

330/FT.01/TESIS/11/2012



**UNIVERSITAS
INDONESIA**



**STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU “BETON DE
CHANVRE” TERHADAP PEMBEBANAN DINAMIK**

TESIS

**ARMADA
1006787911**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2012**

330/FT.01/TESIS/11/2012



**UNIVERSITAS
INDONESIA**



**STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU “BETON DE
CHANVRE” TERHADAP PEMBEBANAN DINAMIK**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

**ARMADA
1006787911**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
DEPOK
JULI 2012**

ii

Universitas Indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya sendiri, dan semua sumber baik yang kutip maupun dirujuk telah dinyatakan dengan benar

Nama : Armada
NPM : 1006787911
Tanda tangan : 
Tanggal : 20 Juli 2012



GAZETTE OF ENDORSEMENT

This report of apprenticeship is submitted by:

Name : Armada
Student Number : 1006787911
Study Program : Civil Engineering
Title : Etude du comportement dynamique du béton de chanvre

This report of apprenticeship has been officially supervised and finally examined by examiners authorized by Mrch. Génie mécanique et génie civil, Université de Bretagne Sud on June 26th 2012.

Board of examiners:

Supervisor : Mr. Thibaut Lecompte

Mr. Vincent Grolleau

Examiner :

Mr. Vincent Picandet

Mr. Julien Férec

Mr. Vincent Keryvin



Legalized by

The Director Of Civil Engineering Department, Faculty Of Engineering,
University Of Indonesia



Prof. Dr. Ir Irwan Katili, DEA.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia dan nikmat-Nya sehingga penulisan Tesis yang berjudul Studi Ekperimental Perilaku “Beton de Chanvre” Terhadap Pembeban Dinamik dapat terselesaikan dengan baik.

Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Departemen Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari semua perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Professeur Thibaut LECOMPTE dan Professeur Vincent GROLLEAU di Université de Bretagne Sud sebagai pembimbing dalam penulisan Tesis ini.
2. Seluruh Dosen Master Recherche Génie mécanique et génie civil Université de Bretagne Sud yang telah mendidik penulis selama 1 tahun dalam program double degree Indonesia Perancis (DDIP).
3. Dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang sudah mendidik penulis.
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan material dan moral.
5. Istri dan anak-anak tersayang yang sabar dan selalu memotivasi selama menempuh pendidikan program master DDIP dan
6. Semua pihak yang sudah membantu dengan baik penulisan tesis ini

Saya menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih terdapat kesalahan karena keterbatasan pengetahuan penulis. Oleh karena itu dimohon saran untuk perbaikan tesis ini.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai Civitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Armada
NPM : 1006787911
Program Studi : Sipil Struktur
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui Universitas Indonesia untuk memberikan kepada **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :
Studi Experimental Perilaku Béton de Chanvre Terhadap Pembebanan Dinamik

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas Royalti Non eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 20 Juli 2012

Yang menyatakan



Armada

ABSTRAK

Nama : Armada
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Tesis : Studi Ekperimental Perilaku Beton de Chanvre Terhadap Pembebanan Dinamik.

Beton de chanvre merupakan material yang dibentuk dengan mencampurkan serpihan chenevotte (limbah pengolahan chanvre/*cannabis sativa*) dengan kapur dan air. Penelitian yang sudah dilakukan dan dipublikasikan saat ini berkaitan dengan keunggulannya sebagai bahan isolasi termik dan akustik, namun belum ada laporan tentang penyelidikan perilaku beton de chanvre terhadap pembebanan dinamik.

Penelitian perilaku beton de chanvre terhadap pengaruh beban dinamik dilakukan dengan menggunakan uji Bar Hopkinson dengan batang viscoelastik (Plastik) yang memiliki impedansi terdekat terhadap beton de chanvre.

Secara umum hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan terhadap beban dinamik beton de chanvre lebih tinggi daripada terhadap beban kuasi-statik. Kuat tekan meningkat sehubungan dengan meningkatnya gaya tekan pemadatan saat pencetakan benda uji, arah pembebanan dinamik yang tegak lurus terhadap arah pemadatan menunjukkan adanya perbedaan kuat tekan dinamik, serta pengaruh pengeringan absolute terhadap benda uji dapat juga menurunkan kuat tekan dinamik.

Kata kunci : beton de chanvre, perilaku mekanik, kuasi-statik, dinamik, Bar Hopkinson.

ABSTRACT

Name : Armada
Study Program : Civil Engineering
Title : Study Experimental the Behaviour of Hemp Concrete Under Dynamics Loading

Concrete is a mixture of particle of hemp (plant aggregate), binder and water. In the literature, no studies concerning the behaviour of hemp concrete under dynamic loading is available to date. The behaviour of material under dynamic loading test can experiment by method Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) by using of viscous-elastic bar (plastic) with impedance close to that of hemp concrete.

In general, we found that the mechanical strength of hemp concrete under dynamic loading is higher than that under quasi-static loading. The compressive strength will increase same with force of compaction. The experiment result shows that the dynamic strength under loading perpendicular to the direction of compaction is lower than the parallel end effect of drying may also reduce the strain compressive strength.

Key words: hemp concrete, mechanical behaviour, quasi-static, dynamic, Hopkinson bar, compressive strength, loading direction, drying

RESUME

Nom : Armada
Parcours : Génie Civil
Title : Etude du Comportement Dynamique du Béton de chanvre

Le béton de chanvre est un mélange de chènevotte (granulat d'origine végétale), de liant et d'eau. Dans la littérature, aucune étude concernant le comportement du béton de chanvre sous une sollicitation dynamique n'est à ce jour disponible. L'étude du comportement sous chargement dynamique est réalisée par essai Split Hopkinson Pressure Barre (SHPB) en utilisant la barre viscoélastique en Nylon dont l'impédance est proche de celle du béton de chanvre.

De manière générale, nous avons constaté que la résistance mécanique du béton de chanvre sous chargement dynamique est supérieure à celle sous chargement quasi-statique. La résistance à la compression avec l'augmentation de la force de compactage. Le résultat de l'essai dynamique montre que la résistance mécanique sous chargement perpendiculaire au sens de compactage est plus faible que parallèle et le séchage peut aussi diminuer la résistance en compression.

Mot clés : béton de chanvre, comportement mécanique, quasi-statique, dynamique, barre de Hopkinson

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
RESUME.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1 Généralités sur le Béton de chanvre.....	1
1.1.1 Composition du Béton de chanvre.....	3
a. La Chènevotte.....	4
b. Le Liant.....	10
1.1.2 Fabrication du béton de chanvre.....	10
a. Formulation du béton de chanvre.....	10
b. Malaxage du béton de chanvre.....	11
c. Compactage du béton de chanvre.....	13
1.2 Caractérisation mécanique du Béton de chanvre	15
1.2.1 Comportement en Compression.....	15
1.2.2 Comportement en Flexion.....	18
1.3 Etude de la caractérisation dynamique aux Barre de Hopkinson.....	20
1.3.1 Présentation de L'essai barre de Hopkinson.....	20
1.3.2 L'Essai de SHPB en Compression.....	21
1.3.3 Les barres de Hopkinson Viscoélastiques	24
1.3.4 Propagation des ondes de barre dans un solide viscoélastique.....	25
1.3.5 L'Essai de SHPB en Flexion.....	26
1.4 Bilan.....	28

