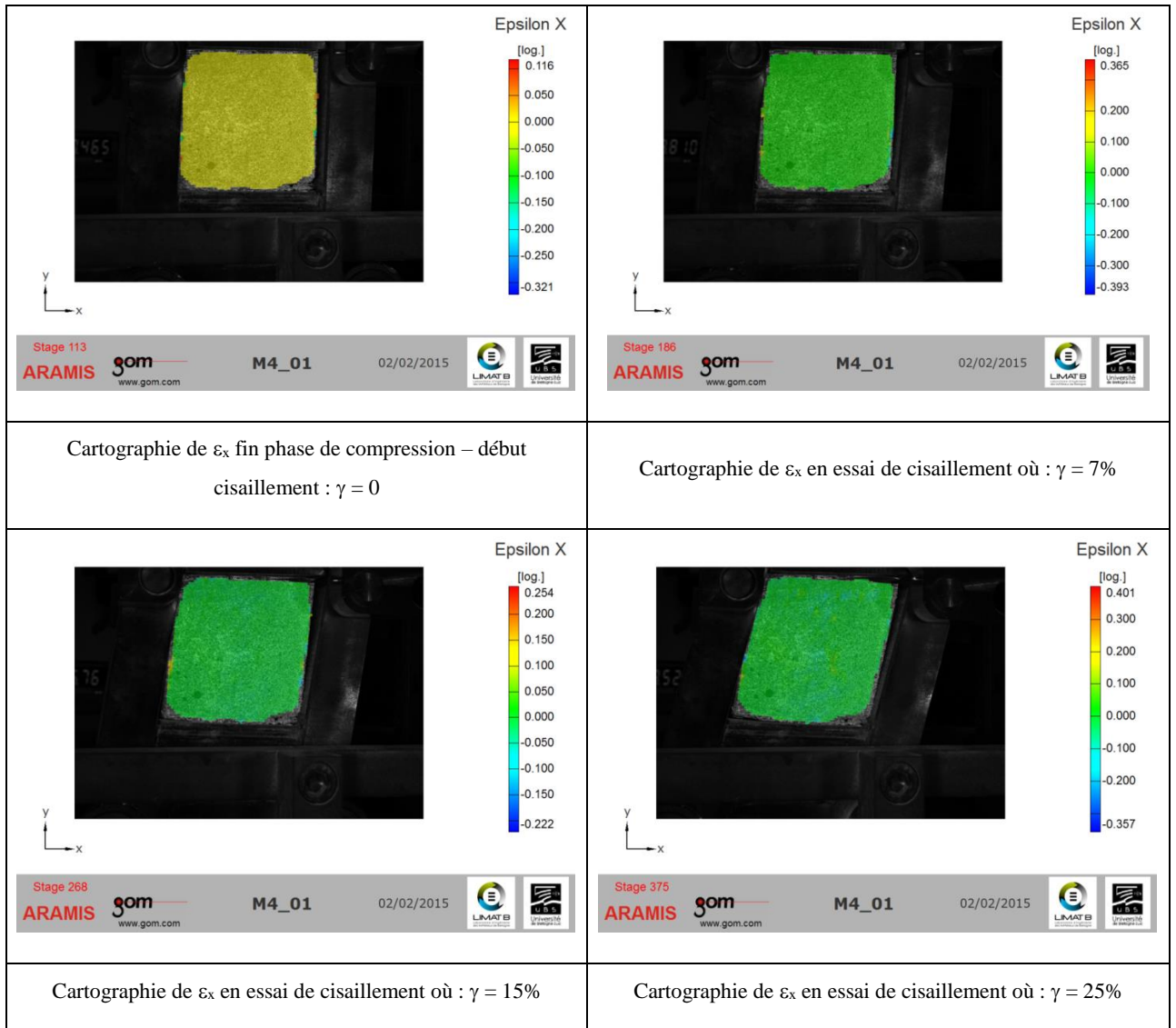


Figure 3-55 : Cartographie de  $\epsilon_{xx}$  de l'essai de cisaillement M4H.C1-2.S1 avec plusieurs valeurs de déformation angulaire  $\gamma$

Nous pouvons remarquer sur les figures précédentes que la variation de déformation selon l'axe horizontal reste quasi nulle pendant l'essai.

### 3.7.1.3 Evolution de la déformation $\epsilon_{xy}$

La figure (Figure 3-56) montre la cartographie de  $\epsilon_{xy}$  pour l'essai de cisaillement M4H.C $\perp$ S $\perp$  avec plusieurs valeurs de déformation angulaire de  $\gamma$ . Ici il faut rappeler que les valeurs de  $\epsilon_{xy}$  correspondent à  $(\gamma/2)$

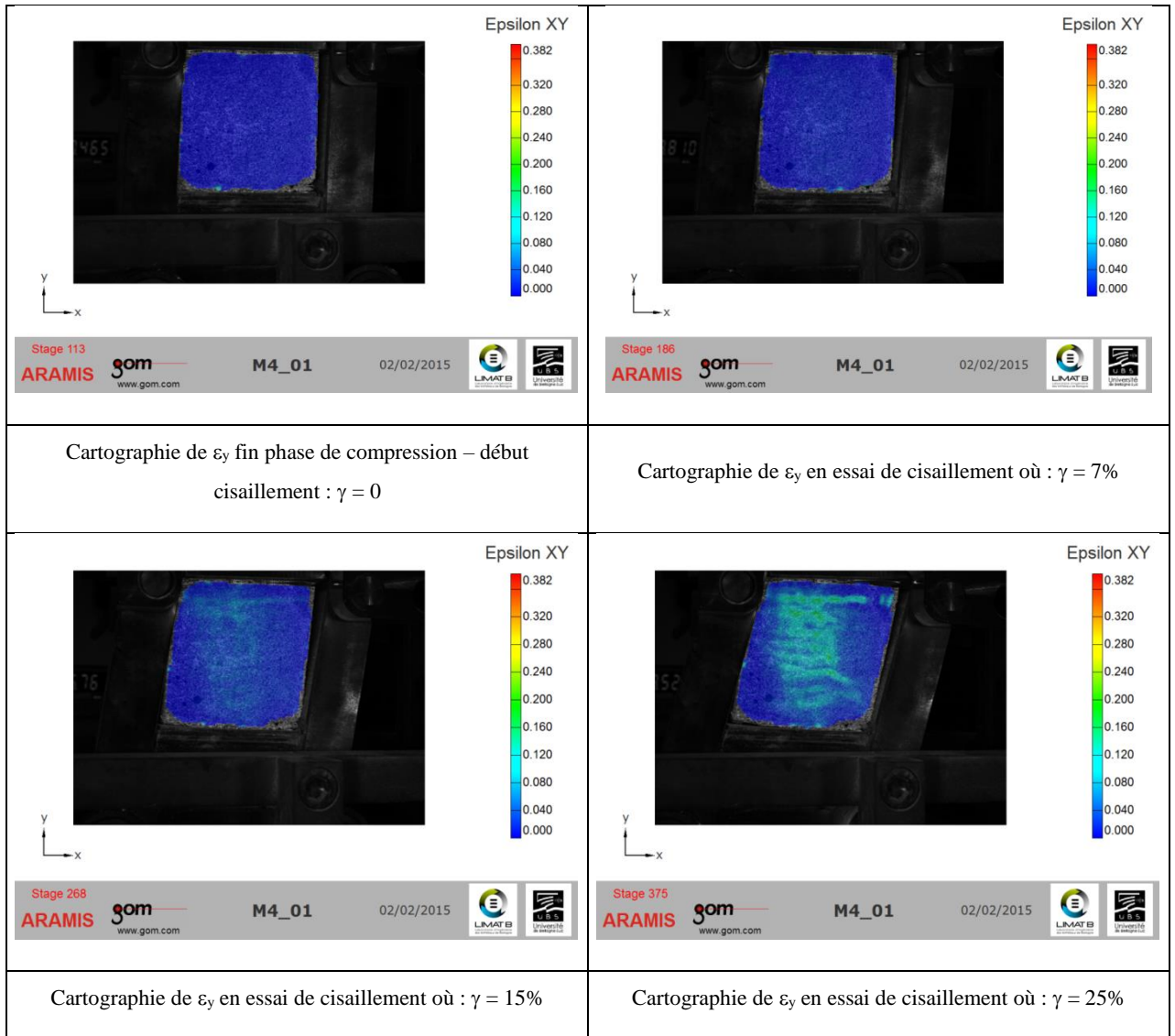


Figure 3-56 : Cartographie de  $\epsilon_{xy}$  de l'essai de cisaillement M4H.C $\perp$ S $\perp$  avec plusieurs valeurs de déformation angulaire de  $\gamma$

Nous pouvons constater sur les figures précédentes l'apparition de zones de déformation angulaire locale élevée à partir de  $\gamma = 15\%$ . Nous pouvons remarquer aussi que ces zones (bandes de cisaillement) suivent l'orientation des particules de chènevottes dans l'éprouvette.

Les tendances et observations sont comparables sur les éprouvettes M1, avec cependant une apparition de bandes de localisations de cisaillement dès l'atteinte d'une déformation globale de  $\gamma = 10\%$ .

### 3.7.1.4 Mesures de l'angle de rotation $\theta$ suivant Aramis

Nous avons remarqué pendant les essais de cisaillement que les éprouvettes ont tendance à tourner dans le plan de cisaillement. Afin d'étudier cette rotation par analyse d'image, en premier lieu nous avons divisé la surface étudiée en sections horizontales et verticales pour vérifier leurs déplacement selon l'axe X et Y au cours de l'essai. La figure (Figure 3-57) présente l'état initial au début de l'essai, alors que la figure (Figure 3-58) montre les déformations des sections au cours de cisaillement.

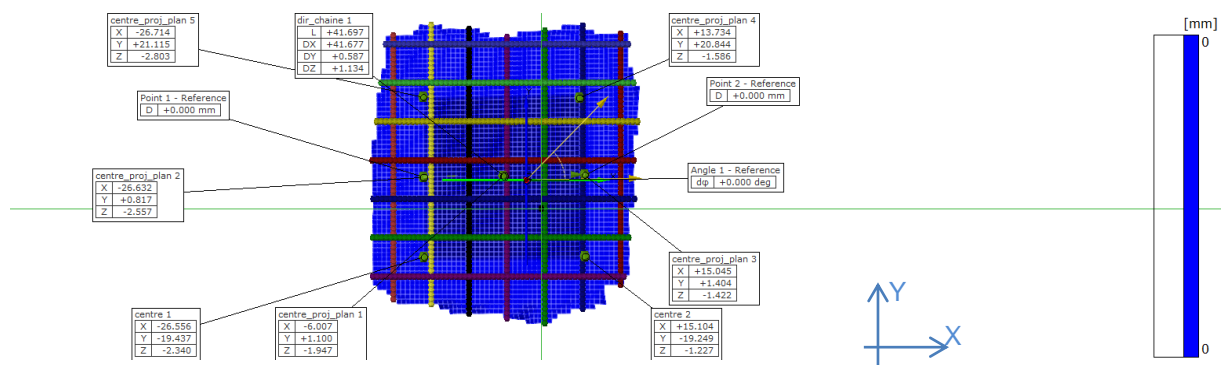


Figure 3-57 : Etat initiale des sections sélectionnées sur l'éprouvette, essai de cisaillement M4H.C $\perp$ S $\perp$

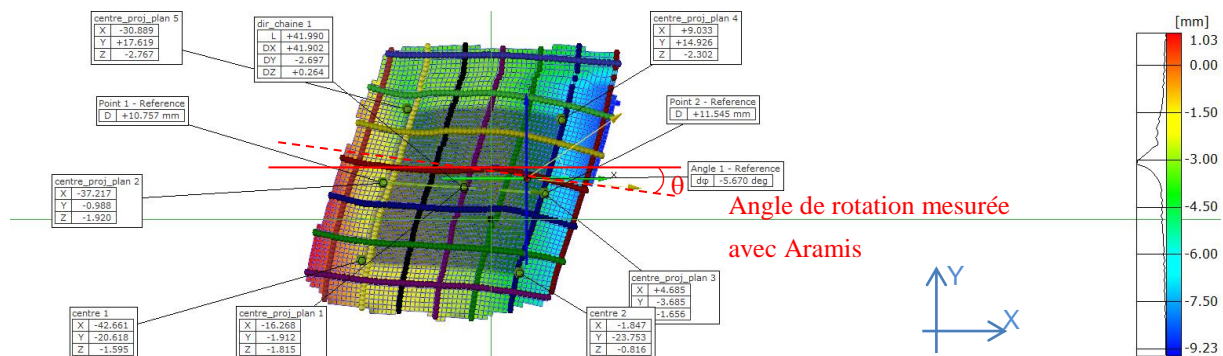


Figure 3-58 : Etat de déformation des sections sélectionnées sur l'éprouvette, essai de cisaillement M4H.C $\perp$ S $\perp$

Nous pouvons remarquer des rotations des sections horizontales surtout au milieu de l'éprouvette.

Les figures (Figure 3-59, Figure 3-60) montrent les schémas de la rotation mesurée.

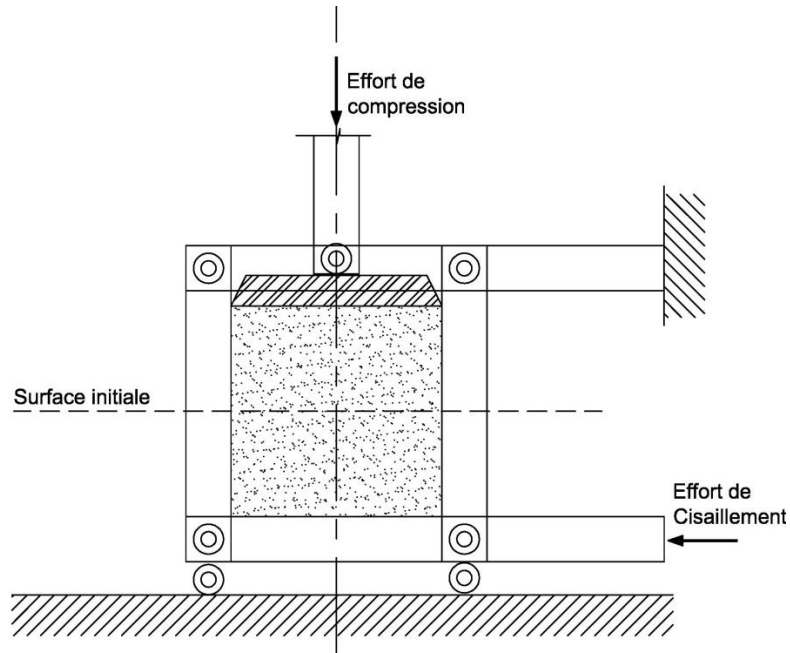


Figure 3-59 : Eprouvette béton de chanvre en essai de cisaillement à l'état initial

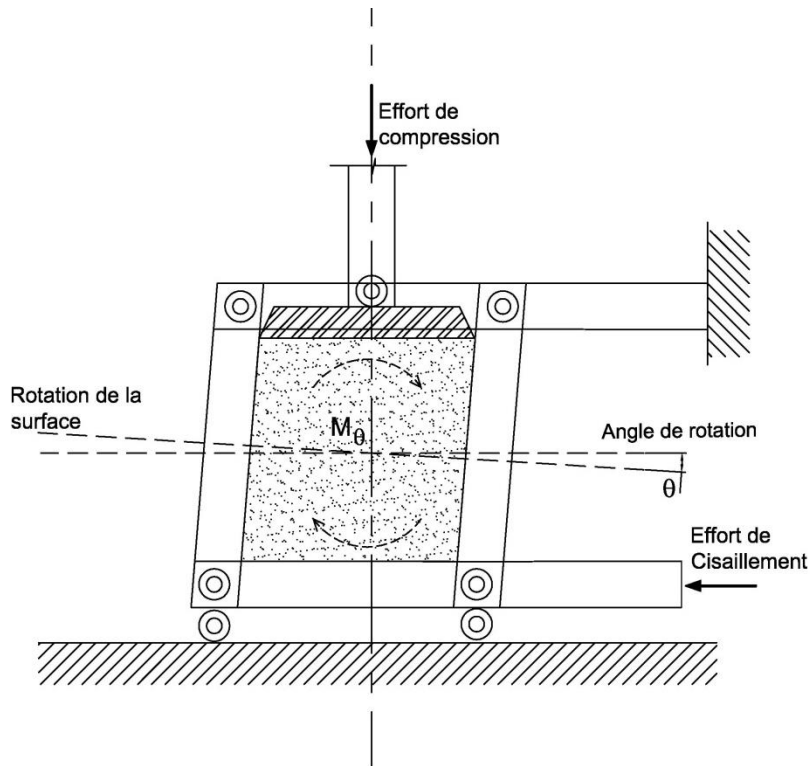


Figure 3-60 : Eprouvette béton de chanvre en essai avec rotation pendant l'essai de cisaillement

### 3.7.1.5 Mesures de la déformation angulaire $\gamma$ suivant Aramis

Afin de comparer les déformations angulaires obtenues par les mesures macro (directement déduite du déplacement du plateau mobile du dispositif) avec celles obtenues par Aramis, nous avons déduit de l'analyse d'image une valeur moyenne des déformations de cisaillement locales sur la surface illustrée (Figure 3-61).