CHAPITRE 2 PROCESSUS DE MISE EN ŒUVRE ET CARACTERISATION MECANIQUE DU BETON DE CHANVRE.....	29
2.1 Formulation des composants du béton de chanvre.....	29
2.2 Le processus de mise en œuvre du béton de chanvre.....	30
2.2.1 La Préparation des moules les éprouvettes.....	30
2.2.2 Malaxage.....	33
2.2.3 Moulage des éprouvettes.....	33
2.3 Stockage et observe l'évolution le poids & géométrie des éprouvette.....	
2.4 L'essai mécanique en compression.....	35
2.4.1 La préparation l'essai mécanique.....	35
a. Surfaçage	35
b. Dispositif des l'essai.....	36
c. Mise en place des essais.....	36
2.4.2 Les processus de l'essai.....	37
2.4.3 Les résultats (la caractérisation de mécanique du béton de chanvre en compression).....	43
2.5 Bilan.....	43
CHAPITRE 3 L'ESSAI DYNAMIQUE SUR DU BETON DE CHANVRE AVEC DE DISPOSITIF DE BARRE D'HOPKINSON.....	45
3.1 Préparation des essais dynamiques à la Barre d'Hopkinson.....	46
3.1.1 Dispositif de l'essai dynamique barre d'hopkinson.....	46
3.1.2 Préparation des échantillons.....	47
3.2 Mise en place d'essais dynamiques.....	51
3.2.1 Mode opératoire de l'essai barre d'Hopkinson.....	51
3.2.2 Dépouillement du résultat des l'essai en utilisant logiciel DAVID.....	51
3.2.3 Dépouillement du résultat des l'essai en utilisant logiciel ARAMIS.....	52
3.3 Les résultats.....	53
3.3.1 La sensibilité a la vitesse de déformation du béton de chanvre.....	54
3.3.2 L'effet du compactage	57
3.3.3 L'effet de séchage béton de chanvre.....	58
3.3.4 L'effet de la direction de sollicitation	59
CHAPITRE 4 CONCLUSION ET SUGGESTION.....	62
4.1 Conclusion.....	62
4.2 Suggestion.....	62
BIBLIOGRAPHIE.....	64
ANNEXES.....	68

DAFTAR GAMBAR

Figure 1.1	Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment.....	1
Figure 1.2	L'utilisation béton de chanvre en construction.....	4
Figure 1.3	Les granulats étudiés.....	5
Figure 1.4	Représentation schématique du traitement des tiges de chanvre.....	5
Figure 1.5	Graphique Analyse granulométrique suivant la longueur des particules.....	6
Figure 1.6	Comportement en compression à 28 jours avec différents liants.....	8
Figure 1.7	La Diagramme des les processus malaxage béton de chanvre qui a été réalisé par Cerezo.....	13
Figure 1.8	La Diagramme des les processus malaxage béton de chanvre qui a été réalisé par Cerezo et modifié par Fidelius.....	13
Figure 1.9	Schéma du dispositif de compactage éprouvette.....	14
Figure 1.10	Influence du compactage sur le comportement mécanique en compression à 28 jours.....	15
Figure 1.11	La comparaison résistance en compression béton de chanvre avec différent liant.....	15
Figure 1.12	Evolution du champ de deformation longitudinal visualise par le système de mesure optique ARAMIS et rupture du beton de chanvre.....	16
Figure 1.13	Schéma de la courbe contrainte – déformation (a) Caractéristiques mécaniques extraites à partir de la courbe contrainte- déformation du béton de chanvre.....	17
Figure 1.14	Comportement mécanique en compression à 28 jours d'éprouvettes de même composition et masse volumique initiale, confectionnées avec différents liants.....	17
Figure 1.15	Comportement en compression à 28 jours des quatre bétons de chanvre formulés.....	18
Figure 1.16	Caractéristiques mécaniques des différentes compositions de bétons de chanvre élaborées.....	18
Figure 1.17	Schéma et montage de l'essai de flexion trois points sur une plaque de béton de chanvre.....	19
Figure 1.18	Installation barre de hopkinson.....	21
Figure 1.19	Schéma du principe de l'essai Hopkinson.....	22
Figure 1.20	Equilibre de L'échantillon.....	22

Figure 1.21 Ondes mesures lors d'un essai sur une mousse syntactique ($V_{impact} = 7.6 \text{ m.s}^{-1}$).....	24
Figure 1.22 Ondes mesurées lors d'un essai sur une mousse de polypropylène...	27
Figure 2.1 Moule en PVC pour réaliser l'éprouvette 100 mm de diamètre, 200 mm de hauteur.....	31
Figure 2.2 Moulage en cartons 2,1 litre et tuyau de compacteur.....	31
Figure 2.3 Moule en acier pour réaliser les éprouvettes M_4 (fort compactage)....	35
Figure 2.4 Malaxeur à béton hydraulique de 75 litres (Couvrot) à axe vertical (3 bras).....	35
Figure 2.5 Evolution géométrique des éprouvettes M_2 et M_{2mod}	34
Figure 2.6 Stockage l'éprouvette M_4	34
Figure 2.7 Graphiques l'évolution de poids.....	35
Figure 2.8 Dispositif de surfaçage.....	36
Figure 2.9 Positionnement d'un extensomètre.....	36
Figure 2.10 Machine Quatre colonnes Zwick HB 250.....	37
Figure 2.11 Courbe contrainte – déformation l'éprouvette M_{2mod}	37
Figure 2.12 Eprouvette M_{2mod} en fin d'essai de compression simple.....	38
Figure 2.13 Description l'éprouvettes M_{2mod}	38
Figure 2.14 Courbe contrainte-déformation de l'essai de compression quasi- statique sur le béton de chanvre M_2	39
Figure 2.15 Eprouvette M_2 en fin de l'essai de compression.....	40
Figure 2.16 Courbe contrainte-déformation de l'essai de compression quasi-statique sur le béton de chanvre M_4	40
Figure 2.17 Le module d'Young béton de chanvre chaque type formulation.....	41
Figure 2.18 Courbe contraintes (Mpa) en fonction déformation radial (%) et axial (log) formulation M_{2mod} (a), formulation M_2 et M_4 (b)....	42
Figure 2.19 Description le différent contrainte chaque type béton de chanvre.....	42
Figure 2.20 Courbe contrainte-déformation comparaison.....	43
Figure 3.1 Le dispositif Barre de Hopkinson (LimatB).....	45
Figure 3.2 Moules en PVC pour réaliser l'échantillon essai dynamique M_{2mod} ...	44
Figure 3.3 Machines pour couper l'éprouvette.....	49
Figure 3.4 Les dispositifs d'usinage.....	49
Figure 3.5 Position des échantillons avant usinage.....	49
Figure 3.6 La peinture de l'échantillon.....	50

Figure 3.7	Visualisation le résultat de dépouillement par logiciel DAVID.....	52
Figure 3.8	Courbe contraintes-déformation, essais de répétabilité sur les échantillons M2 (a), M2R (b), M4 (c), M4R (d).....	54
Figure 3.9	Courbe contraintes-déformation l'essai Quasi statique comparaisons avec l'essai dynamique de l'échantillon M2 (a), M2M (b) et M4 (c).....	55
Figure 3.10	Comparaisons contrainte moyenne résistance sous chargement quasi-statique et dynamique à la déformation 5%.....	56
Figure 3.11	Courbe contrainte déformation sous chargement dynamique, (a) M2 et M4 (b) M2M.....	57
Figure 3.12	L'évolution de humidité au cours du temps sous température constants 115°C échantillon M2.....	58
Figure 3.13	Comparaison des courbes contraintes déformation entre M2 avec M2E (a), M2R avec M2RE.....	59
Figure 3.14	Description l'échantillon qui se fait en carottage axial et radial.....	60
Figure 3.15	Courbe contraintes-déformation d l'essai dynamique comparaison entre l'échantillon carottage axial et radial M2 (a), M4 (b).....	60