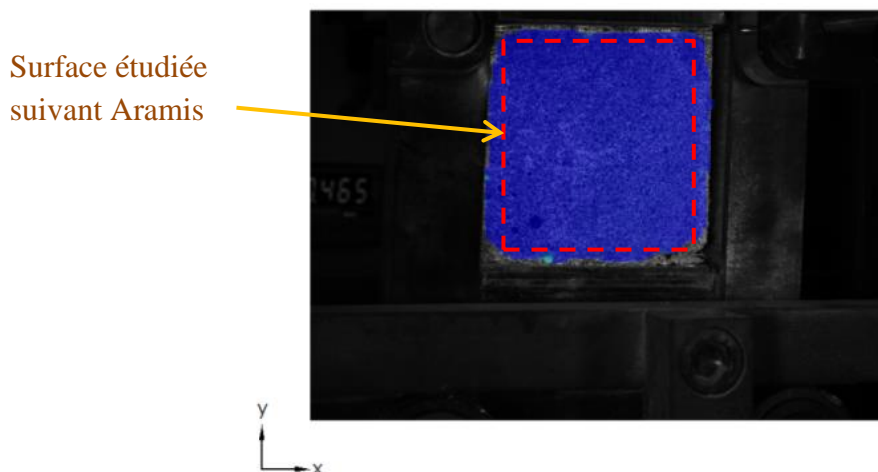


Figure 3-61: La surface sélectionnée de l'éprouvette de cisaillement selon Aramis

Il faut noter que la surface étudiée couvre une grande partie de la surface de l'éprouvette en évitant l'influence des bords de l'éprouvette, difficiles à traiter par l'analyse d'image.

La figure (Figure 3-62) montre une comparaison entre la déformation angulaire  $\gamma$  mesurée par les capteurs (la courbe brute F/S en fonction de delta X/b données "macro" ou globales de l'appareil de cisaillement) avec celle mesurée par Aramis (une autre courbe qui est une moyenne obtenue les données locales via ARAMIS).

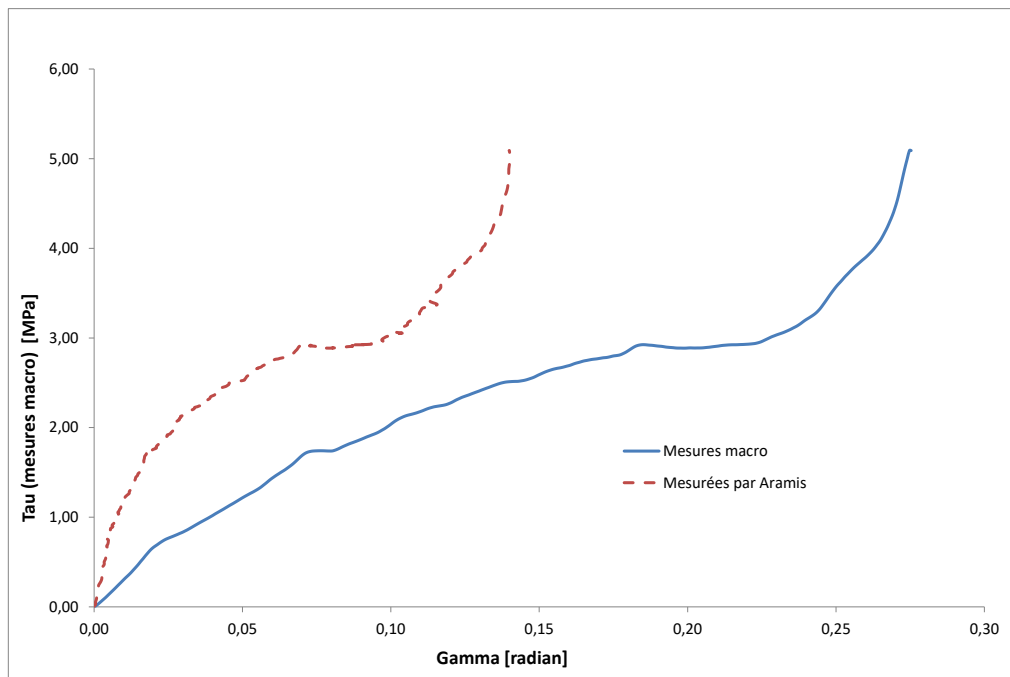


Figure 3-62 : Comparaison de la déformation angulaire  $\gamma$ , entre mesures macro et mesures par Aramis, essai M4H.C12.S13

Nous pouvons constater que les déformations mesurées par Aramis sont plus grandes par rapport aux déformations mesurées par les capteurs. Cette différence pourra être interprétée par la rotation de l'éprouvette pendant l'essai, en d'autres termes nous pouvons écrire que :

$$\gamma_{\text{apparent, mesure}} = \gamma_{\text{cisaillement}} + \theta_{\text{rotation}}$$

La courbe ci-dessous (Figure 3-63) montre l'angle de rotation  $\theta$  obtenu par Aramis (cf. 1.6.1.4) en fonction de la déformation angulaire  $\gamma$  mesurée par le dispositif macro pour l'essai M4H.C1S1.



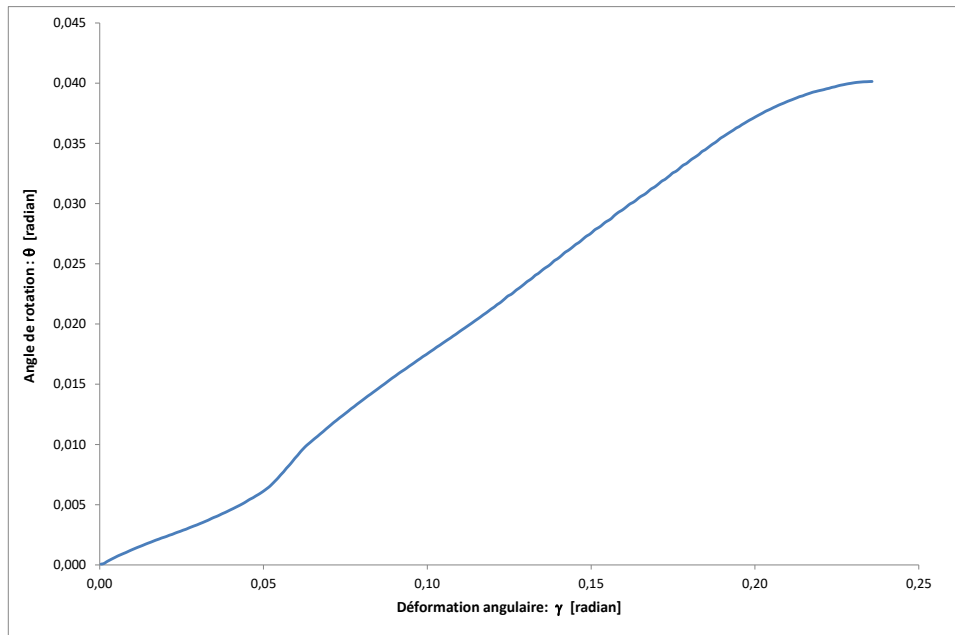


Figure 3-63 : Courbe angle de rotation  $\theta$  - déformation angulaire  $\gamma$ , essai M4H.C12.S13

Nous pouvons remarquer que la courbe est quasi linéaire. La mesure de l'angle  $\theta$  durant l'essai de cisaillement pourra nous permettre de corriger la courbe  $(\tau-\gamma)$  obtenue pour le même essai via les mesures macro de l'appareil de cisaillement.

Le paragraphe suivant (3-7) présentera un développement plus détaillé sur cet aspect expérimental des déformations angulaires.

### 3.8 Prise en compte de la rotation de l'éprouvette lors du cisaillement

Au cours de l'essai de cisaillement, l'éprouvette se tourne légèrement. Un champ de contrainte supplémentaire apparaît à cause de la rotation de l'éprouvette. Comme la contrainte moyenne  $\sigma_n$  est imposée au cours de l'essai, le champ de contraintes lié à la rotation doit être centré au milieu de l'éprouvette (Figure 3-64).

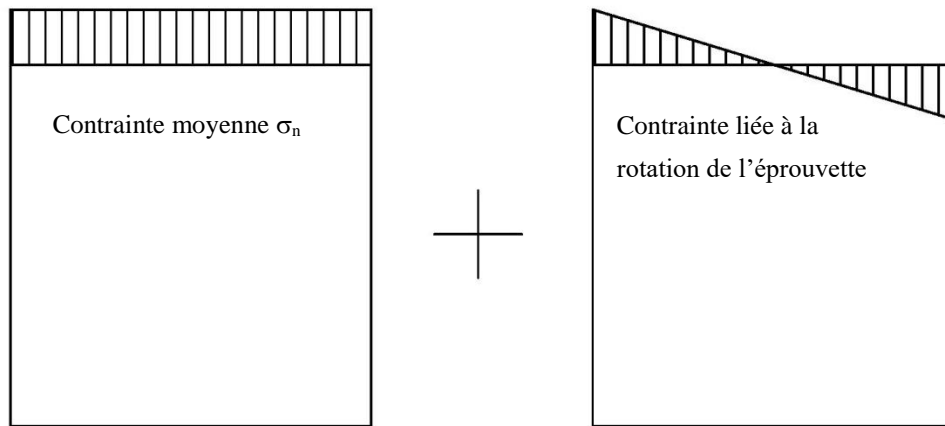


Figure 3-64 : Décomposition du champ de contrainte  $\sigma_{yy}$  dans l'essai de cisaillement

Nous pouvons calculer la rotation,  $\theta$  (hypothèse des petits déplacements) (Figure 3-65) suivant la relation suivante :

$$\theta = 2 \cdot \varepsilon_{yy}$$

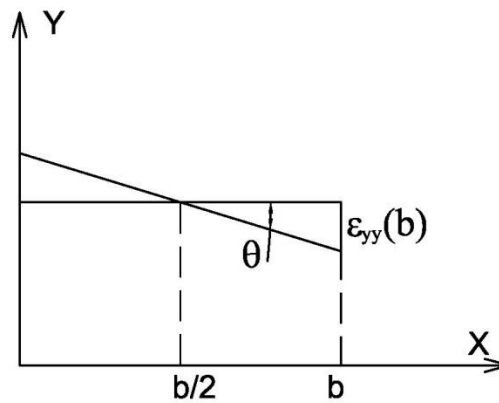


Figure 3-65 : schéma pour calculer la rotation  $\theta$

Le champ de contrainte  $\sigma_{yy}$  peut être évalué suivant l'équation ci-dessous :

$$\sigma_{yy}(x) = -\left[\sigma_n + q \left(x - \frac{b}{2}\right)\right]$$

Les inconnues sont  $\theta$  et  $q$ , si on connaît  $\theta$ , alors nous pouvons corriger la valeur de la déformation moyenne réelle de cisaillement :

$$\gamma_{xy}(\text{réelle}) = \gamma_{xy}(\text{apparent, mesure}) - \theta$$

Notre but est de sortir des essais un véritable coefficient  $G$  et de séparer la partie "rotation" de la partie "cisaillement" dans chaque éprouvette au cours de l'essai. Il faut signaler que notre proposition n'est valable que dans la partie élastique.

### 3.8.1 Calcul des paramètres de correction de la courbe de cisaillement ( $\tau - \gamma$ )

Lors de l'essai, nous mesurons  $\Delta x$  comme montré (Figure 3-66).

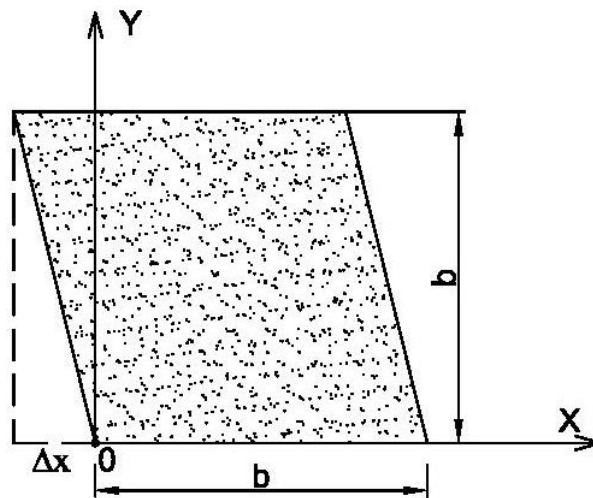


Figure 3-66 : Le déplacement  $\Delta X$  (mm) de l'éprouvette lors d'un essai de cisaillement

Nous pouvons décomposer la déformation angulaire en deux composantes :

$$\frac{\Delta x}{b} = \theta + \gamma$$

Où :

$\theta$  : Rotation de l'éprouvette

$\gamma$  : Déformation de cisaillement apparente

On peut faire la même chose sur l'effort mesuré sur la boîte de cisaillement :

$$F_{sh} = F_{sh}^{\theta} + F_{sh}^{\gamma}$$

Nous pouvons essayer d'estimer  $F_{sh}^{\theta}$  en faisant des hypothèses sur le champ de contrainte. On impose une contrainte verticale  $\tilde{\sigma}_n$  qui correspond à la contrainte moyenne subie verticalement par l'éprouvette (0,3MPa, 1MPa ou 2MPa). Si nous supposons que la rotation  $\theta$  crée un champ de contrainte linéaire et symétrique, on peut écrire pour  $z = h$

$$\sigma_{yy}^h(x) = -[\tilde{\sigma}_n + q \left(x - \frac{b}{2}\right)]$$

Cette contrainte crée le moment :

$$\tilde{M}_{/0} \sigma_{yy}^h(x) = b \int_0^b \sigma_{yy}(x) \cdot x \cdot dx$$

$$\tilde{M}_{/0} \sigma_{yy}^h(x) = \tilde{\sigma}_n \frac{b^3}{2} - q \frac{b^4}{6}$$

Il se passe la même chose en bas du cube :

$$\tilde{M}_{/0} \sigma_{yy}^b(x) = -\tilde{\sigma}_n \frac{b^3}{2} - q \frac{b^4}{6}$$

En prenant la somme de ces deux moments, on trouve que le moment total créé par la rotation du cube est :

$$\tilde{M}_{/0} \sigma_{yy}^{\theta}(x) = -q \frac{b^4}{3}$$

Où  $q$  dépend de l'angle  $\theta$  et de l'élasticité de l'éprouvette.

Si nous supposons maintenant que l'éprouvette est en équilibre (Figure 3-67), grace à l'effort horizontal  $F_{sh}^{\theta}$  appliqué au dessus du cube, on trouve :

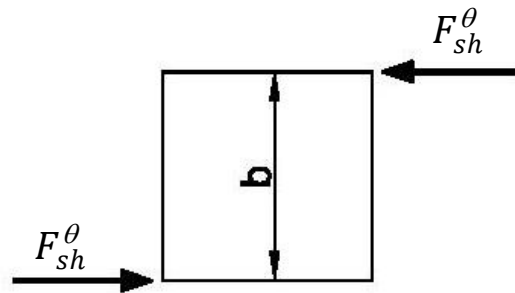


Figure 3-67 : l'effort horizontal  $F_{sh}^{\theta}$  appliqué au dessus de l'éprouvette

$$\tilde{M}_{/0} (\overrightarrow{F_{sh}^{\theta}}) = F_{sh}^{\theta} \cdot b$$

Ainsi on trouve :

$$F_{sh}^{\theta} = q \frac{b^3}{3}$$

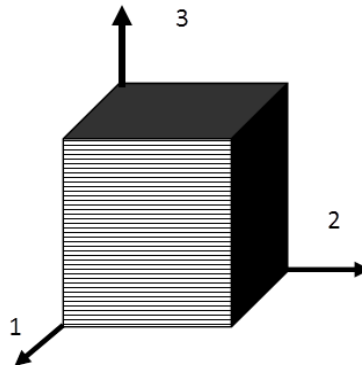
Regardons maintenant la valeur des déformations en  $x = b, z = b$  dues à la rotation  $\theta$

$$\varepsilon_{yy}^{\theta,h}(b) = -\frac{\theta}{2}$$

Et

$$\sigma_{yy}^{\theta,h}(b) = -q \frac{b}{2}$$

➤ Calcul q pour la configuration C⊥S⊥



En prenant le plan d'anisotropie ayant pour normale l'axe 3, la matrice de souplesse est du type :

$$\bar{\bar{S}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{13}} \end{bmatrix}$$

Ce qui donne avec nos notations :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{//}}{E_{//}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma_{13} = 0$$

$$\sigma_{33} = \sigma = -\frac{qb}{2}$$

$$\varepsilon_{22} = 0$$

$$\varepsilon_{12} = 0$$

$$\varepsilon_{13} = 0$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\theta}{2}$$

Nous pouvons écrire :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ 0 \\ \varepsilon_{33} \\ 0 \\ \varepsilon_{23} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{//}}{E_{//}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma_{22} \\ \sigma \\ 0 \\ \tau \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{23} &= \frac{\tau}{2G_{\perp}} \\ \varepsilon_{11} &= -\frac{\nu_{//}}{E_{//}}\sigma_{22} - \frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma \\ 0 &= -\frac{\sigma_{22}}{E_{//}} - \frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma_{22} + \frac{\sigma}{E_{\perp}}\end{aligned}$$

Et nous trouvons finalement :

$$q^{C^{\perp}S^{\perp}} = \frac{\theta}{\left(\frac{1}{E_{\perp}} - \frac{\nu_{\perp}^2}{E_{//}}\right)b}$$

➤ Calcul de q pour la configuration C<sub>//</sub>S<sub>⊥</sub>

Dans cette configuration nous avons :

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma_{13} = 0$$

$$\sigma_{22} = \sigma = -\frac{qb}{2}$$

$$\sigma_{23} = \tau$$

$$\varepsilon_{33} = 0$$

$$\varepsilon_{12} = 0$$

$$\varepsilon_{13} = 0$$



$$\varepsilon_{22} = -\frac{\theta}{2}$$

Ainsi, nous pouvons écrire :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 0 \\ 0 \\ \varepsilon_{23} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{//}}{E_{//}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \sigma \\ \sigma_{33} \\ 0 \\ \tau \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{23} &= \frac{\tau}{2G_{\perp}} \\ \varepsilon_{11} &= -\frac{\nu_{//}}{E_{//}}\sigma - \frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma_{33} \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\sigma}{E_{//}} - \frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma_{33} \\ 0 &= -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}}\sigma + \frac{1}{E_{\perp}}\sigma_{33} \end{aligned}$$

Et nous trouvons finalement :

$$q^{C//S^{\perp}} = \frac{\theta}{\left(\frac{1}{E_{//}} - \frac{E_{\perp}\nu_{\perp}^2}{E_{//}^2}\right)b}$$

➤ Calcul de q pour la configuration C//S// :

Dans cette configuration nous avons :

$$\sigma_{33} = \sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$$

$$\sigma_{22} = \sigma = -\frac{qb}{2}$$

$$\sigma_{12} = \tau$$

$$\varepsilon_{11} = 0$$

$$\varepsilon_{13} = 0$$

$$\varepsilon_{23} = 0$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{\theta}{2}$$

Ainsi, nous pouvons écrire :

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{//}}{E_{//}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{\perp}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma \\ 0 \\ \tau \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce qui donne :

$$\varepsilon_{12} = \frac{1 + \nu_{//}}{E_{//}} \tau$$

$$0 = \frac{1}{E_{//}} \sigma_{11} - \frac{\nu_{//}}{E_{//}} \sigma$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{\nu_{//}}{E_{//}} \sigma_{11} + \frac{\sigma}{E_{//}}$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} \sigma - \frac{\nu_{\perp}}{E_{//}} \sigma_{11}$$

Et nous trouvons finalement :

$$q^{C//S//} = \frac{\theta}{\left(\frac{1}{E_{//}} - \frac{\nu_{//}^2}{E_{//}}\right) b}$$

### 3.8.2 Correction de la courbe ( $\tau$ , $\Upsilon$ ) pour les essais avec Aramis

Nous avons les valeurs de  $b$ , et les valeurs de  $E_{\perp}$ ,  $\nu_{\perp}$ ,  $\nu_{//}$  et  $E_{//}$  peuvent être déduites des essais de compression,  $\theta$  est déduit des données ARAMIS. Ainsi nous pouvons connaître  $q$  pour les trois configurations  $q^{C^{\perp}S^{\perp}}$ ,  $q^{C//S^{\perp}}$ ,  $q^{C//S//}$ .

On a :

$$\gamma_{xy} = \frac{\Delta x}{b} - \theta$$

Et

$$\tau_{xy} = \frac{F_{sh}^{mesuré}}{b^2} - \frac{F_{sh}^{\theta}}{b^2}$$

Compte tenu que  $F_{sh}^{\theta} = q \frac{b^3}{3}$  nous pouvons écrire :

$$\tau_{xy} = \frac{F_{sh}^{mesuré}}{b^2} - \frac{q}{3}$$

Donc, nous pouvons retracer les courbes  $(\tau, \gamma)$  en remplaçant :

- $\left(\frac{\Delta x}{b}\right)$  par  $\left(\frac{\Delta x}{b} - \theta\right)$
- $\left(\frac{F_{sh}^{mesuré}}{b^2}\right)$  par  $\left(\frac{F_{sh}^{mesuré}}{b^2} - \frac{qb}{3}\right)$

Avec les valeurs de q trouvées  $q^{C^{\perp}S^{\perp}}$ ,  $q^{C^{\parallel}S^{\perp}}$ ,  $q^{C^{\parallel}S^{\parallel}}$ , donc nous pouvons obtenir de « vraies » courbes  $(\tau, \gamma)$  et vérifier si G le module de cisaillement est un paramètre intrinsèque du matériau qui ne dépend plus du chargement vertical appliqué.

### 3.8.3 Application sur les essais de cisaillement accompagnés par les mesures Aramis

Les figures (Figure 3-68, Figure 3-69) montrent les courbes corrigées après avoir pris en compte la rotation  $\theta$  pour la même type d'essais pour les deux formulations M1 et M4.

Nous pouvons constater que les deux courbes initiales et corrigées s'approchent et sont quasiment identiques au début de l'essai.

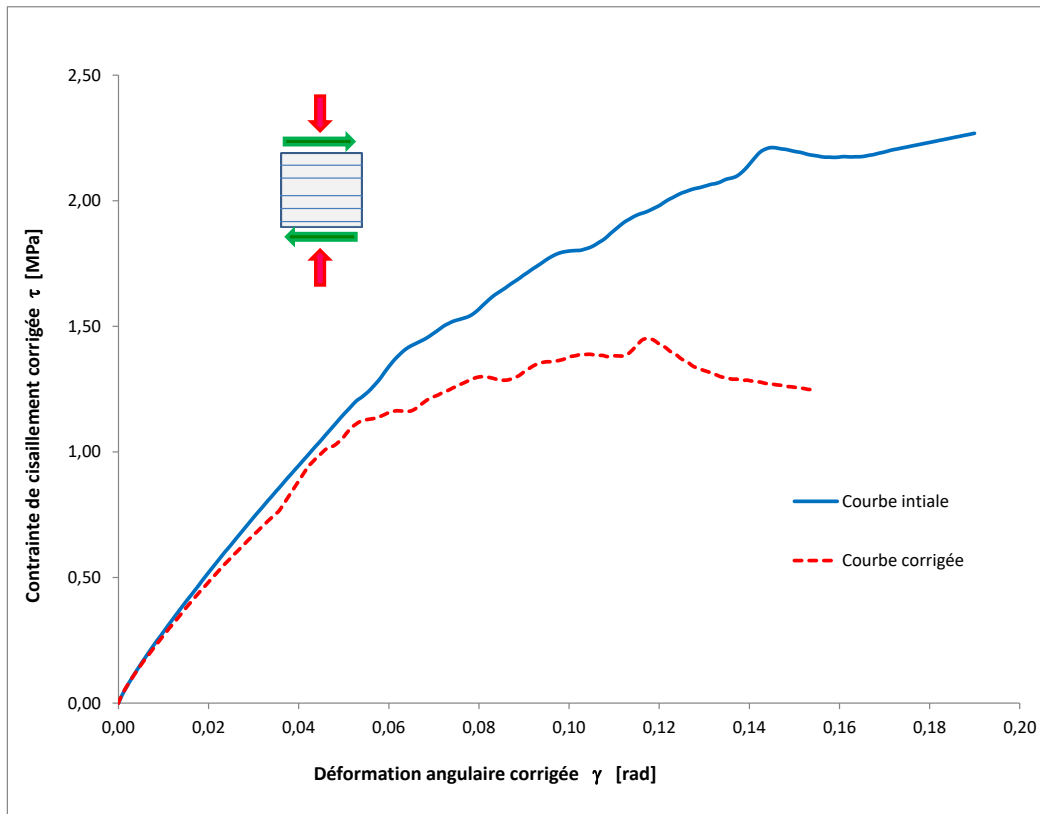


Figure 3-68 : Courbes de  $(\tau, \gamma)$ , essai M4HC $\perp$ 2S $\perp$

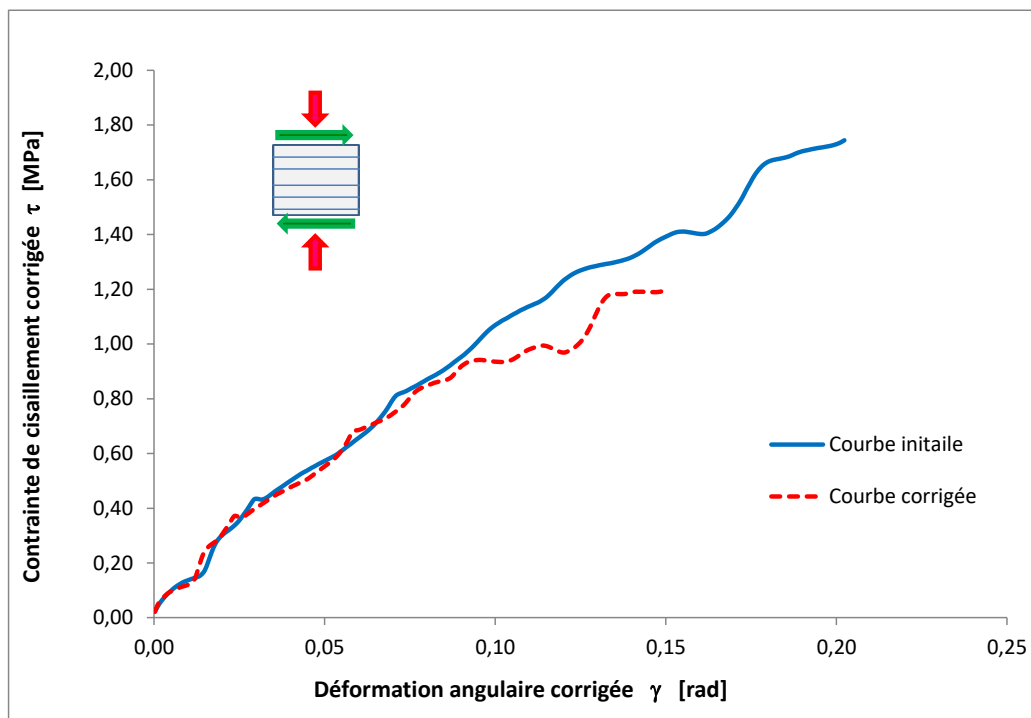


Figure 3-69 : Courbe de  $(\tau, \gamma)$ , essai M1HC $\perp$ 2S $\perp$

### 3.9 Calcul du module de cisaillement $G$

#### 3.9.1 Module de cisaillement $G_{\perp}$

Nous allons distinguer deux valeurs de module de cisaillement  $G$ , module de cisaillement perpendiculaire au plan d'anisotropie  $G_{\perp}$  et module de cisaillement parallèle au plan d'anisotropie  $G_{//}$  (§2.2.1.1).

Le module de cisaillement  $G_{\perp}$  dans les deux configurations :  $C_{\perp}S_{\perp}$ ,  $C_{//}S_{\perp}$ , est mesuré à partir de la pente initiale au début de la courbe corrigée dans le diagramme contrainte-déformation après avoir pris en compte la rotation  $\theta$  (Figure 3-70).

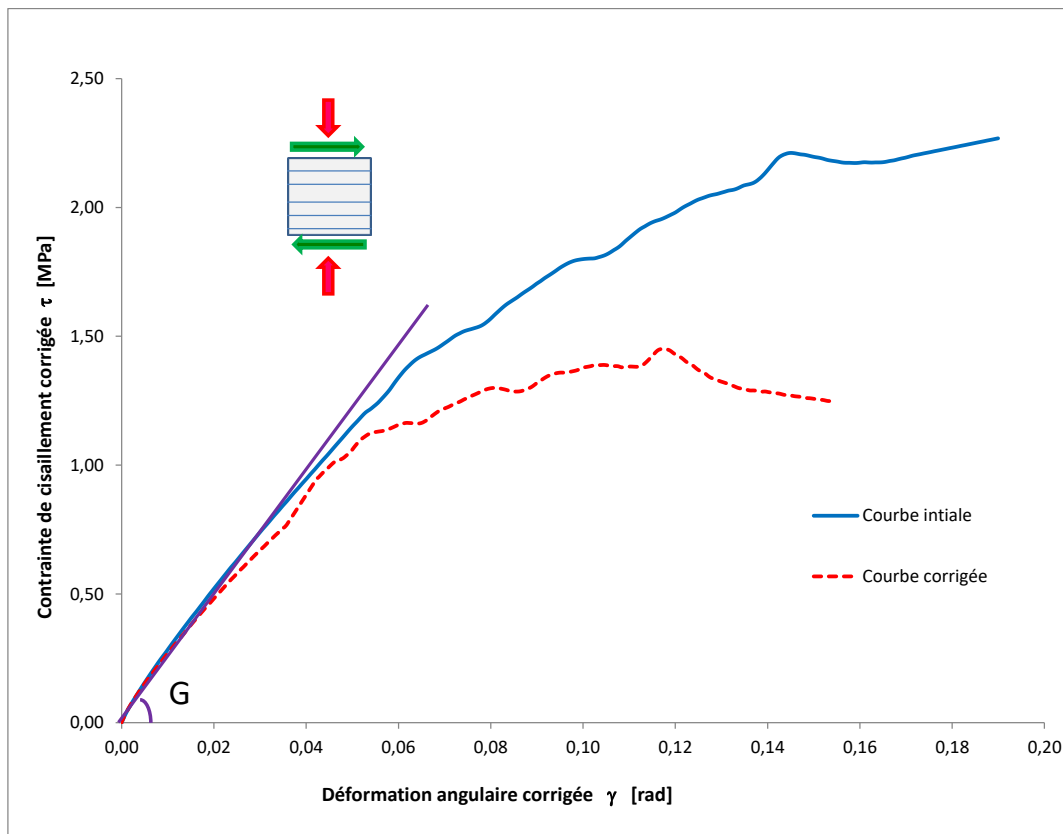


Figure 3-70 : Calcul du module de cisaillement  $G_{\perp}$ , essai M4HC $\perp$ 2S $\perp$

Le tableau (Tableau 3-9) montre les valeurs de  $G_{\perp}$  mesurés et les contraintes de compression appliquées lors des essais de cisaillement.