DAFTAR TABEL

Tableau 1.1	Des teneurs en eau de Chènevotte.....	7
Tableau 1.2	Composition chimique et propriétés du liant Tradical PF70.....	9
Tableau 1.3	Dosage pour différentes applications du béton de chanvre.....	10
Tableau 1.4	Récapitulation des compositions réalisées selon les rapports massiques considérés et les dosages (kg/m^3) équivalents.....	12
Tableau 1.5	Compositions réalisées selon les dosages (kg/m^3) et les rapports massiques considérés par Tronet.....	12
Tableau 1.8	Résistance à la rupture en flexion des compositions testées.....	19
Tableau 1.9	Impédance de différents matériaux.....	25
Tableau 2.10	Récapitulatif des les formulations M2, M2 _{Mod} , et M4 pour 1 m ³ béton du chanvre.....	30
Tableau 3.1	Propriétés des barres Nylon.....	46
Tableau 3.2	Caractéristiques des éprouvettes pour les essais dynamiques.....	50

DAFTAR LAMPIRAN

ANNEXE 1 : Données des échantillons de l'essai barre d'Hopkinsons.....	67
ANNEXE 2 : Les Etapes Dans L'essai Barre Hopkinson.....	68
ANNEXE 3 : Données des échantillons d'essais de répétabilité.....	71
ANNEXE 4 : Courbe déformation en fonction du temps, dépouillement par ARAMIS et DAVID (jauge).....	72



CHAPITRE 1

INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Plusieurs raisons poussent les chercheurs à étudier des matériaux alternatifs pour la construction : raisons économiques, santé, environnement et énergie. Les matériaux est considérés comme satisfaisant à ces critères sont souvent appelés « écomatériaux ». Un écomatériau est un matériau de construction qui répond aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction performances techniques et fonctionnelles, qualité architecturales, durabilité, sécurité, facilité d'entretien, résistance au feu, à la chaleur, mais aussi à des critères environnementaux.

L'utilisation des matériaux à base de produits végétaux a les avantages suivants (Tran Le, 2010):

- Les ressources abondantes et renouvelables: Les végétaux se renouvellent selon la saison et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources (charbon, pétrole, gaz) seront épuisées d'ici quelques décennies.
- Faible énergie grise : L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination en fin de vie. La figure 1.1 compare l'énergie grise liée à plusieurs matériaux conventionnels du génie civil.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.

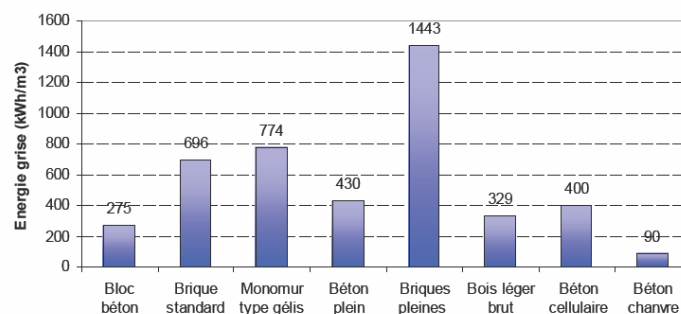


Figure 1.1. Energie grise des matériaux utilisés dans le bâtiment (MAISON.com).

Le béton de chanvre est l'un de ces matériaux. L'utilisation du chanvre en construction présente un bon potentiel car les plantations de chanvre se développent partout dans le monde (et plus particulièrement en Europe). Le Chanvre est considéré comme un matériau respectueux de l'environnement grâce à ses propriétés agronomiques : peu vulnérable aux rongeurs et aux insectes, amélioration du sol, faible dépense énergétique pour sa production, bilan CO₂ favorable et pas de problème de gestion de fin de vie/recyclable.

La tige de la plante contient deux composants principaux : des fibres sur la périphérie de la tige, et une partie plus poreuse au centre de la tige, qui donnera la chènevotte après broyage et défibrage. Les fibres sont habituellement utilisées en papeterie, pour la réalisation de textile, tapis ou pour le renforcement de polymères. La chènevotte est actuellement peu valorisée (litières pour reptiles, pour chevaux...) et le bâtiment est une voie d'utilisation très intéressante pour les coopératives et la filière agricoles. Parmi les matériaux à base végétale à l'étude pour la construction, le chanvre tient une place primordiale grâce à plusieurs avantages : faible masse volumique, bon isolant phonique, renouvellement permanent, bonne régulation hygrométrique, bilans énergétique, écologique très favorables et grande disponibilité en France. Tran Le (2010) explique que l'utilisation du béton de chanvre est de plus en plus recommandée et conseillée pour la construction écologique sachant que son énergie grise est faible par rapport à la plupart des matériaux de construction. Les ACV (Analyse du cycle de vie) menées sur les mélanges chaux/chanvre montrent que le bilan total profite principalement d'un effet de synergie entre le stockage de 30kg de CO₂ par m³ de béton de chanvre-chaux mis en œuvre, en conjonction avec des émissions de CO₂ liées au chauffage/refroidissement du bâtiment très réduites (Minet & Evrard, 2007).

Le début de l'utilisation de la chènevotte pour la confection de béton léger a été initié 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 Sein (Bouloc, 2006). Les procédés modernes de fabrication et l'amélioration des connaissances de leurs comportements mécaniques et physiques peuvent contribuer à l'amélioration de leurs performances. Le comportement mécanique du béton de

chanvre est particulier : très ductile et peu rigide. Ce comportement, déjà relativement bien étudié, peut le pénaliser vis-à-vis d'autres matériaux structurels comme les parpaings et la brique. Par contre, ces propriétés particulières devraient être un atout d'un point de vue dynamique, notamment pour son utilisation dans les zones sismiques. Actuellement, aucune donnée sur le comportement dynamique du béton de chanvre n'existe. L'objet de ce stage est donc de travailler sur le comportement dynamique du béton de chanvre. Cette étude bibliographique présente dans une première partie les résultats récents obtenus sur le béton de chanvre. La seconde partie traite des aspects dynamiques et des moyens de caractérisation que nous utiliserons au cours du stage.

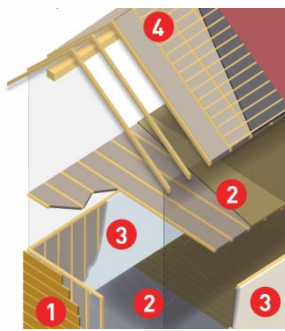
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralités sur le béton de chanvre

En générale le béton et le mortier de chanvre sont obtenus en mélangeant la chènevotte avec un liant à base de chaux et d'eau. La variation des proportions entre la chènevotte et le liant permettent d'obtenir des matériaux ayant différentes caractéristiques mécaniques, thermiques et acoustiques, couvrant ainsi plusieurs domaines d'applications dans la construction : chapes d'égalisation sur plancher, dalles de béton léger, remplissage ou doublage d'ossature bois, murs banchés, blocs préfabriqués, etc. Les performances mécaniques et thermiques sont directement liées aux dosages de chaux. Plus la dose de chaux sera importante, plus la résistance mécanique augmentera et plus faible sera la résistance thermique. Plus la chaux sera hydraulique, plus la résistance mécanique sera importante et le temps séchage court. La prise dans la masse sera plus aléatoire et le mur sera moins respirant et isolant (Fruchard).

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

Figure 1.2 illustre l'utilisation béton de chanvre en construction.



1. Murs ossature bois Colombages
2. Chapes isolantes
3. Enduit à caractère isolant
4. Mortier en isolation de toiture

Figure 1.2. L'utilisation béton de chanvre en construction (tradical édition 2008)

1.1.1 Composition du Béton de Chanvre

Le béton de chanvre fait partie de la famille des bétons de bois. C'est-à-dire que c'est un matériau composite constitué d'un liant minéral et de particules végétales qui remplacent les granulats traditionnels. Dans le béton de chanvre, les particules végétales s'appellent de la chènevotte (partie boisée de la tige de chanvre) et le liant minéral est généralement de la chaux (en partie aérienne et en partie hydraulique).

a. La Chènevotte

La chènevotte dans le béton de chanvre se substitue aux granulats classiques des bétons. La chènevotte est la partie ligneuse qui représente 50% de la tige. Elle provient du défibrage mécanique des tiges de chanvre. Cette matière se présente sous la forme de particules cellulosiques de 1.0 à 2.5 cm de long. Les particules de chènevotte ont une forme parallélépipédique. Ce bois de chanvre est pour l'instant principalement utilisé en tant que litière pour animaux grâce à ses capacités d'absorption (Environ 10 fois plus que la paille). La chènevotte absorbe jusqu'à 400% de son poids en eau (Fidelius, 2008).

L'utilisation habituelle de la chènevotte dans la construction consiste à la mélanger avec des liants minéraux pour la réalisation de tous types de maçonnerie non porteuse telles que des chapes ou dalles isolantes, banchage sur une structure porteuse en bois, restauration de maisons à colombages ou isolation de toiture. En Bretagne les fournisseurs les plus connus sont Chanvribat et Terrachanvre. Les liants utilisés sont généralement de la chaux aérienne ou/et hydraulique.

Nguyen (2010), dans ses études utilise deux types de granulats: la chènevotte pure et la chènevotte fibrée. La chènevotte pure est obtenue par défibrage total de la tige du chanvre (séparation totale des fibres situées en périphérie et de la partie boisée centrale). Le produit final est alors constitué des particules boisées de différentes tailles (figure 1.3).

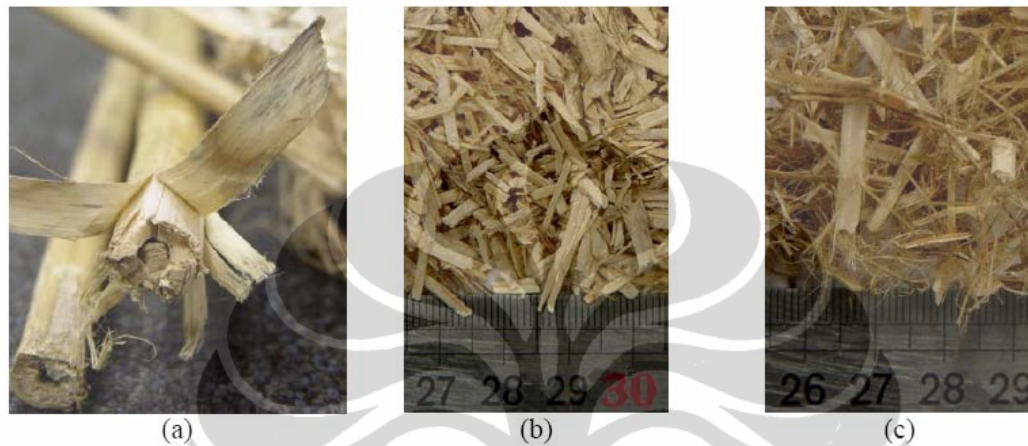


Figure 1.3 : Les granulats étudiés. (a) La tige du chanvre. (b) Chènevotte pure (CP). (c) Chènevotte fibrée (CF) (Nguyen, 2010)

Figure 1.4 suivant illustre les processus de fabrication de Chanvre et leurs co-produits.

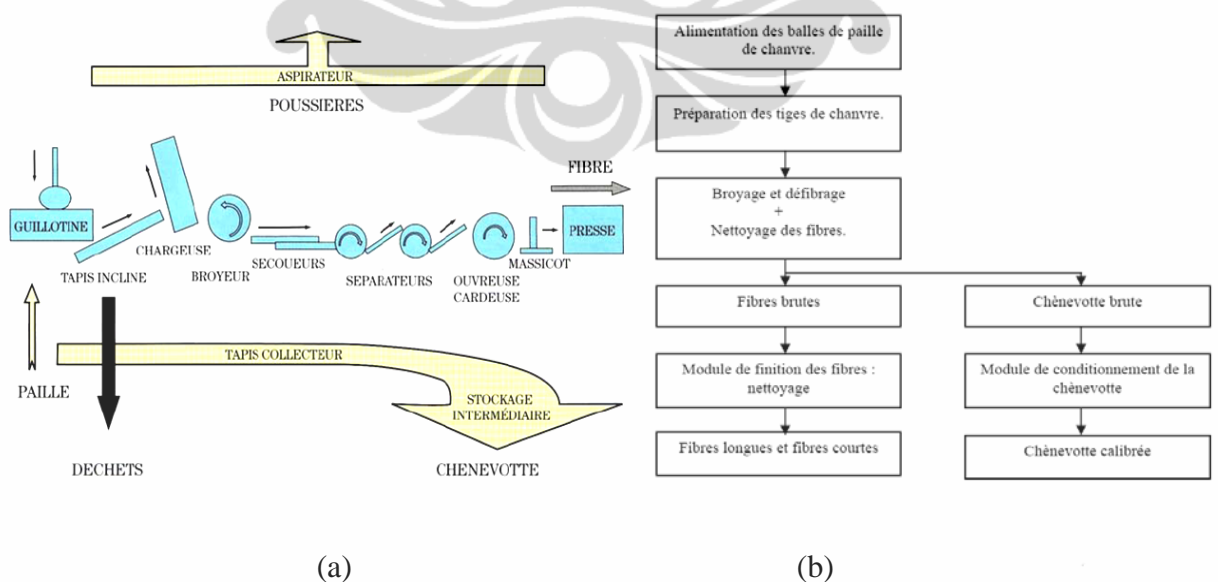


Figure 1.4. (a) Représentation schématique du traitement des tiges de chanvre (Bouloc et al,2006). (b) Diagramme simplifié du processus de fabrication de la chènevotte (Fidelius, 2008)

L'influence des fibres sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de chanvre était très faible (Nguyen, 2010). Dans notre étude, nous n'utiliserons que de la chènevotte totalement défibrée.

L'une des caractéristiques importantes de la chènevotte est sa granulométrie. L'analyse granulométrique peut être réalisée de deux manières différentes. L'une, la plus couramment utilisée, par tamisage mécanique et l'autre par analyse d'image. En analyse d'image, Nguyen (2010) a analysé ses échantillons avec Image Tool. Les paramètres géométriques intéressants sont la longueur, la largeur, la surface, l'élongation, le périmètre, et le nombre de particules contenues dans l'échantillon. La figure 1.5 donne trois exemples de compositions granulométriques mesurées sur trois échantillons de chènevottes différentes.

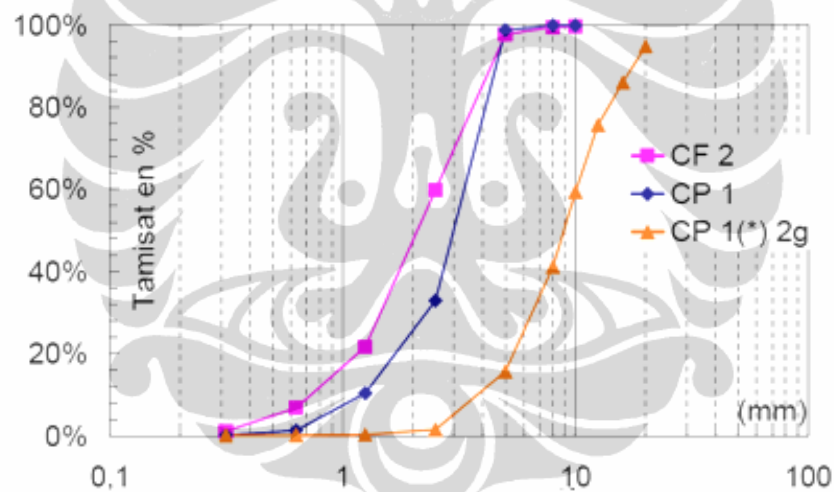


Figure 1.5. Graphique Analyse granulométrique suivant la longueur des particules (Fidelius, 2008).

Une autre propriété importante est la teneur en eau. Il est important de connaître cette teneur en eau afin de calculer exactement la quantité d'eau à ajouter pour réaliser une formulation bien définie. En tableau 1.1 On peut voir la teneur en eau de quatre types de chènevotte testés par Fidelius (2008).