Essai	$G_{\perp}$ (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)
M4 H C $\perp$ S $\perp$	15,40	2,0
M4 H C $\perp$ S $\perp$	14,59	1,0
M4 H C $\perp$ S $\perp$	12,48	0,3
M4 H C// S $\perp$	11,9	1,0
M1 H C $\perp$ S $\perp$	10,1	2,0
M1 H C $\perp$ S $\perp$	8,20	0,3
M1 H C $\perp$ S $\perp$	9,75	1,0

Tableau 3-9 : Valeurs de module de cisaillement  $G_{\perp}$  (MPa)

Les figures (Figure 3-71, Figure 3-72) montrent le module de cisaillement en fonction de la charge de compression appliquées pendant les essais de cisaillement C $\perp$ S $\perp$  pour les éprouvettes de la formulation M4 et M1.

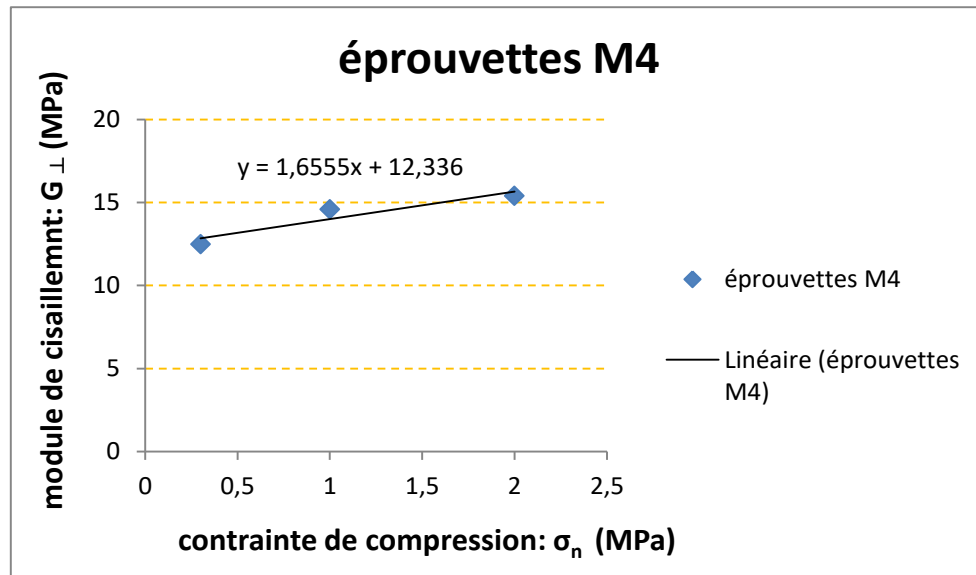


Figure 3- 71 : Le module de cisaillement  $G_{\perp}$  en fonction les contraintes de compression  $\sigma_n$ , formulation M4

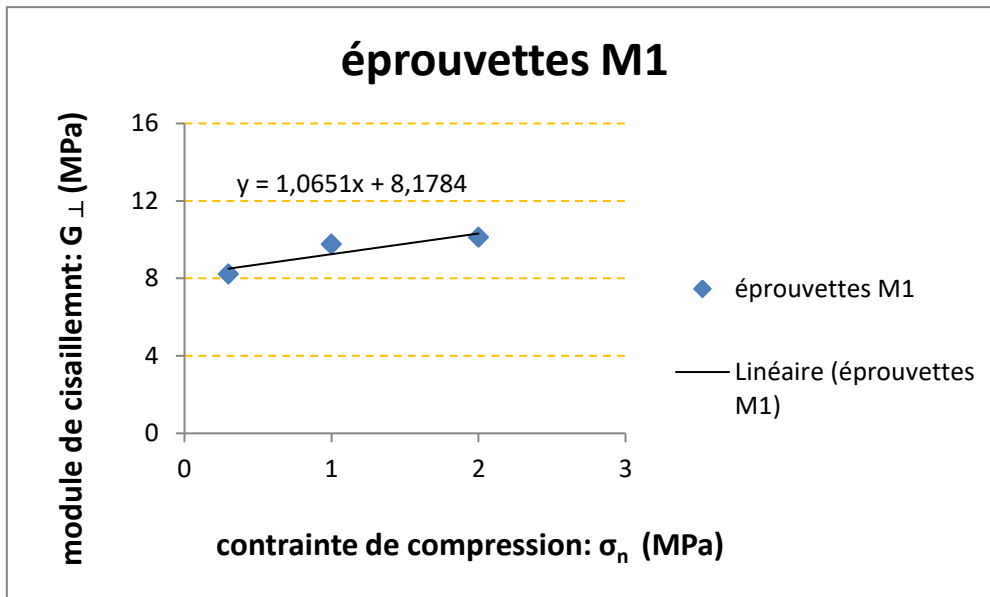


Figure 3-72 : Le module de cisaillement  $G_{\perp}$  en fonction des contraintes de compression  $\sigma_n$ , formulation M1

Le point d'intersection de la courbe de tendance, avec l'axe de  $\sigma_n$  peut être considéré comme un module de cisaillement  $G_{\perp}$  intrinsèque au matériau de chaque formulation. Nous trouvons les valeurs suivantes (Tableau 3-10) :

Formulation	M1	M4
$G_{\perp}$ (MPa)	8,2	12,3

Tableau 3-10 : Valeurs de module de cisaillement  $G_{\perp}$

### 3.9.2 Module de cisaillement $G_{//}$

Le module de cisaillement parallèle  $G_{//}$  peut être calculé directement à partir de la pente initiale au début de la courbe corrigée dans le diagramme contrainte-déformation ou selon la mécanique des matériaux, avec l'équation suivante :

$$G_{//} = E_{//} / 2(1 + \nu_{//})$$



Pour nos matériaux cette formule n'est valable que dans le plan d'anisotropie. C'est à dire pour l'essai de type C//S//.

Suivant cette équation, le tableau ci-dessous (Tableau 3-11) présente les calculs de module de cisaillement parallèle  $G_{//}$  pour les deux formulations M1 et M4.

Formulation	M1	M4
$E_{// \text{moyen}}$ (MPa)	40	79
$\nu_{//\text{moyen}}$ (MPa)	0,62	0,74
$G_{//}$ (MPa)	12,4	22,7

Tableau 3-11 : Valeurs de module de cisaillement  $G_{//}$

Nous n'avons qu'un seul essai avec Aramis de type C//S//, c'est l'essai M1H C//0,3S//1, pour comparer avec les résultats du tableau ci-dessus (Tableau 3-11).

Cet essai donne une valeur expérimentale  $G_{//} = 7,5$  MPa qui est différent de la valeur calculée analytiquement 12,4 MPa. Cette comparaison n'est pas significative pour un seul essai avec Aramis.

### 3.10 Résistance initiale au cisaillement $\tau_0$

Pour calculer la résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$ , nous allons adopter la même méthode pour calculer les contraintes limites de compression pour les essais de compression de type C $\perp$  (voir §.2.2.1.2). Donc on va diviser la courbe de contrainte de cisaillement-déformation angulaire obtenue par Aramis en deux zones : la première est la zone d'élasticité, la deuxième est la partie de la plasticité. Le point d'intersection des tangentes de ces deux zones sur la courbe d'Aramis indique la résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  comme sur la figure (Figure 3-73).

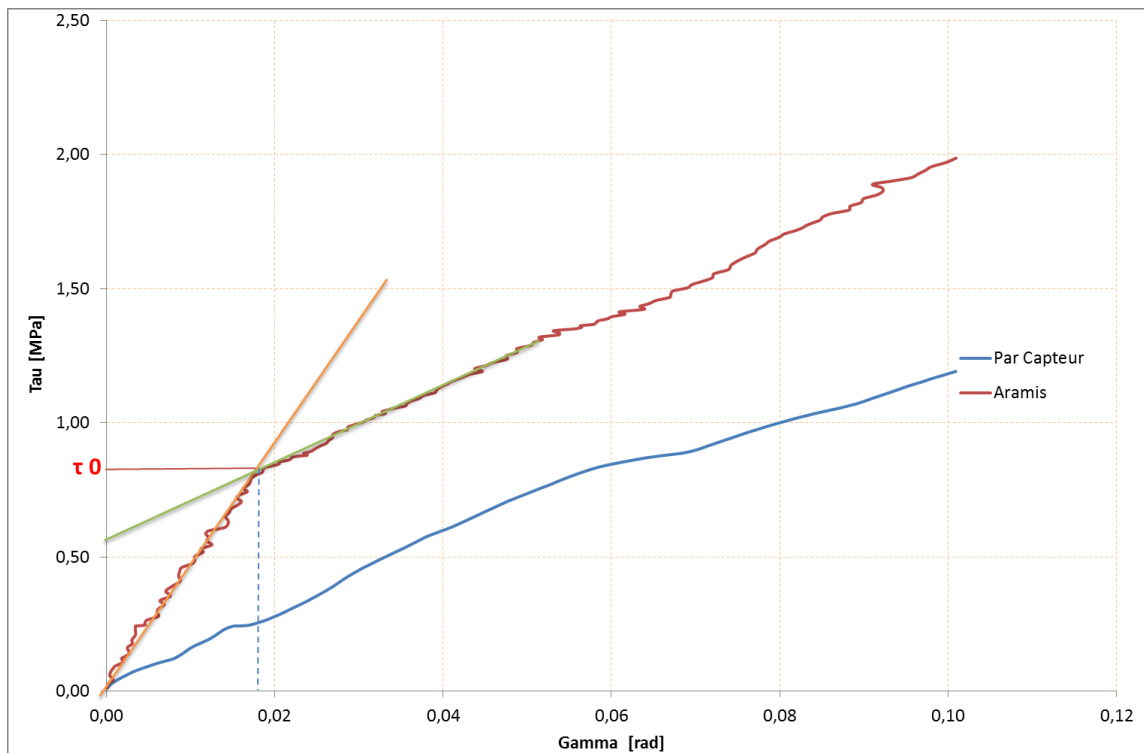


Figure 3-73 : Calcul de contrainte limite de cisaillement  $\tau_0$ , essai M4HC+1S+

La Figure (Figure 3-74) montre la résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  pour la formulation M4,  $\tau_0 = 0,47 \text{ MPa}$

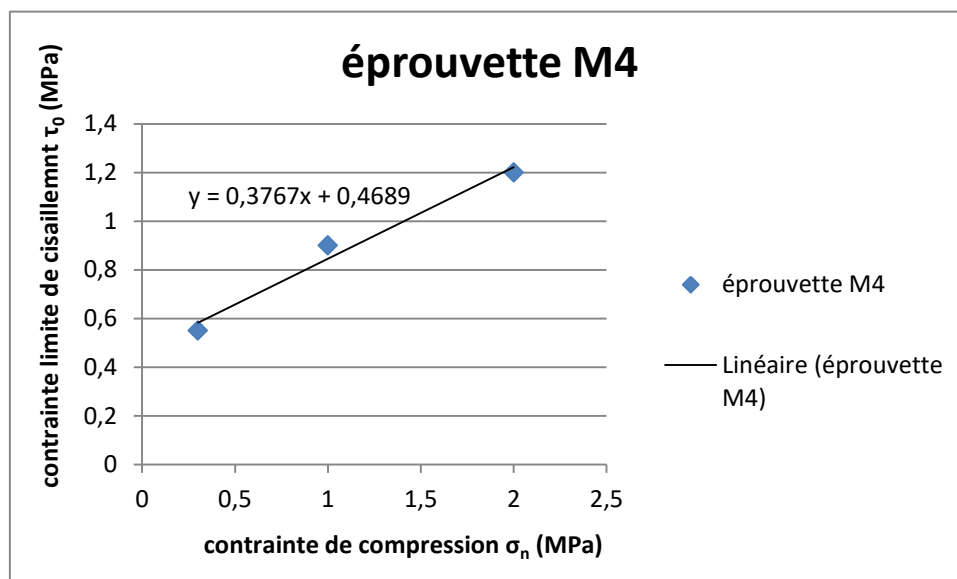


Figure 3- 74 : La résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  pour la formulation M4

La Figure (Figure 3-75) montre la résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  pour la formulation de M1,  $\tau_0 = 0,27$  MPa

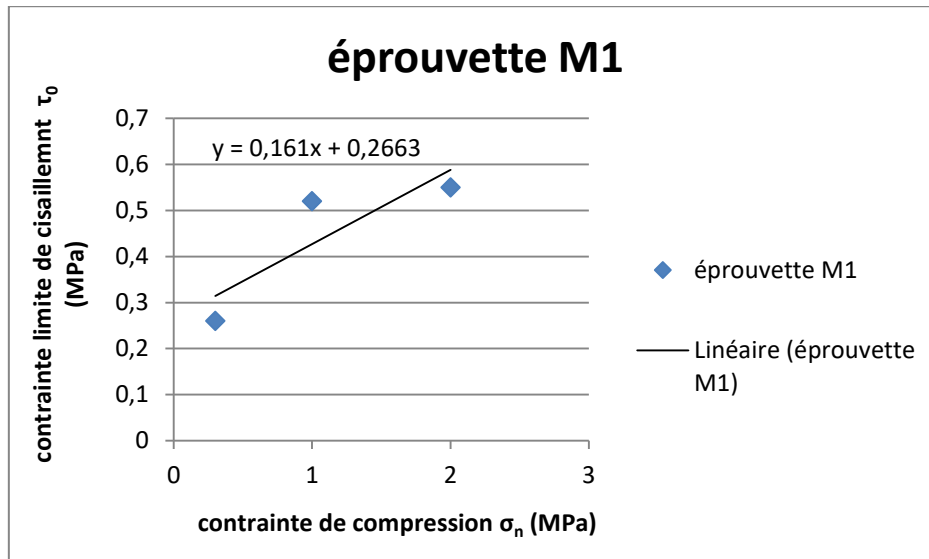


Figure 3- 74 : La résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  pour la formulation M1

### 3.11 Conclusions partielles du chapitre

- La déformation verticale  $\varepsilon_{yy}$  garde une valeur moyenne quasi constante pendant l'essai de cisaillement. Des zones de compression locale élevée sont apparues à partir de valeurs de  $\gamma$  dépassant 12% en moyenne, celles-ci sont plus nombreuses pour les éprouvettes type M1
- La déformation  $\varepsilon_{xx}$  prend une valeur moyenne quasi nulle durant une grande partie de l'essai de cisaillement. des effets de compression locale de contact avec les parois sont apparus pour des valeurs élevées de  $\gamma$  dépassant 15%.
- La déformation  $\varepsilon_{xy}$  met en évidence l'orientation de bandes de cisaillement orientées dans le sens des particules de chènevottes quelle que soient les formulations ou l'orientation de la contrainte normale de confinement.
- Les valeurs de rotations  $\theta$  de l'éprouvette varient en fonction de la charge de compression appliquée et de la formulation de l'éprouvette. La rotation prend une valeur plus élevée quand la charge de compression est plus faible pour la même formulation. Tandis qu'elle prend une valeur plus élevée pour la formulation M1 par rapport à la

formulation M4, pour une même contrainte de compression appliquée. Ceci est dû à sa structure qui est plus poreuse que la formulation M1.

- Les mesures de la rotation des éprouvettes avec Aramis pendant l'essai de cisaillement nous ont permis de tracer les « vraies » courbes  $(\tau-\gamma)$  afin de trouver les modules de cisaillement  $G_{\perp}$  du béton de chanvre. Ici nous pouvons noter que la formulation M4 présente une valeur de  $G_{\perp}$  plus grande que celle de la formulation M1.
- Les valeurs de  $G_{//}$  ont été obtenues par calculs analytiques à partir des valeurs expérimentales de modules de Young  $E_{//}$  et module de poisson  $\nu_{//}$ . Aussi, nous pouvons remarquer que la valeur  $G_{//}$  pour la formulation M4 est plus grande que celle de la formulation M1.
- Les valeurs de la résistance initiale au cisaillement  $\tau_0$  ont été, aussi, identifiées à partir des courbes  $(\tau-\gamma)$  d'Aramis. La formulation M4 présente une résistance initiale  $\tau_0$  plus importante que celle de la formulation M1.