Tableau 1.1 des teneurs en eau de Chènevotte

	Terrachanvre	Terra fibre	Terra chènevotte	Chanvribat
Ouverture du sac : Ww	12.87%	12.22%	9.15%	13.53%
Fin de sac : Ww	12.5%	12.88%	12.32%	12.05%

La chènevotte est un matériau très hydrophile. Les résultats de tests d'absorption d'eau sur différentes chènevottes (Chanvribat et Terrachanvre) indiquent que la chènevotte absorbe de 2.5 à 3 fois sa masse en eau, avec une cinétique très rapide (absorption quasi-totale et stabilisée au bout de cinq minutes) (Fidelius, 2008 ; Nguyen, 2010).

b. Le Liant

Actuellement, les liants utilisés pour confectionner du béton de chanvre contiennent essentiellement de la chaux aérienne et un liant hydraulique qui est souvent la chaux hydraulique et la pouzzolane. La proportion des composants du mélange est variable en fonction du fabricant. Au niveau des recherches déterminant les propriétés mécanique et thermique du béton de chanvre différents travaux (Collet, 2004 ; Cerezo, 2005 ; Arnaud , 2000; Tran Le, 2010 ; Arnaud et Boyeaux, 2011) ont montré que ses caractéristiques dépendent des paramètres suivants :

- La nature et le dosage des matières premières (liants : chaux vive CaO, chaux aérienne Ca(OH)₂, amidon, etc.) ;
- Le granulats (taille, qualité, eau)
- La méthode de fabrication (machine à projection, méthode de préfabrication)
- Les conditions extérieures (température, humidité relative).

Nguyen (2010) montre que la chaux Tradical[®] permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques du mélange par rapport à d'autres chaux naturelles, comme illustré sur la figure 6.

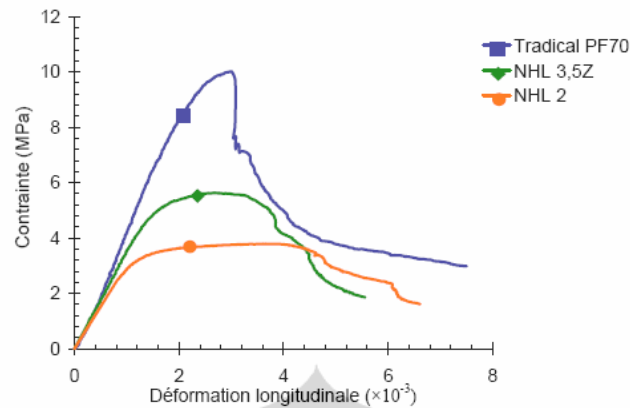


Figure 1.6. Comportement en compression à 28 jours avec différents liants (Nguyen, 2010)

Les performances mécaniques et hygrothermiques sont liées au dosage de chaux. Plus le dosage de liants est grand (pour des masses volumiques et des compacités voisines), plus grandes seront la conductivité thermique et la résistance mécanique. Cela peut être expliqué par le fait que plus le dosage en liant est grand, plus les particules de béton de chanvre sont noyées par une matrice de chaux réduisant leur capacité d'isolation thermique (Tran le, 2010).

Les résultats obtenus par Cerezo (2005) montrent que les propriétés mécaniques du béton de chanvre dépendent de la concentration volumique du liant et varient entre 0,25 et 1,25 MPa pour la résistance de compression et entre 4 et 170 MPa pour le module de Young.

De plus les essais pour des dosages avec de la présence de ciment effectués par Bruijn (2008) montrent que la résistance mécanique augmente selon la proportion du ciment dans le mélange. Cependant la présence de ciment dans le béton de chanvre peut présenter des inconvénients comme la rétention des molécules de vapeur d'eau dans le matériau en contact avec le ciment ce qui entraînera sa moisissure.

Le dosage en liant (chaux et eau) peut être diminué, voir substitué efficacement par des granulats végétaux dans le cadre de fabrication de blocs de chanvre sous haute pression, comme expérimenté par Tronet et *al.* (2011). Le procédé de compactage à l'état frais étudié permet de diminuer l'impact environnemental du matériau dans son ensemble, par la diminution du dosage en liant à la fabrication,

et en augmentant la résistance mécanique des bétons de chanvre en service sans affecter de façon notable leur conductivité thermique.

Nous utiliserons au cours de ce stage de la chaux Tradical®, qui est bien connue et généralement préconisée pour le béton de chanvre en Bretagne. Le tableau 1.2 donne la composition chimique de cette chaux.

Tableau 1.2. Composition chimique et propriétés du liant Tradical PF70 (Balthazard & Cotte Bâtiment ; Nguyen, 2010)

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

Dans cette étude, nous étudierons le comportement de bétons de chanvre proche du béton projeté, des bétons tels que ceux expérimentés par Nguyen (2010), c'est-à-dire compactés à une pression moyenne, et des bétons fortement compactés, tels que ceux présentés par Tronet et *al* (2011). Le chapitre suivant explique comment sont fabriqués de tels bétons de chanvre.

1.1.2 Fabrication Béton de chanvre

La fabrication de blocs de béton de Chanvre est généralement réalisée en deux étapes : le malaxage et le compactage. Aucune formulation standard n'existe pour la réalisation de tels blocs de béton de chanvre. Ce sont en général les composants (liant et chènevotte) et les applications souhaitées qui vont induire le choix de la formulation.

a. Formulation Béton de Chanvre

Actuellement, pour faciliter l'utilisation du béton de chanvre, il existe quatre types de mélange sont définis en faisant principalement varier le dosage en liant. Leur

dénomination reflète l'usage pour lequel ils sont le plus couramment utilisés, "Toit", "Sol", "Mur", "Enduit" (Le Tableau 1.3)

Tableau 1.3 : Dosage pour différentes applications du béton de chanvre (Association construire en chanvre, 2007)

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

Nguyen (2010) propose une méthode pour formuler le béton de chanvre :

- 1) Choisir un rapport L/G et un rapport E/L (L :liant, G :Granulat, E : Eau) ainsi que la masse volumique initiale visée après compression de l'éprouvette ($\rho_{initiale}$), autrement dit le dosage des composants sans prise en compte du type de liant ou de granulat.
- 2) Calculer le dosage des composants par les formules suivantes:
(1 mètre cube de produit),

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

$$\begin{cases} G = \frac{\rho_{initiale}}{1 + \frac{L}{G} + \frac{E}{L} \times \frac{L}{G}} \quad (kg/m^3) \\ L = \frac{L}{G} \times G \quad (kg/m^3) \\ E = \frac{E}{L} \times \frac{L}{G} \times G \quad (kg/m^3) \end{cases} \quad (1.1)$$

Le tableau 4 présente les différentes formulations étudiées par Nguyen (2010). Tronet (Tronet et al, 2011) Utilise des formulations de compositions relativement équivalentes, mais aussi certains contenant des proportions plus fortes de granulats (Tableau 5).

b. Malaxage Béton de Chanvre

Le béton de chanvre est obtenu en mélangeant la chènevotte avec un liant et de l'eau. Pour mélanger les composants du béton de chanvre il existe certaines étapes. Les étapes de mélange se basent sur le protocole de Cérézo (2005) et a

pour but d'éviter une trop forte absorption de l'eau de gâchage nécessaire à l'hydratation du liant par la chènevotte ainsi que d'obtenir d'une bonne homogénéité du mélange. La figure 1.7 explique la procédure de malaxage suivie par Cérézo (2005).

Pour améliorer l'hydratation de la chaux dans le processus de malaxage, Fidelius (2008) a modifié ce protocole comme indiqué sur la figure 1.8. En effet, pour éviter que toute l'eau de gâchée soit absorbée par la chènevotte, le malaxage se fait avec deux ajouts d'eau.