# **Chapitre 4. Modélisation et application numérique**



## 4.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est une modélisation et application numérique sur l'utilisation des blocs en béton chanvre afin de contreventer les bâtiments à ossature bois ou métallique.

Le cas étudié concerne un bâtiment multiétage à ossature bois soumis aux actions sismiques.

Au premier temps, nous avons étudié le bâtiment sous action sismique avec des contreventements traditionnels en bois (panneaux OSB cloués sur des montants en bois massif).

Au deuxième temps, le même bâtiment a été étudié sous actions sismiques, mais cette fois ci, le contreventement est assuré par des murs de remplissage en blocs de béton chanvre. Trois types de bloc de béton de chanvre ont été étudiés : blocs type M4, bloc type M1 et Chanvribloc.

Aussi nous avons étudié deux épaisseurs : 30 cm et 50 cm, des murs en bloc de béton du chanvre.

Le chapitre est terminé par une étude de comparaison et des conclusions.

## 4.2 Description du bâtiment étudié

Il s'agit d'un bâtiment d'habitation collectif multiétage en ossature bois. Les figures ci-dessous (Figure 4-1) (a et b) présentent les plans d'Architecte (Projet 28 logements en bois « Le Lain » à Ploeren (56880)) : vue en plan et une coupe principe.

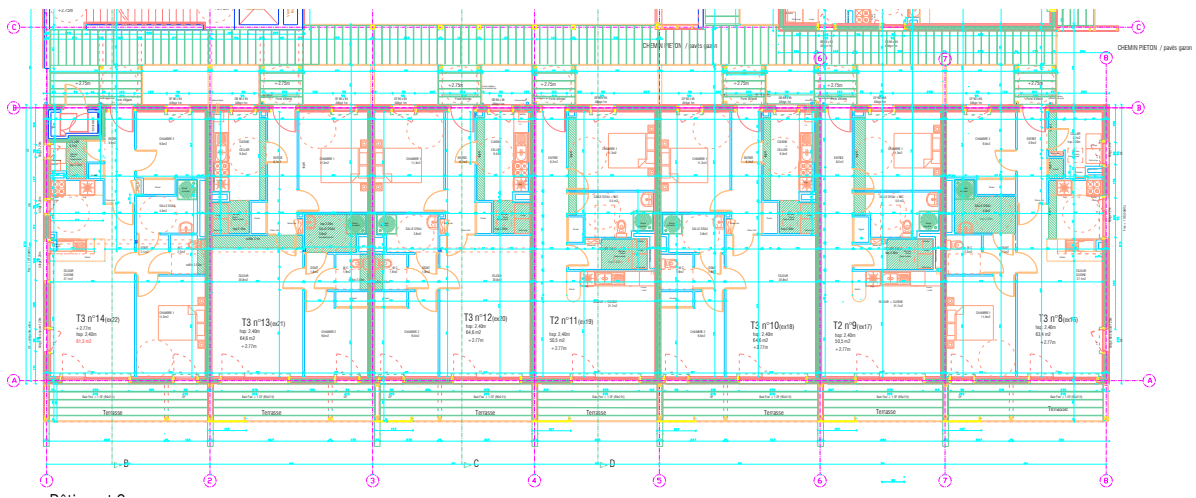


Figure 4-1 (a) : Vue en plan



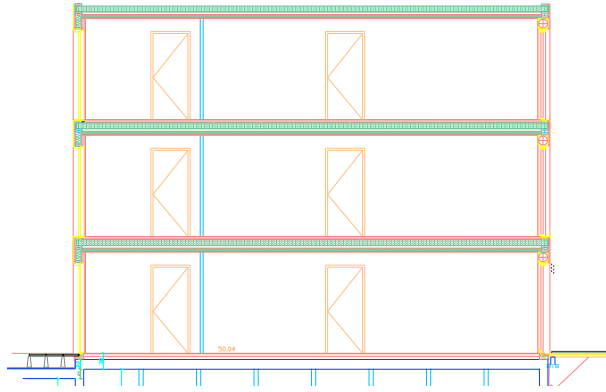


Figure 4-1 (b) : Coupe type Architecte

La figure (Figure 4-2) présente les détails des murs en façades. Nous pouvons remarquer que le système porteur est composé des montants en bois massifs. Le contreventement est assuré par des panneaux OSB cloués sur les montants en bois.

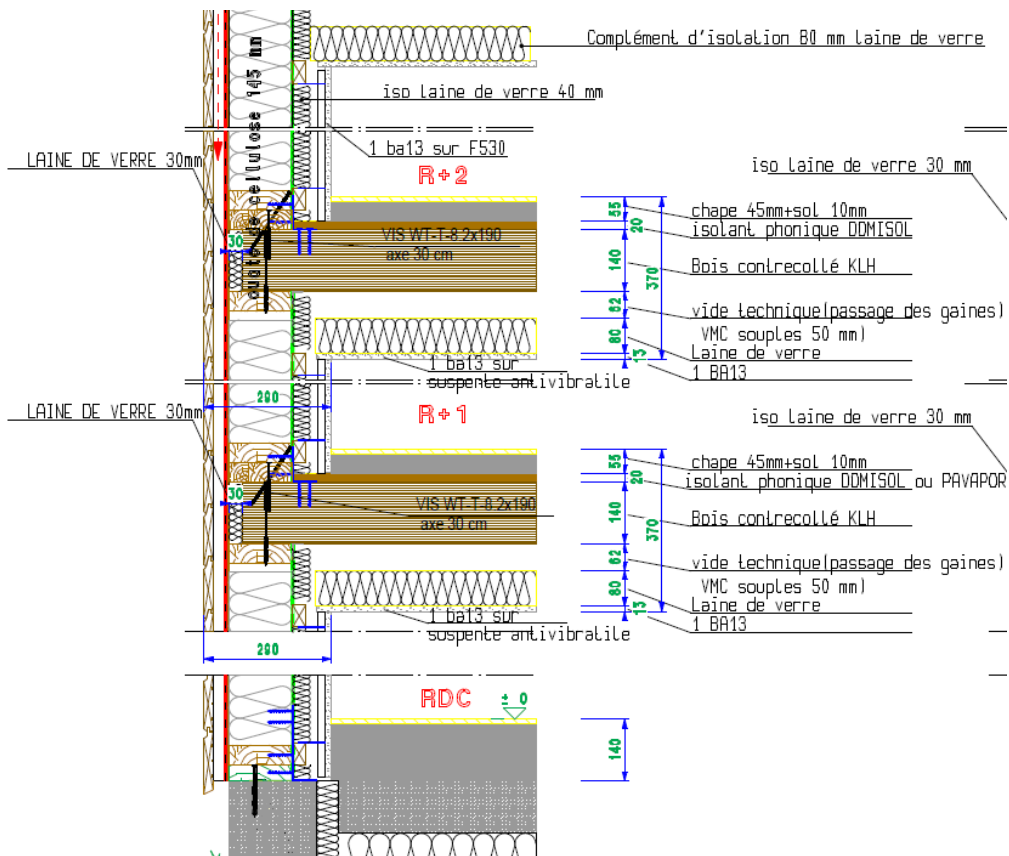


Figure 4-2: coupe sur mur façade ossature

La figure (Figure 4-3) présente les détails constructifs des murs porteurs intérieurs (refends). Ceux-ci sont fabriqués en bois contrecollé KLH (CSTB Panneaux KLH) d'une épaisseur 13 cm.

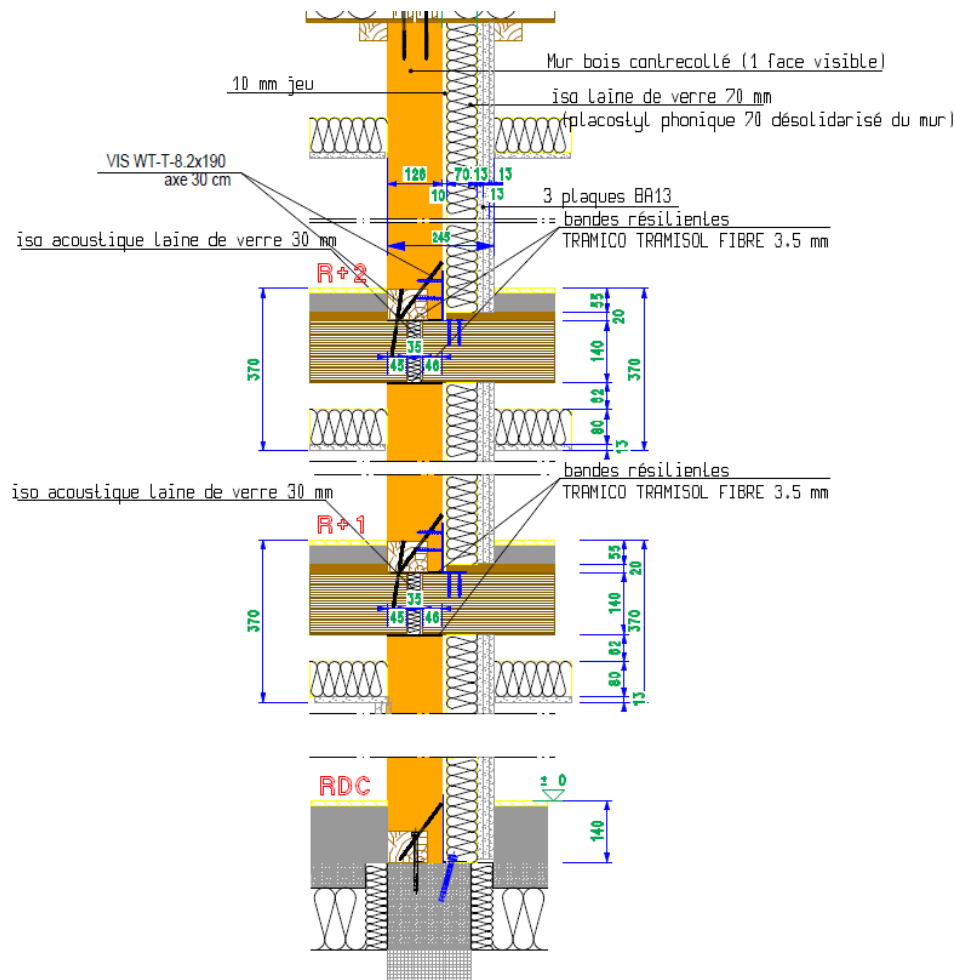


Figure 4-3 : coupe sur mur refend

Les planchers horizontaux sont constitués en bois contrecollé KLH (CSTB Panneaux KLH) d'une épaisseur de 14 cm. Ils sont portés sur les façades et sur les refends intérieurs. Il faut noter que les planchers en bois KLH travaillent en deux sens, c'est la raison pour laquelle nous pouvons remarquer la présence d'une poutre en bois lamellé collé filant dans le sens longitudinal du bâtiment. Cette poutre coupe la portée du plancher dans le sens transversal du bâtiment, (Figure 4-4).

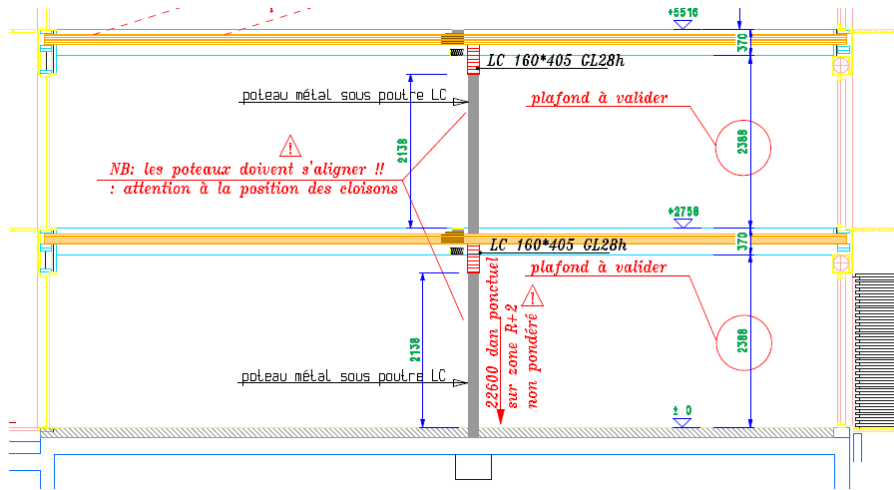


Figure 4-4 : Poutre en bois lamellé collé coupe la portée du plancher KLH

### 4.3 Hypothèses

#### 4.3.1 Norme et Références

- Eurocodes et ses documents d'application nationale

#### 4.3.2 Distribution des Charges

##### 4.3.2.1 Charges permanentes

Les charges permanentes à prendre en compte, en plus des éléments structuraux, sont :

Eléments	$G_k$ (daN/m <sup>2</sup> )
Complexe façade (Bardage bois extérieurs + isolations + plaques plâtres)	50 daN/m <sup>2</sup>
Cloisons intérieurs	50 daN/m <sup>2</sup>
Complexe planché (Chape + faux plafonds + réseaux + revêtements)	130 daN/m <sup>2</sup>

### 4.3.2.2 Charges d'exploitations

Les charges d'exploitations à prendre en compte, sont :

Elément	$Q_k$ (daN/m <sup>2</sup> )
Charge d'exploitation sur plancher	150 daN/m <sup>2</sup>

### 4.3.2.3 Actions climatiques

Pour cette présente étude de comparatifs, nous avons étudié seulement le bâtiment sous actions sismiques.

### 4.3.2.4 Séisme

Les hypothèses parasismiques sont définies au sens de la norme Eurocode 8, NF EN 1998.

Le bâtiment est de catégorie A suivant l'Eurocode 0 NF EN 1990 habitation, zones résidentielles. Le coefficient  $\varphi=0,8$  suivant le tableau 4.2 de l'Eurocode 8 NF EN 1998.

Nous avons étudié le bâtiment en deux zones sismiques : la première zone est de sismicité modéré (zone 3) tandis que la deuxième est de moyenne sismicité (zone 4).