Tableau 1.4 : Récapitulation des compositions réalisées selon les rapports massiques considérés et les dosages (kg/m^3) équivalents (Nguyen, 2010)

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

Tableau 1.5 Compositions réalisées selon les dosages (kg/m^3) et les rapports massiques considérés par Tronet (Tronet et al, 2011)

Formulation	Granulat (kg/m^3)	Liant (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	ρ_{initial} (kg/m^3)	L/G	E/L
1	215,3	387,5	213,2	816	1,8	0,55
2	257,4	360,4	198,2	816	1,4	0,55
3	320	320	176	816	1	0,55
4	500	271	149	940	0,54	0,55

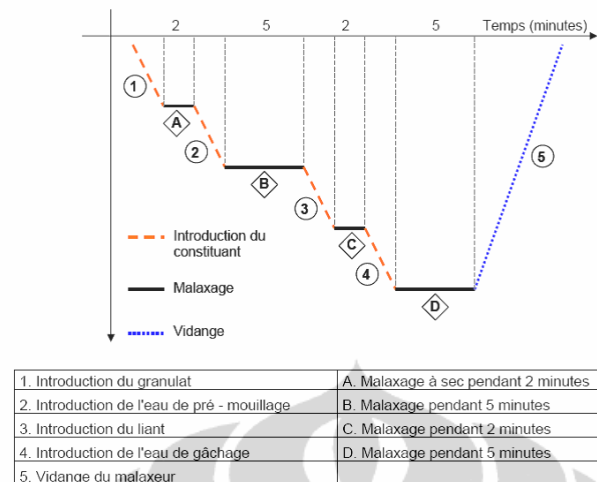


Figure 1.7 La Diagramme des les processus malaxage béton de chanvre qui a été réalisé par Cerezo

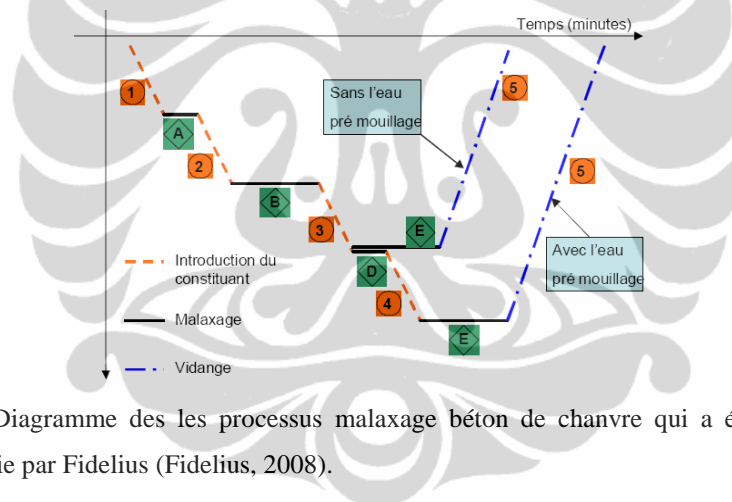


Figure 1.8 La Diagramme des les processus malaxage béton de chanvre qui a été réalisé par Cerezo et modifié par Fidelius (Fidelius, 2008).

c. Compactage béton de chanvre

Tronet (2011) explique que la préfabrication d'éléments de construction composés de béton de chanvre par compactage à l'état frais conduit à une amélioration notable de leur qualité à l'état sec : meilleures caractéristiques mécaniques et qualité de parement. Nguyen (2010) a développé un dispositif spécifique pour réaliser des éprouvettes de béton de chanvre (Figure 1.9).

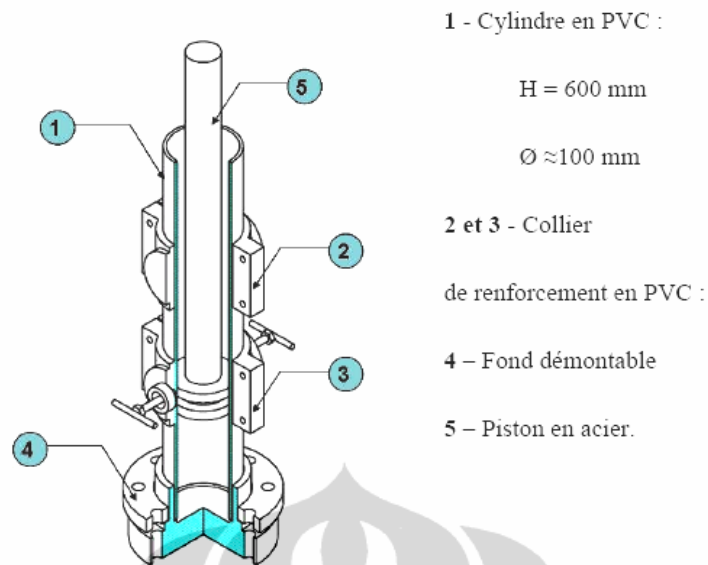


Figure 1.9 Schéma du dispositif de compactage éprouvette (Nguyen, 2010)

La performance mécanique du béton de chanvre à l'état durci augmente avec le compactage, en correspondance avec sa masse volumique. La figure 1.10 montre l'influence du compactage (de la masse volumique) sur la résistance mécanique en compression du béton de chanvre.

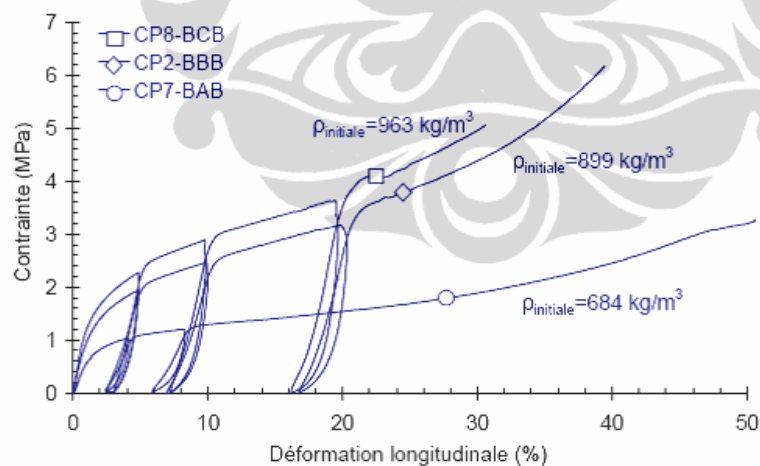


Figure 1.10 : Influence du compactage sur le comportement mécanique en compression à 28 jours (Nguyen et al, 2010)

Les caractéristiques mécaniques du béton de chanvre augmentent significativement avec le compactage en réduisant le volume des pores dans le matériau.

1.2 Caractérisation mécanique du béton de chanvre

Le comportement du béton de chanvre est plus complexe que celui des matériaux conventionnels du génie civil (béton, ossatures métalliques). Ce matériau présente globalement un comportement très ductile et il n'apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte – déformation (dans le cas compression).

1.2.1 Comportement en Compression

Les essais réalisés sur des bétons de chanvre confectionnés avec des chaux hydrauliques naturelles (NHL) n'ont pas dépassé des résistances en compression de 0.46 Mpa alors que le Béton Chanvre Tradical® a atteint 1.46 Mpa. La figure 1.11 compare le comportement mécanique du béton de chanvre avec différents liants.

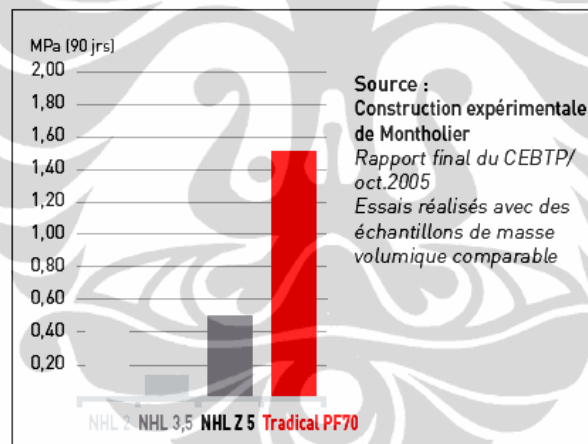


Figure 1.11. La comparaison résistance en compression béton de chanvre avec différent liant (tradical édition 2008).