Les autres paramètres requis pour les calculs sismiques sont les suivants :

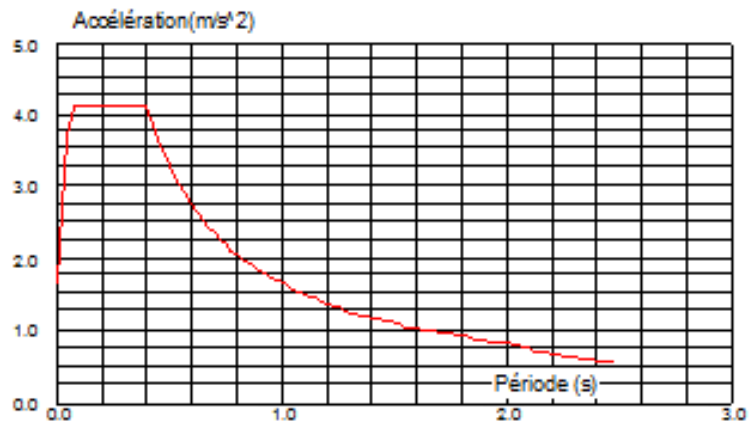
- Classification des sols : sol de classe C.
- Classe de risque : classe d'importance II.
- Coefficient d'importance :  $\gamma_I = 1$ .
- Type de spectre à prendre en compte : spectre de réponse élastique selon l'arrêté du 22 octobre 2010.
- Amortissement : 5% ;
- Masse à prendre en compte dans le calcul :  $\Psi_{E,i} = \varphi \cdot \Psi_{E,i} = 0,80 \times 0,30 = 0,24$  ;
- Coefficient de comportement :  $q = 1$ , nous avons étudié seulement le spectre de réponse élastique.
- Paramètres du spectre de réponse pour l'aléa sismique modéré (Figure 4-5) :  
Accélération :  $a_{gr} = 1,100$

$$a_{vg} = 0,990$$

$$a_g = 1,100$$

Amortissement : = 5.00 %

Paramètre du sol : S = 1,500



$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)	$q_x = q_y$
1,10	1,50	0,06	0,40	2,00	1,00

Figure 4-5 : Spectres de réponse

- Paramètres du spectre de réponse pour la moyenne sismicité (Figure 4-6):

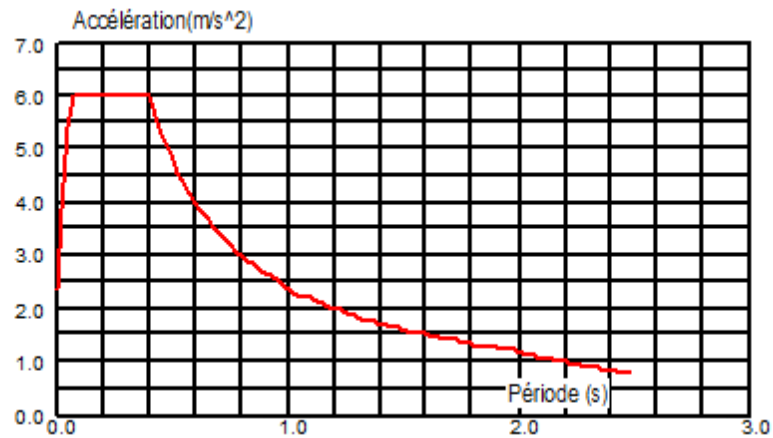
Accélération :  $a_{gr} = 1,600$

$$a_{vg} = 1,44$$

$$a_g = 1,600$$

Amortissement : = 5.00 %

Paramètre du sol : S = 1,500



$a_g$ (m/s <sup>2</sup> )	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)	$q_x = q_y$
1,60	1,50	0,06	0,40	2,00	1,00

Figure 4-6 : Spectres de réponse

- Composante verticale de l'action sismique négligée :  $a_{vg} \leq 0,25g$
- Effets accidentels de torsion (clause 4.3.2 de l'Eurocode 8 NF EN 1998)

$$e_{ai} = \pm 0,05.L_i$$

- Combinaison des réponses modales suivant clause 4.3.3.2 : nous avons adopté la combinaison quadratique complète.
- Combinaison des effets des composantes de l'action sismique (clause 4.3.3.5 de l'Eurocode 8 NF EN 1998) :  
Nous avons adopté la combinaison de Newmark

#### 4.3.2.5 Ouvrages en bois

- Bois massifs de classe de résistance C22.
- Bois lamellé collé de classe GL28h.
- Bois contrecollé KLH suivant. (CSTB Panneaux KLH)
- Panneaux OSB : de classe OSB4 suivant NF EN 300 (Panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB) - Définitions, classification et exigences).

#### 4.3.2.6 Ouvrages en béton armé

- Béton armé de classe de résistance C25/30

#### 4.3.2.7 Ouvrages en béton de chanvre

Il faut noter que nous avons adopté des valeurs moyennes des résultats des essais.

##### ➤ Formulation M4

- Masse volumique :	814 kg/m <sup>3</sup>
- Module de Young E :	96 MPa
- Coefficient de Poisson :	0,20
- Module de cisaillement :	20 MPa
- Résistance caractéristique en compression :	7,00 MPa

##### ➤ Formulation M1

- Masse volumique :	610 kg/m <sup>3</sup>
- Module de Young E :	35 MPa
- Coefficient de Poisson :	0,40
- Module de cisaillement :	12 MPa
- Résistance caractéristique en compression :	1,50 MPa

##### ➤ Chanvribloc

- Masse volumique :	340 kg/m <sup>3</sup>
- Module de Young E :	7,67 MPa
- Coefficient de Poisson :	0,1
- Module de cisaillement :	1,5 MPa
- Résistance caractéristique en compression :	0,33 MPa

### 4.3.3 Combinaison d'actions

Le § 6.4.3.4 de l'Eurocode 0, NF EN 1990 donne les combinaisons d'actions pour les situations de projet sismiques.

#### 4.3.4 Logiciel de calcul

- Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2016.

### 4.4 Description du modèle

#### 4.4.1 Présentation générale

Nous avons adopté :

1. Méthode d'analyse élastique linéaire modale.
2. Modèle spatial (3 dimensions)

Le modèle spatial comprend tous les éléments structuraux primaires (Figure 4-7).

- Les montants en bois dans les murs extérieurs.
- Les panneaux en bois OSB ou les panneaux en béton de chanvre dans les façades.
- Les poutres en bois LC dans les façades et à l'intérieurs du bâtiment.
- Les poteaux intérieurs porteurs des poutres LC intérieurs.
- Les planchers en bois KLH.
- Longrines périphérique en béton armé de classe de résistance C25/30 en fondations.

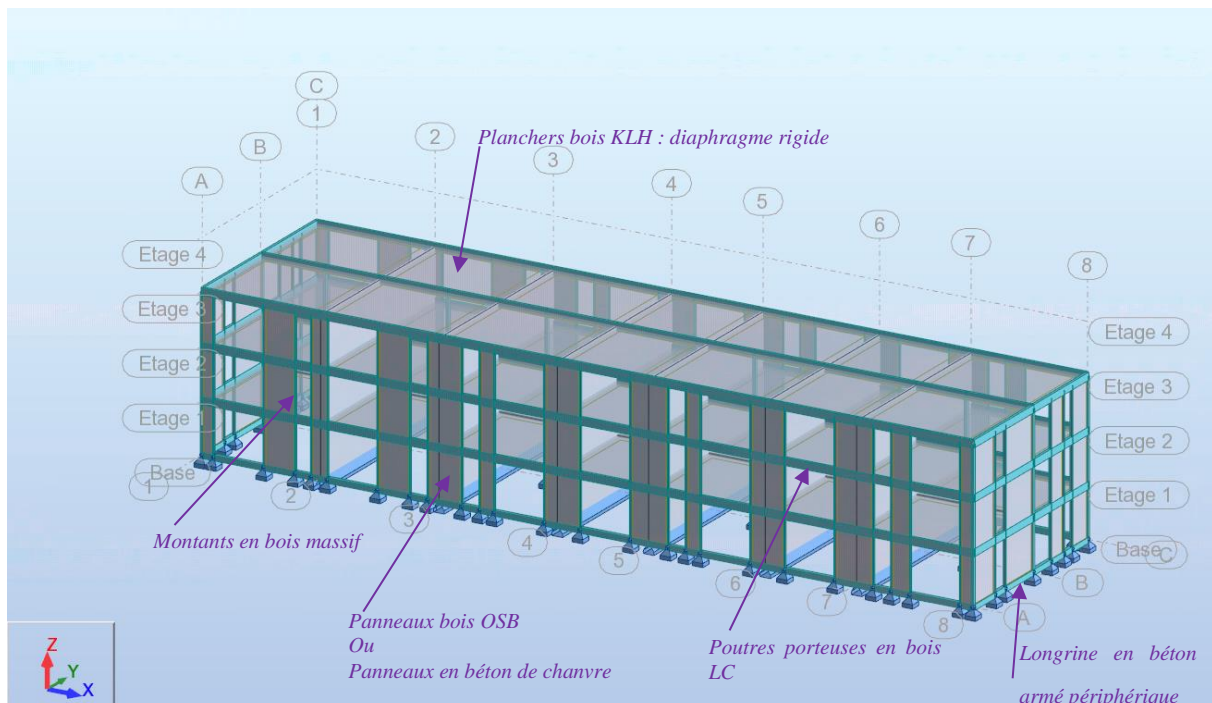


Figure 4-7 : Vues générales de la structure modélisée : Montants et poteaux en bois massif, poutres en bois lamellé collé – refends en bois KLH – Plancher en bois KLH.



## 4.4.2 Spécificité de la modélisation éléments finis

### 4.4.2.1 Surfaique :

Les éléments finis surfaiques sont de type coques.

### 4.4.2.2 Filaires

Les poteaux, les montants et les poutres sont modélisés en éléments : barres.

### 4.4.2.3 Diaphragme

Les planchers en bois KLH sont considérés comme diaphragme horizontal indéformable dans leur plan (corps rigide).

### 4.4.2.4 Comportement fissuré du béton armé

- Coefficient d'inertie fissurée = 0,50

### 4.4.2.5 Comportement fissuré du béton du chanvre

Comme pour le béton armé, nous avons adopté un coefficient d'inertie fissurée = 0,50 pour le béton du chanvre.

## 4.5 Analyse modale et sismique

Pour les deux niveaux de sismicité modéré et moyenne, nous avons effectué les calculs modaux et sismiques du bâtiment étudié en prenant en compte pour chaque calcul le type de contreventement :

1. Par panneaux en bois OSB.
2. Par panneaux en béton du chanvre M4.
3. Par panneaux en béton du chanvre M1.
4. Par panneaux Chanvribloc.

L'analyse modale nous permet de trouver les modes fondamentaux d'oscillation de la structure.

Le calcul sismique donne les déplacements et les efforts internes dans la structure engendrés sous les différentes combinaisons des actions sismiques appliquées. Dans nos calculs, nous avons effectué les vérifications suivantes :

- 1) Effet de second ordre suivant le §4.4.2 de l'Eurocode 8 :

Pour ne pas prendre en compte les effets du second ordre (effet P-Δ) Il faut vérifier que :

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$$

- $\theta$  : Coefficient de sensibilité au déplacement relatif entre étages ;
- $d_r$  : déplacement relatif de calcul entre étages ;
- $P_{tot}$  : charge gravitaire totale due à tous les étages situés au-dessus de l'étage considéré, y compris celui-ci ;
- $V_{tot}$  : effort tranchant sismique total au niveau considéré ;
- $h$  : hauteur de niveau, entre étages.

2) Limitation des dommages suivant le §4.4.3 DE L'EC8 :

$$d_r \cdot v \leq 0,005 \cdot h$$

- $d_r$  : Déplacement relatif de calcul entre étages ;
- $v$  : Coefficient de réduction.
- $h$  : hauteur de niveau, entre étages.

Pour le bâtiment de catégorie d'importance II, le coefficient de réduction  $v=0,50$ .

3) Vérification des contraintes de compression dans les panneaux de béton du chanvre :

Nous avons adopté un modèle de calcul suivant la figure ci-dessous (Figure 4-8), la largeur  $b$  de diagonale de compression est prise égale à 4 fois l'épaisseur du mur.

$$\sigma_{sd} \leq \sigma_e$$

$\sigma_{sd} = \frac{N_{ED}}{b \cdot ep}$  : Contrainte de calcul en compression ;

$\sigma_e$  Résistance caractéristique (élastique) en compression.

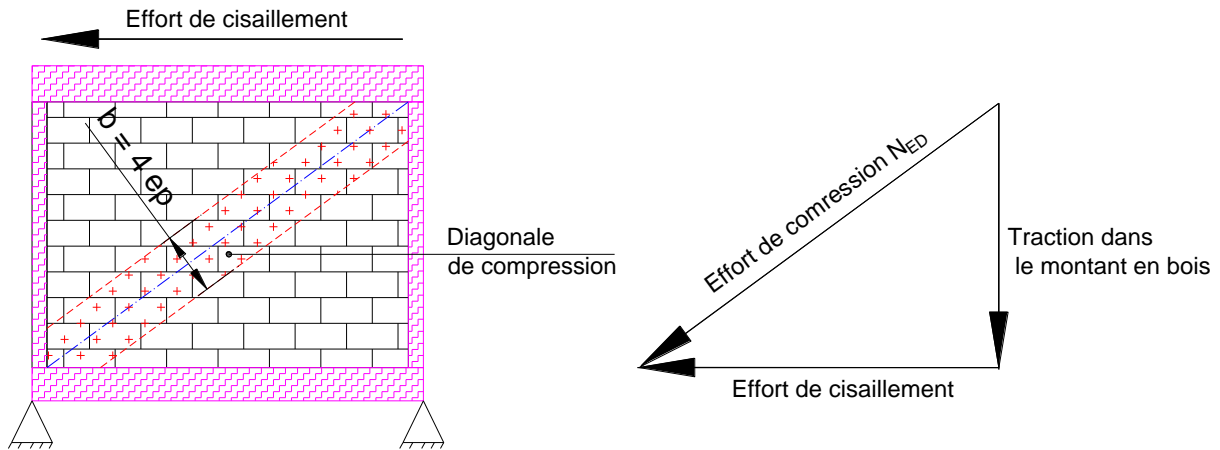


Figure 4-8 : Le modèle du calcul adopté pour les contraintes de compression dans les panneaux de béton du chanvre

## 4.6 Résultats des calculs sous actions sismiques

Nous présentons dans le paragraphe 4.4.1.1, ci-dessous, deux exemples des calculs détaillés :

- le premier pour le bâtiment contreventé par des panneaux en bois OSB,
- et le deuxième pour le même bâtiment contreventé par panneaux en bloc de béton du chanvre M4.

### 4.6.1 Exemples détaillés des calculs

- Bâtiments contreventés par des panneaux OSB

L'analyse modale est effectuée sur 20 modes afin d'isoler les modes fondamentaux de la structure et de dépasser 90% de masse totale. Voir tableau ci-dessous (Tableau 4-1)

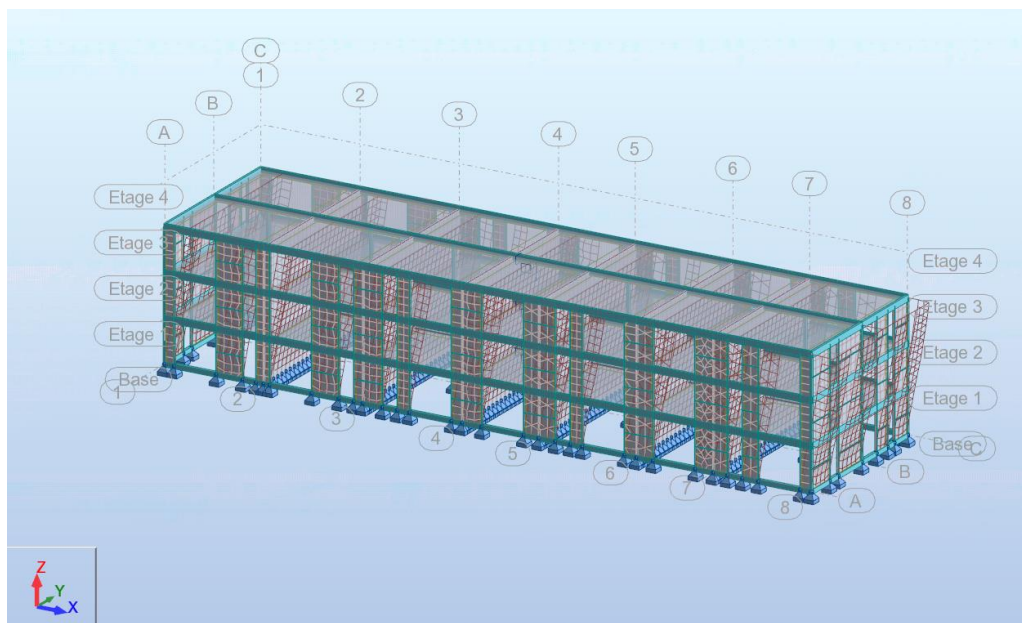
Le paragraphe 4.3.3.3 de l'EC8 a été appliqué pour la combinaison des réponses modales dans la direction Y où la condition de dépassement de 90% de masse total n'est pas atteinte.

Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Tot.mas.UX [kg]	Tot.mas.UY [kg]
1	2,97	0,34	83,79	0,00	83,79	0,00	450862,09	447225,97
2	9,56	0,10	96,32	0,00	12,53	0,00	450862,09	447225,97
3	13,76	0,07	96,32	6,20	0,00	6,20	450862,09	447225,97
4	16,43	0,06	98,56	6,20	2,25	0,00	450862,09	447225,97
5	17,29	0,06	98,56	82,89	0,00	76,69	450862,09	447225,97
6	21,87	0,05	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
7	21,92	0,05	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
8	22,94	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
9	22,99	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
10	23,97	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
11	24,01	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
12	24,56	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
13	24,89	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
14	25,44	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
15	25,53	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
16	25,65	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
17	25,69	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
18	25,70	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
19	25,73	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97
20	26,09	0,04	98,57	82,89	0,00	0,00	450862,09	447225,97

Tableau 4-1 : Des modes propres

Quelques déformées des modes propres

- Mode N° 1 :

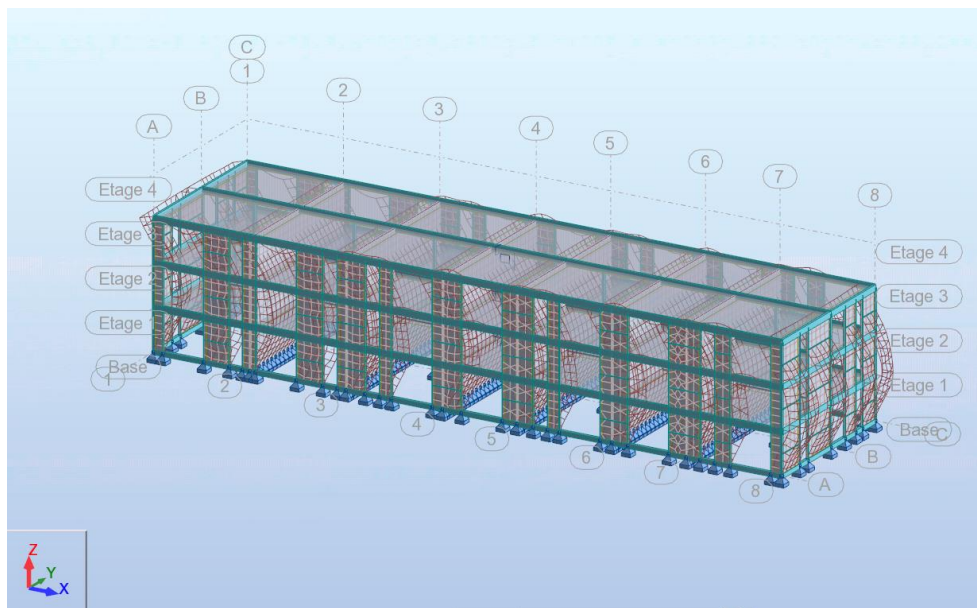


Période = 0,34 sec

Direction X - Masses modales sollicitées = 83,79%

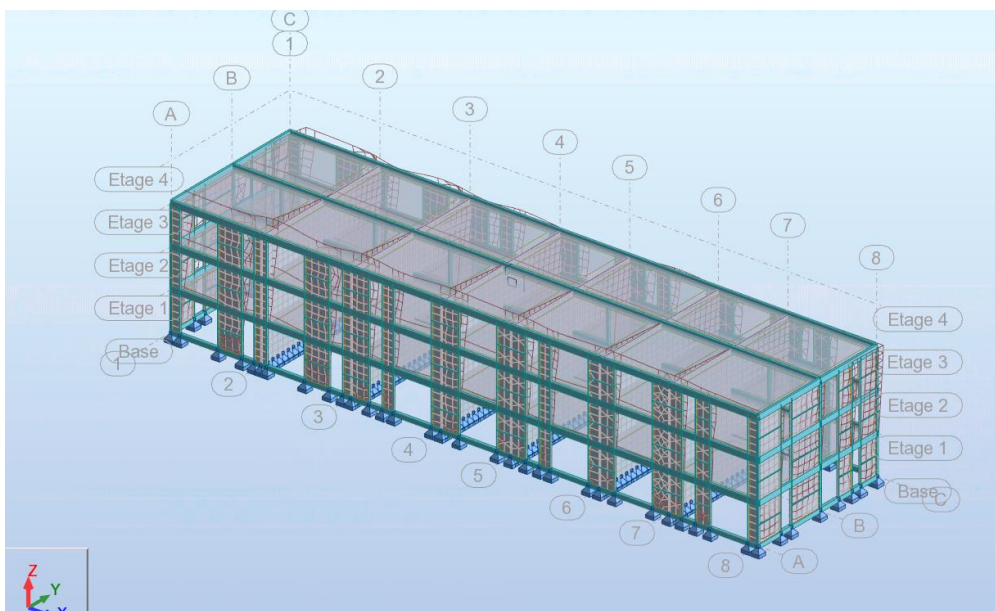
Direction Y - Masses modales sollicitées = 0,0%

- Mode N° 2 :



Période = 0,10 sec  
 Direction X - Masses modales sollicitées = 12,53%  
 Direction Y - Masses modales sollicitées = 0,0%

- Mode N° 5 :



Période = 0,06 sec  
 Direction X - Masses modales sollicitées = 0,0%  
 Direction Y - Masses modales sollicitées = 76,79%

#### 4.6.1.1 Evaluation des déplacements

- Effet de second ordre (§4.4.2 de l'Eurocode 8)

Description entre étage	Déplacement entre étage [cm]	Hauteur h [cm]	$P_{tot}$ [T]	$V_{tot}$ [T]	$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$	Remarque
Etage3-Etage2	0,4	280	151,54	57,83	0,0037	Vérifié
Etage2-Etage1	0,6	280	304,46	94,598	0,0069	Vérifié
Etage1-Fondations	0,5	280	455,69	119,50	0,0069	Vérifié

- Limitation des dommages (§4.4.3 de l'Eurocode 8)

Description entre étage	Déplacement entre étage $d_r$ [cm]	Hauteur h [cm]	$d_r \cdot \nu \leq 0,005 \cdot h$ [cm]	Remarque
Etage3-Etage2	0,4	280	0,20 < 1,40	Vérifié
Etage2-Etage1	0,6	280	0,30 < 1,40	Vérifié
Etage1-Fondations	0,5	280	0,25 < 1,40	Vérifié

- Bâtiment contreventé par des murs en bloc de béton de chanvre

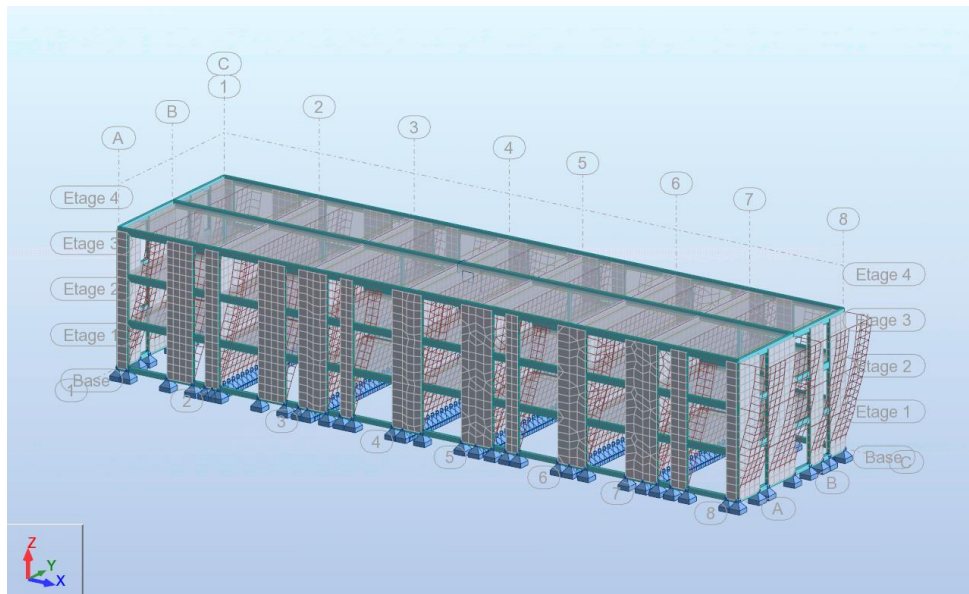
Pour des murs d'épaisseur  $e_p=30$  cm en bloc de chanvre en formulation M4, deux modes propres ont été étudiés voir le tableau (Tableau 4-2)

Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Tot.mas.UX [kg]	Tot.mas.UY [kg]
1	1,46	0,69	86,63	0,00	86,63	0,00	552268,92	548915,88
2	4,48	0,22	95,33	0,00	8,69	0,00	552268,92	548915,88

Tableau 4-2 : des modes propres principaux

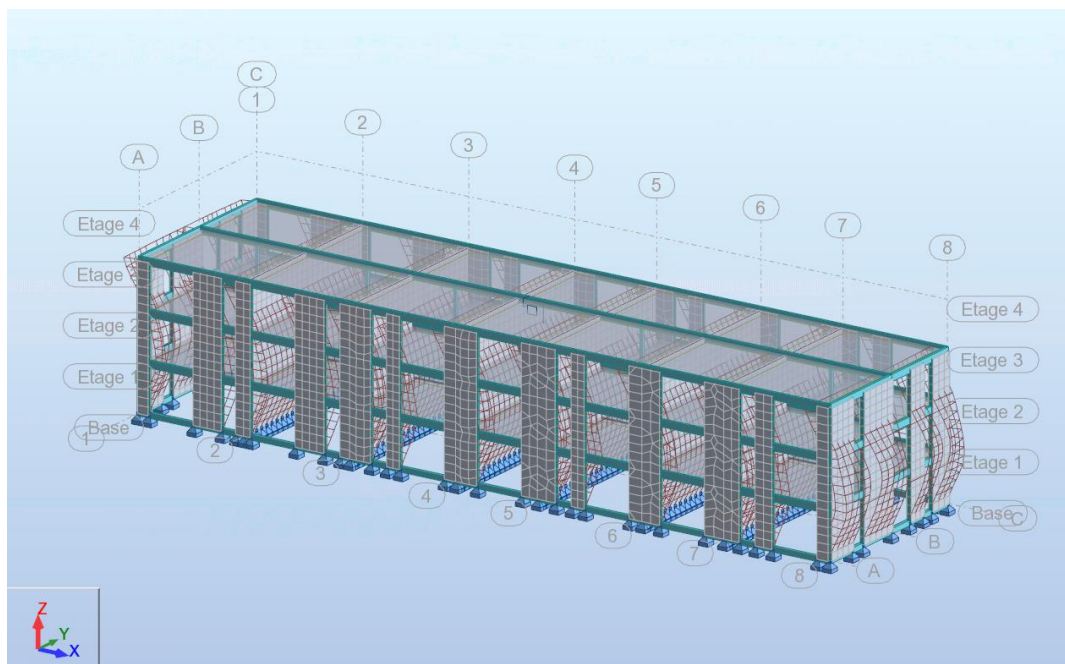
Les déformées modales calculées issues de l'analyse aux éléments finis sont données ci-dessous pour les deux premiers modes de plus basses fréquences

- Mode N° 1 :



Période = 0,69 sec  
 Direction X - Masses modales sollicitées = 86,63%  
 Direction Y - Masses modales sollicitées = 0,0%

- Mode N° 2 :



Période = 0,22 sec  
 Direction X - Masses modales sollicitées = 8,69%  
 Direction Y - Masses modales sollicitées = 0,0

#### 4.6.1.2 Evaluation des déplacements

- Effet de second ordre (§4.4.2 de l'Eurocode 8)

Description entre étage	Déplacement entre étage [cm]	Hauteur h [cm]	$P_{tot}$ [T]	$V_{tot}$ [T]	$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$	Remarque
Etage3-Etage2	0,8	280	183,50	35,09	0,015	Vérifié
Etage2-Etage1	1,3	280	370,74	53,96	0,032	Vérifié
Etage1-Fondations	1,5	280	556,78	67,92	0,044	Vérifié



- Limitation des dommages (§4.4.3 de l'Eurocode 8)

Description entre étage	Déplacement entre étage [cm]	Hauteur h [cm]	$d_r \cdot v \leq 0,005 \cdot h$ [cm]	Remarque
Etage3-Etage2	0,8	280	0,40 < 1,40	Vérifié
Etage2-Etage1	1,3	280	0,65 < 1,40	Vérifié
Etage1-Fondations	1,5	280	0,75 < 1,40	Vérifié

#### 4.7 Récapitulatifs des résultats des calculs

Le tableau (Tableau 4-3) présente les différents résultats des calculs sismiques effectués.

Type de contreventement	Epaisseur des murs [cm]	Fréquence du mode principale [Hz]	Effet de second ordre		Limitation des dommages		Contraints de compression	
			$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0,10$		$d_r \cdot v \leq 0,005 \cdot h$		$\sigma_{sd} \leq \sigma_e$	
			Sismicité modéré	Moyenne sismicité	Sismicité modéré	Moyenne sismicité	Sismicité modéré	Moyenne sismicité
Panneaux OSB	-	2,97	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié
Bloc béton chanvre M4	30cm	1,46	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié
	50cm	1,67	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié	Vérifié
Bloc béton chanvre M1	30cm	0,98	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>	Vérifié	<u>Non vérifié</u>	Vérifié	Vérifié
	50cm	1,14	Vérifié	Vérifié	Vérifié	<u>Non vérifié</u>	Vérifié	Vérifié
Chanvribloc	ep=50cm	0,75	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>	<u>Non vérifié</u>

Tableau 4-3 : Calculs sismiques effectués sur panneaux OSB et béton de Chanvre

En examinant tableau (Tableau 4-3), nous pouvons noter que :

- 1- Le contreventement latéral par des murs en béton de chanvre rend le bâtiment plus souple. Les fréquences propres des modes principaux de vibration ont diminué.
- 2- La formulation M4 satisfait les formules de vérifications de l'Eurocode 8 pour des niveaux de sismicité modérée et moyenne.
- 3- Pour le bâtiment multiétages étudié, la formulation M1 ne satisfait pas des formules de vérifications de l'Eurocode 8 pour des niveaux de sismicité modérée et moyenne. En fonction de l'architecture du bâtiment, une augmentation de nombre des murs résistants pourra augmenter la rigidité latérale et satisfaire, ainsi, la condition de limitation des dommages.
- 4- Le Chanvribloc possède des faibles caractéristiques mécaniques. En conséquence il n'est pas apte à contreventer le bâtiment multiétage dans les zones sismiques.

#### **4.8 Conclusions du chapitre**

L'exemple étudié dans ce chapitre, illustre l'éventuelle contribution des murs en bloc de béton de chanvre dans le contreventement des bâtiments en multiétages.

Cette contribution dépend, au premier lieu de l'architecture du bâtiment, et plus précisément du nombre et de l'épaisseur des murs, mais dépend aussi des caractéristiques du béton de chanvre et de sa mise en œuvre. La formulation M4 présente un meilleur comportement sous actions sismique modéré et moyenne, par rapport à la formulation M1.

Les murs en Chanvribloc à l'état actuel ne permettent pas de contreventer les bâtiments en zones sismiques modéré ou moyennes.

L'étude effectuée dans ce chapitre a porté sur la réponse élastique du bâtiment, sans tenir compte de la dissipation d'énergie au court des actions sismiques, ou en d'autres termes, sans tenir compte du facteur de comportement  $q$ , celui-ci est un facteur introduit dans les règlements parasismiques afin de réduire les forces élastiques obtenues à partir d'une analyse élastique linéaire en prenant en compte la capacité dissipative hystérétique de la structure. Il permet de dimensionner la structure sous forces sismiques d'intensité réduite.



## **Chapitre 5. Conclusions générales et perspectives**



Nous avons mené une étude expérimentale sur le comportement du béton de chanvre à la compression et au cisaillement, afin d'évaluer d'une part l'anisotropie de comportement de ce matériau et sa capacité portante et au contreventement, tout en assurant de bonnes qualités d'isolation thermique.

Les mesures de compression ont montré que ce matériau 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 de fortes déformations sans rupture brutale. Le béton de chanvre est anisotrope, même quand il est moulé industriellement par vibrations (Chanvribloc®).

Le comportement en compression du béton de chanvre varie en fonction du dosage en liant. Si le matériau contient moins de liant, en compensant ce manque de liant par un fort niveau de compression à l'état frais (Formulation M4), un comportement beaucoup plus ductile du matériau durci est obtenu, avec une phase élastique, une phase de transition, une partie plastique à faible pente (écrouissage) et une dernière partie avec une augmentation plus rapide de la contrainte (densification).