Nguyen (2010) a réalisé des mesures quantitatives du champ de déformations avec le système de mesure optique ARAMIS en cours de compression simple (figure 1.12).

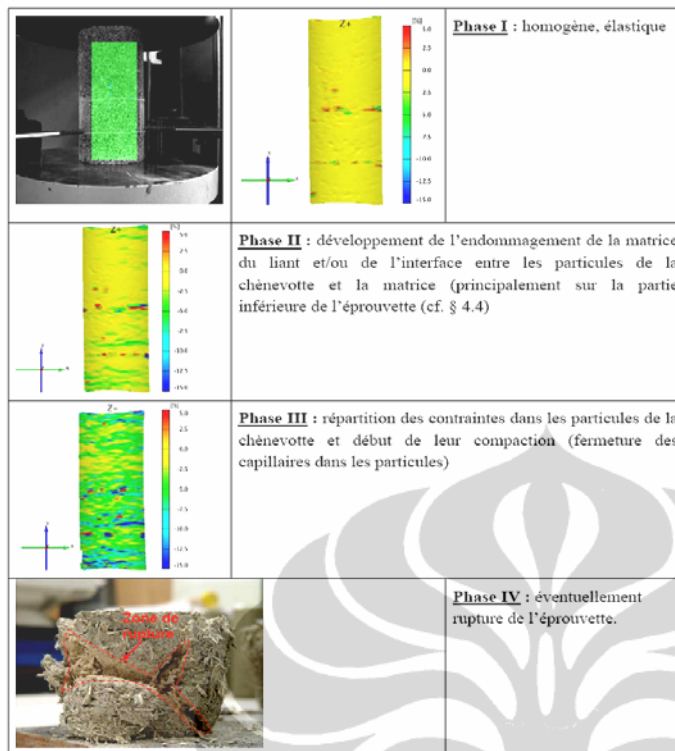


Figure 1.12 Evolution du champ de déformation longitudinal visualisé par le système de mesure optique ARAMIS et rupture du béton de chanvre (Nguyen, 2010)

La Phase I se caractérise par une relation assez linéaire entre la contrainte et la déformation, elle correspond au domaine élastique du comportement du matériau.

La Phase II, dites phase élasto-plastique, correspond à l'endommagement de la matrice du liant mais aussi des interfaces entre le liant et les particules. A la fin de cette phase, la matrice du liant ne joue plus le rôle de porteur des sollicitations.

La Phase III se distingue par une augmentation de la contrainte et de la déformation de façon quasi linéaire. Dans cette phase, les particules de la chènevotte reprennent la plus grande partie des contraintes. Le développement des déformations plastiques se produit au sein des granulats (chènevotte). Pourtant l'augmentation de la contrainte n'entraîne pas la rupture totale du matériau, mais bien la compaction de ces particules, du fait de leur grande déformabilité, et la densification de l'éprouvette.

La Phase IV est la phase de rupture du matériau et correspond au maximum de contrainte et à la partie descendante de la courbe contrainte – déformation.

Relation contrainte – déformation a été illustre par figure 13

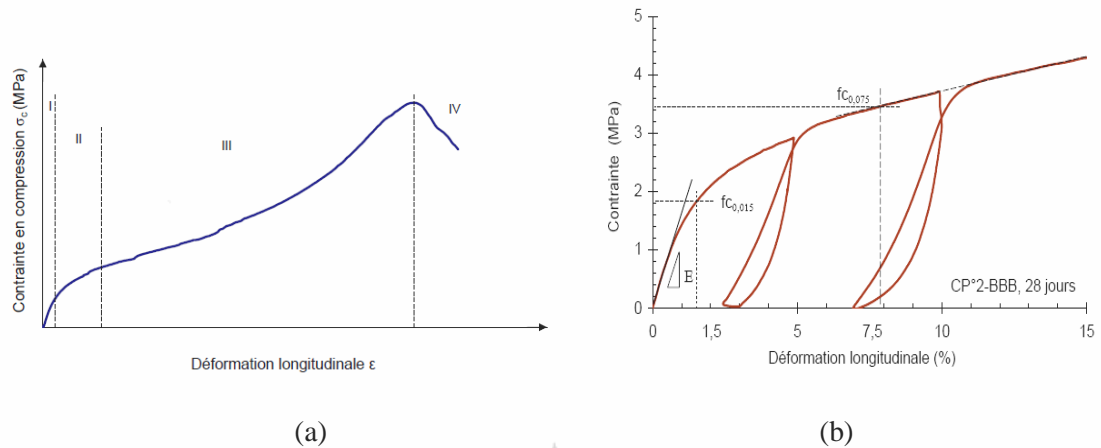


Figure 1.13 Schéma de la courbe contrainte – déformation (a) Caractéristiques mécaniques extraites à partir de la courbe contrainte- déformation du béton de chanvre (b) (Nguyen, 2010)

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

L'influence de type de liant est démontrée par la figure 14, et est en accord avec la figure 1. 14 (PF 70 : Liant Tradical, NHL : Chaux Naturel, CP : Chênevotte Pure)

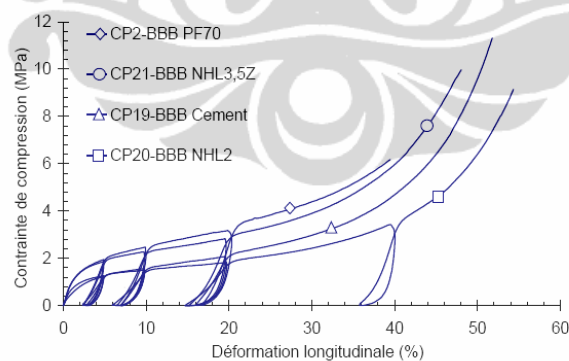


Figure 1.14 Comportement mécanique en compression à 28 jours d'éprouvettes de même composition et masse volumique initiale, confectionnées avec différents liants (Nguyen,2010)

Tronet et *al* (2011) montrent pour leur part qu'un plus grand dosage en granulat compensé par un plus fort compactage contribue significativement à la résistance mécanique du matériau tout en conservant un comportement similaire (pas de rupture fragile et une grande capacité de déformation). Les figures 1.15 et 1.16

montrent les résultats d'essais en compression de différentes formulations. La résistance en compression $f_{c,0,075}$ à 28 jours obtenue dans cette étude varie de 3 à 7 MPa. Par contre, le module d'Young est inférieur à 120 MPa pour les mélanges fortement dosés en granulats. Il est plus élevé que le résultat du Nguyen (2010).