Le comportement transversal est fragile et plus rigide dans la direction du plan d'anisotropie ( $C_{//}$ ), avec une grande variabilité de comportement, tandis que le comportement est très ductile et répétable perpendiculairement au plan d'anisotropie ( $C_{\perp}$ ).

L'évolution des caractéristiques mécaniques est d'autant plus importante que le dosage en granulats est grand. Les deux formulations de béton de chanvre testées sous compression uniaxiale M1 et M4, présentent une grande capacité de déformation, pouvant aller jusqu'à 80%, sans présenter de rupture fragile. Pour un faible dosage en granulat (formulation M1), le comportement est de type ductile avec fort endommagement en fin d'essai. Pour une composition plus riche en granulats (formulation du M4), le comportement est de type ductile suivi d'un fort écrouissage avec une élévation significative de la contrainte de compression lorsque le dosage en granulat augmente.

En raison du frottement pendant le processus de moulage et de compression, un gradient de propriétés mécaniques apparaît entre la partie haute (H) et la partie basse (B) du cylindre de béton de chanvre compacté, avec le même ordre de grandeur pour M1 et M4.

La limite d'élasticité en compression orthogonale aux plans d'anisotropie ( $C_{\perp}$ ) est toujours supérieure à la résistance à la compression dans le sens parallèle ( $C_{//}$ ). La résistance d'un cylindre est proche de la résistance de son maillon le plus faible, correspondant au cube extrait de la partie basse de chaque cylindre. Ceci confirme que le frottement le long de la cellule de compactage induit une hétérogénéité significative du comportement mécanique dans la hauteur d'un même bloc cylindrique (gradient d'élasticité et de résistance).

Le module d'Young dans les deux sens de chargement a deux valeurs différentes. Ce résultat confirme l'anisotropie et le comportement effectivement isotrope transverse de ce matériau.

Les coefficients de Poisson dans deux directions ( $\nu_{//\perp}$ ) ( $\nu_{\perp//}$ ) ont été identifiés. Ils nous montrent que les formules appliquées aux paramètres élastiques d'un matériau isotrope transverse ne s'appliquent pas ici.

Il n'y a pas d'effet de longueur d'éprouvette sur la contrainte moyenne mesurée. Les valeurs de la limite d'élasticité obtenues sur des cubes (rapport d'élanement de 1) et sur des cylindres (rapport d'élanement égal à 2) sont similaires, mais que l'écroutissage plastique de la matière est considérablement amplifié avec les cubes, donc la taille des échantillons a un effet négligeable comparé à son élanement.

Concernant le cisaillement, un dispositif original de cisaillement combiné à de la compression a été développé. Il s'agit d'une boîte de cisaillement qui sollicite l'échantillon de manière proche de ce que peut subir le matériau mis en œuvre dans une structure réelle : un cisaillement pour répondre à une sollicitation de contreventement et une compression due au poids propre du bâtiment. Lors des essais, aucune rupture brutale des éprouvettes ne s'est produite sur l'ensemble des éprouvettes testées. Ces essais montrent un domaine élastique très réduit et un comportement très ductile. Le granulat végétal a une grande capacité de déformation. La réponse au cisaillement laisse penser que ce matériau a des propriétés parasismiques intéressantes.

Nous avons aussi observé que la résistance au cisaillement est corrélée à la contrainte normale de confinement, comme observé classiquement en mécanique des sols. L'observation des résultats montre que la formulation M4 donne les meilleurs résultats en résistance au cisaillement pour différentes charges de compression appliquées. Le traitement d'image via l'utilisation d'une caméra et du logiciel Aramis nous a permis d'observer l'orientation de bandes de cisaillement dans le sens des particules de chènevottes, quel que soient les formulations ou l'orientation de la contrainte normale de confinement. La déformation  $\varepsilon_{xx}$  prend une valeur moyenne quasi nulle durant une grande partie de l'essai de cisaillement. Tandis que la déformation verticale  $\varepsilon_{yy}$  varie peu pendant l'essai de cisaillement.

Pendant l'essai de cisaillement l'éprouvette a tendance à subir une rotation solide. Les valeurs de rotations  $\theta$  de l'éprouvette varient en fonction de la charge de compression appliquée et de la formulation de l'éprouvette. Pour la même formulation (M1 ou M4), la rotation prend une valeur plus élevée quand la charge de compression est plus faible. Tandis qu'elle prend une valeur plus élevée pour la formulation M1 par rapport à la formulation M4, pour une même contrainte de compression appliquée.

La connaissance de la mesure de la rotation des éprouvettes pendant l'essai de cisaillement nous a permis de tracer les « vraies » courbes ( $\tau$ - $\gamma$ ) et d'identifier les modules de cisaillement  $G_{\perp}$  du béton de chanvre. Ici nous pouvons de nouveau noter que la formulation M4 présente une valeur de  $G_{\perp}$  plus grande que la formulation M1. Les valeurs de  $G_{//}$  ont été obtenues par calculs analytiques à partir des valeurs expérimentales de modules d'Young  $E_{//}$  et coefficient de Poisson  $\nu_{//}$ . Nous pouvons remarquer que la valeur  $G_{//}$  pour la formulation M4 est plus grande que celle de la formulation M1.

Le comportement en cisaillement de blocs de béton de chanvre est très ductile. Ce comportement est intéressant pour le contreventement de murs remplis de béton de chanvre. Un exemple étudié dans ce mémoire illustre l'éventuelle contribution des murs en bloc de béton de chanvre dans le contreventement des bâtiments en multiétages.

Cette contribution dépend, au premier lieu de l'architecture du bâtiment, et plus précisément du nombre et de l'épaisseur des murs, mais dépend aussi des caractéristiques du béton de chanvre et de sa mise en œuvre. La formulation M4 présente un meilleur comportement sous actions sismique modéré et moyenne, par rapport à la formulation M1.

Les murs en Chanvribloc à l'état actuel ne permettent pas de contreventer les bâtiments en zones sismiques modéré ou moyennes.

L'étude effectuée a porté sur la réponse élastique du bâtiment, sans tenir compte de la dissipation d'énergie au court des actions sismiques, ou en d'autres termes, sans tenir compte du facteur de comportement  $q$ . Celui-ci est un facteur introduit dans les règlements parasismiques afin de réduire les forces élastiques obtenues à partir d'une analyse élastique linéaire en prenant en compte la capacité dissipative hystérétique de la structure. Il permet de dimensionner la structure sous forces sismiques d'intensité réduite.

## PERSPECTIVES

1- En raison du frottement pendant le processus de moulage et de compression, la paroi de la cellule de compression de cylindre porte une partie de la charge de compression, donc un gradient de propriétés mécaniques apparaît entre la partie supérieure et la partie inférieure du cylindre de béton de chanvre compacté, avec le même ordre de grandeur pour M1 et M4. La pression subie par le mélange est plus faible dans la partie inférieure que dans la partie supérieure du cylindre. Il en résulte un état inférieur de compactage dans la partie inférieure, caractérisé par une densité inférieure à l'état frais comme à l'état durci. Ce processus de compactage doit être techniquement amélioré afin de minimiser ce problème et d'assurer une meilleure homogénéité des éléments préfabriqués.

2- Le dispositif de cisaillement développé dans ces travaux a permis de mesurer les paramètres élastiques de cisaillement. Ce dispositif pourrait être amélioré en confinant les deux faces actuellement libres des cubes testés, afin d'éviter les ruptures hors plan des éprouvettes. Par ailleurs, ce dispositif devra permettre de tester d'autre type de matériaux bio-sourcés (chaux/chanvre projeté, terre/chanvre, terres allégées). Des essais complémentaires devront être menés sur des structures réelles afin d'avancer sur la compréhension et la modélisation de l'apport structurel de ce type de matériaux dits « de remplissage ». Notamment, le cas des blocs maçonnés (type Chanvribloc®) est un cas à part, pour lequel les joints entre les blocs vont jouer



un rôle particulier, dépendant du type de joint, des compositions, des matériaux et des contrastes de phases (caractéristiques mécaniques).

Dans le cadre d'essais sur des murs en bloc de chanvre, chaux-chanvre banché et chaux/chanvre projeté à l'échelle réelle, il faudra déterminer plus précisément leur comportement sous actions cycliques : dissipation d'énergie, fissurations, endommagement, résistance ultime, déformabilité et effet du second ordre. Ces essais pourraient aboutir à une loi de comportement globale pour ce type de murs en bloc de chanvre.

3- Afin d'évaluer le facteur de comportement « q » pour les bâtiments contreventés par des murs en bloc de béton de chanvre, il est indispensable de réaliser des études sur le comportement du béton de chanvre sous chargement cyclique.

Ces études pourraient décrire les boucles d'hystérésis et permettre de déduire les données suivantes :

- Capacité de dissipation d'énergie.
- Accumulation des dommages et fatigue oligocyclique.
- Etablir une éventuelle loi du comportement cyclique.

# Références



- (ADEME). (2009). Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.
- Abot, A. (2010). *Caractérisation des fibres longues de chanvre (Cannabis sativa) en vue de leurs utilisations dans des matériaux composites*. Thèse de doctorat - Université de Poitiers.
- ADEME. (2011). Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.
- Amziane, S., & Arnaud, L. (2013). *Bio-aggregate-based Building Materials*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- Arnaud, L. (2000). Mechanical and thermal properties of hemp mortars and wools: experimental and theoretical approaches. In *Bioresource Hemp 2000 & other fibre crops* (p. 10). Wolfsburg: 13-16 Septembre.
- Arnaud, L., Cerezo, V., & Samri, D. (2006). Global approach for the design of building material containing lime and vegetable particles. In *The Sixth International Symposium on Cement and Concrete, Xi'an*, (pp. 1261–1265).
- Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials, Vol.28*, P.50–56.
- Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., & Gibson, L. J. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*. Elsevier.
- Besson, J., Cailletaud, G., Chaboche, J., & Forest, S. (2001). *Mécanique non linéaire des matériaux*. Hermès Science.
- Bouloc, P., Allegret, S., & Laurent, A. (2006). *Le chanvre industriel: production et utilisations*. Paris : France Agricole.
- Boutin, M., Flamin, C., Quinton, S., & Gosse, G. (2006). *Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie*. France: Ministère de l'agriculture et de la pêche.
- Bruijn, P. de, Jeppsson, K., Sandin, K., & Nilsson, C. (2009). Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. *Science Direct, Vol.103*, P. 474–479.
- Bütschi, P., Deschenaux, C., Miao, B., & Srivastava, N. (2004). *Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction*. Thèse de doctorat, Moncton University, Moncton, Canada.
- Cérézo. (n.d.). *Propriétés mécaniques , thermiques et acoustiques d ' un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*.
- Cérézo, V. (2005). *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de doctorat - Ecole Nationale des travaux publics de l'état- Lyon.
- Černý, R., Kunca, A., & Tydlitát, V. (2006). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials, Vol.20*, P.849–857.

- Ceyte, I. (2008). *Béton de chanvre, définition des caractéristiques mécaniques de la chènevotte*. Travail de Fin d'Études- Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin.
- Couedel, I. (1998). *Le béton de chanvre comme matériau de construction, première approche mécanique du béton de chanvre*. rapport de DEA. DEA de Génie Civil. Ecole doctorale MEGA, Vaulx-en-Velin : ENTPE,.
- Deshpande, V. S., & Fleck, N. A. (2000). Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.48, P.1253–1283.
- Eires, R., Nunes, J., Figueiro, R., Jalali, S., & Camões, A. (2006). New eco-friendly hybrid composite materials for Civil construction. European Conference on Composite Materials. Biarritz.
- Elfordy, S., Lucas, F., & Tancret, F. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“ hempcrete ”) manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, Vol.22, P.2116–2123.
- Evrard, A. (2002). *L'utilisation du chanvre dans la construction*. Novembre, Disponible sur : <<http://www.chanvre-info.ch/info/>>.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge university press.
- Gourlay, E., & Arnaud, L. (2010). *Comportement hygrothermique des murs de béton de chanvre*. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat – Université de Lyon.
- Green, R. (1972). A plasticity theory for porous solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.14, P. 215–224.
- Lanier, E., Beherec, O., & Boyeux, B. (2008). Impacts environnementaux et sanitaires des matériaux chanvre. Construire En Chanvre, Séminaire Scientifique.
- Lanos, C., Collet, F., Lenain, G., & Hustache, Y. (2013). Formulation and implementati. In *Bio-aggregate-based Building Materials (eds S. Amziane, L. Arnaud and N. Challamel)*,. London/Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Lawrence, R. M. H., Mays, T. J., Walker, P., & Ayala, D. D. (2006). Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, Vol.444, P.179–189.
- Lemaitre, J., Chaboche, J.-L., Benallal, A., & Desmorat, R. (2009). *Mécanique des matériaux solides - 3ème édition*. Paris: DUNOD.
- Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources*. Thèse de Doctorat - Université Toulouse III.
- Munoz, P., & Pipet, D. (2013). Plant-Based Concretes in Structures: Structural Aspect – Addition of a Wooden Support to Absorb the Strain. In *Bio-aggregate-based Building Materials (eds S. Amziane, L. Arnaud and N. Challamel)* (pp. 297–319). John Wiley & Sons.

- Nguyen. (2010). *contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*. Thèse de Doctorat - Université de Bretagne Sud.
- Nguyen, T., Picandet, V., Amziane, S., & Baley, C. (2009). 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*, P.1039–1050.
- Nguyen, T. T., Vincen, P., Lecompte, T., Carre, P., Amziane, S., & Baley, C. (2009). Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol.13*, P.1039–1050.
- Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.43*, P.1837–1849.
- Nozahic, V., Amziane, S., Torrent, G., Saïdi, K., & Baynast, H. De. (2012). Cement & Concrete Composites Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice – lime binder. *Cement and Concrete Composites, Vol.34*, P.231–241.
- Pham, T. H. (2014). *Modélisation multi-échelles des propriétés thermiques et élastiques de composites*. Université de Bretagne Sud.
- Picandet, V. (2013). Caractérisation des granulats d'origine végétale. In *les bétons de granulats d'origine végétale" application au béton de chanvre (eds S. Amziane, L. Arnaud )*. (Lavoisier, pp. 45–93). Paris.
- Pretot, S., Collet, F., & Garnier, C. (2014). Life cycle assessment of a hemp concrete wall: Impact of thickness and coating. *Building and Environment, Vol.72*, P.223–231.
- Reynouard, J.M., & Pijaudier Cabot, G. (2005) Comportement mécanique du béton ; Traité MIM, série Matériaux de construction ISBN : 9782746209800.
- Tran Le, A. D., Maalouf, C., Mai, T. H., Wurtz, E., & Collet, F. (2010). Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. *Energy & Buildings, Vol.42*, P.1797–1806.
- Tronet. (2013). *contribution a l'étude des materiaux chaux-chanvre : Influence du compactage sur les proprietes*. Thèse de Doctorat - Université de Bretagne Sud.
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., & Baley, C. (2014). Study of lime hemp composite precasting by compaction of fresh mix — An instrumented die to measure friction and stress state. *Powder Technology, Vol.258*, P.285–296.
- Tronet, P., Lecompte, T., Picandet, V., & Baley, C. (2016). Study of lime hemp concrete (LHC)–mix design, casting Process and mechanical behaviour. *Cement and Concrete Composites, Vol.67*, P.60–72.
- Walker, R., Pavia, S., & Mitchell, R. (2014). Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. *Construction and Building Materials, Vol.61*, P.340–348.
- Projet 28 logements en bois « Le Lain » à Ploeren (56880), Maître d'Ouvrage : Bretagne Sud

Habitat, Architecte Gilles RIALLAND & ASSOCIES, Entreprise I.C. BOIS (56460 Sérent)

CSTB Panneaux KLH, Avis Technique de référence 3+5/12-731

NF EN 1991, Eurocode 1 : Actions sur les structures.

NF EN 1992, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.

NF EN 1993, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

NF EN 1994, Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

NF EN 1995, Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

NF EN 1996, Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie.

NF EN 1997, Eurocode 7 : Calcul géotechnique.

NF EN 1998, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes.

NF EN 1999, Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.