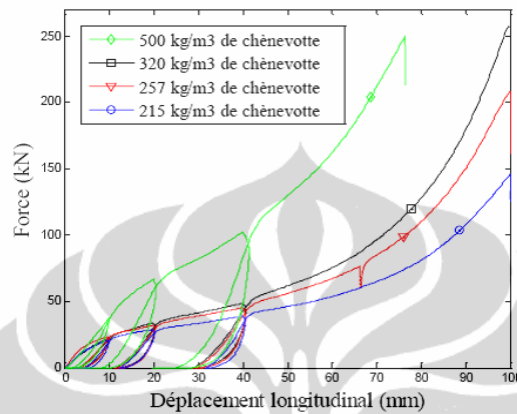


Figure 1.15: Comportement en compression à 28 jours des quatre bétons de chanvre formulés (Tornet et al, 2011)

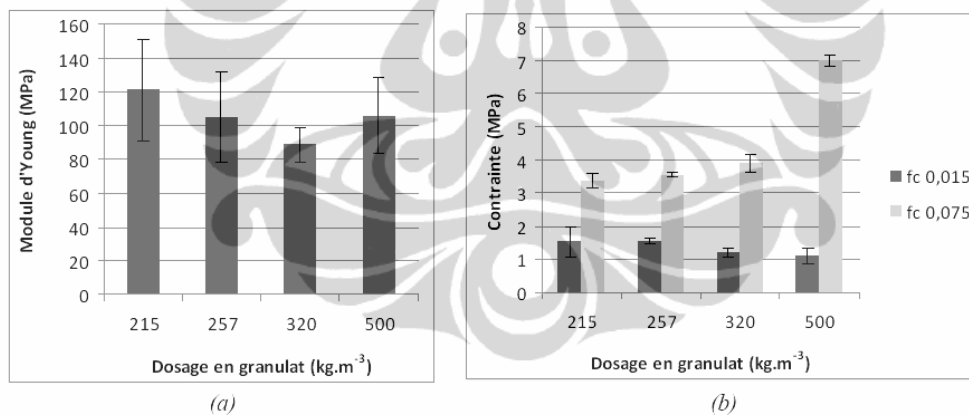


Figure 1.16: Caractéristiques mécaniques des différentes compositions de bétons de chanvre élaborées (Tornet et al, 2011).

1.2.2 Comportement en Flexion

Nguyen (2010) a réalisé les essais de flexion trois points sur des plaques de béton de chanvre en s'inspirant de la Norme NF EN 520. Leur surface est de 300×400 mm et leur épaisseur varie de 17 à 20 mm. Elles sont découpées à partir de plaques initiales de 400×600 mm fabriquées au laboratoire. Les plaques sont placées sur deux appuis cylindriques parallèles dont les centres sont espacés de

350 mm. Le chargement est piloté en déplacement et est appliqué au centre entre les deux appuis, la vitesse est de 0,01 mm/s et la cellule de charge a une capacité de 5 kN (figure 1.17).

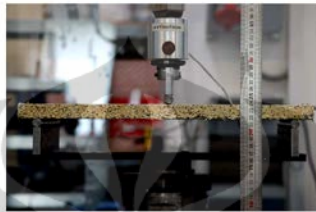
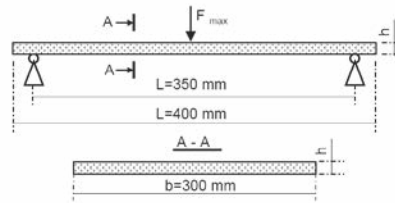


Figure 1.17. Schéma et montage de l'essai de flexion trois points sur une plaque de béton de chanvre (Nguyen, 2010)

La résistance à la rupture en flexion est calculée selon la formule :

$$f_t = \frac{3F_{\max} L}{2bh^2} \quad (1.2)$$

où :

f_t : résistance à la rupture en flexion (MPa)

F_{\max} : charge maximale, ou charge de rupture (N)

L : distance entre axes des appuis cylindriques (mm)

b : largeur de la plaque (mm)

h : épaisseur de la plaque (mm)

Tableau 1.8. Résistance à la rupture en flexion des compositions testées (Nguyen, 2011)

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

Le Tableau 1.8 donne les résultats pour 4 formulations différentes et deux types de granulats (CF : fibrés ; CP : non fibrés).

En raison de la faible rigidité de la chènevotte, le béton de chanvre possède un comportement mécanique très ductile en compression ainsi qu'en flexion. En ce qui concerne le granulats, on constate que la résistance en compression du béton de chanvre fabriqué avec le granulats CF est plus faible que celui fabriqué avec le granulats CP. Malgré la présence des fibres de chanvre dont la résistance en traction est élevée dans le granulats CF, la résistance en flexion est aussi plus faible pour les éprouvettes fabriquées avec ce granulats. Une porosité inter – granulaire plus élevée que celle du granulats CF couplée à une moins bonne adhérence avec la pâte de la chaux en serait responsable (Nguyen, 2010).

1.3 Etude de la caractérisation dynamique aux barres de Hopkinson

La caractérisation des matériaux soumis à une durée de chargement de l'ordre de la milliseconde, correspondant à la plupart des applications civiles, est effectuée principalement par cette technique est basée sur la propagation des ondes élastiques dans un système des barres. Elle est à la fois un moyen de mesure et de chargement et a été inventée initialement pour des essais en compression. Il peut s'appliquer actuellement aussi aux essais de traction, flexion et de torsion.

1.3.1 Présentation de L'Essai aux Barres de Hopkinson

L'origine historique du dispositif de barres de Hopkinson être attribuée à J. Hopkinson, et son expérience menée sur des câbles (1872) (Gueraiche, 2008). Un fil, fixé à l'extrémité supérieure, a une enclume fixée à l'extrémité inférieure. Un collier, placé autour du fil, est abandonné en chute libre puis frappe l'enclume. Il a été noté que le fil se brise à différents endroits en fonction de la hauteur de chute, due à l'interaction de l'impulsion de contrainte de chargement avec sa réflexion à partir de l'encastrement. Cette expérience a souligné l'importance de considère la propagation des ondes dans les événements dynamiques.

Bertram Hopkinson, motivé par les besoins militaires de l'époque, a conçu le premier système de barre de Hopkinson (Figure 1.18) pour mesurer les impulsions de pression résultant d'explosions et impacts de balles.

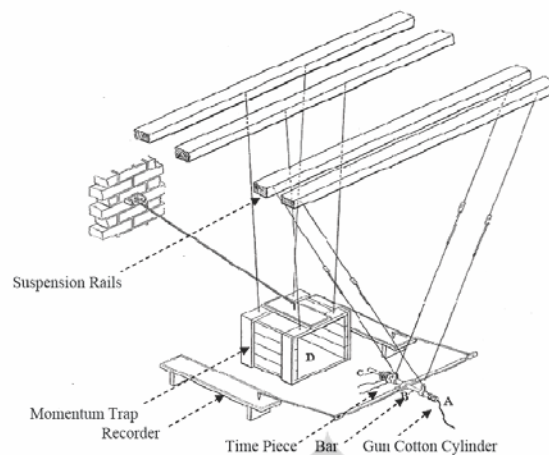


Figure 1.18. Instalation barre de hopkinson (Hopkinson 1914 ; Periasamy 2010)

Davies a fait une analyse complète du dispositif et l'a amélioré en 1948. Le montage à deux barres que l'on utilise couramment aujourd'hui a été développé par (Kolsky, 1949), l'échantillon est placé entre deux barres, l'une d'elle étant impactée par le projectile. Ce montage porte le nom de " Split Hopkinson Pressure Bar ", communément appelé SHPB. Il utilisait initialement un microphone à condensateur cylindrique afin de mesurer l'amplitude de l'impulsion de pression produite par l'explosion d'un détonateur à l'extrémité libre de la barre incidente. À l'extrémité libre de la deuxième barre, il utilisait un microphone à condensateur à plaques parallèles pour mesurer le déplacement. Il utilisait les signaux provenant des deux condensateurs pour mesurer la réponse de contrainte-déformation de l'échantillon.

1.3.2 L'Essai de SHPB en compression

Généralement, le dispositif de SHPB se compose de trois composants; le dispositif de chargement (canon a gaz, projectile), des barres (barre d'entre, barre de sortie) et le système d'acquisition & d'enregistrement de données (jauge, conditionneur, oscilloscope). La méthode des barres de Hopkinson, consiste à placer un échantillon entre deux barres identiques de limite élastique élevée par rapport à celle du matériau testé (Figure 1.19). Un projectile crée une onde longitudinale de compression dans la barre entrante (BE) (ϵ_i), une partie de l'onde est réfléchié à l'interface barre-échantillon (ϵ_r), une autre est transmise, à

l'échantillon puis à la barre sortante ϵ_t (BS). Des jauges de déformation collées sur les barres, et sollicitées par les ondes incidentes, réfléchiée et transmise, permettent de déterminer les forces et les vitesses aux interfaces entre les barres et l'échantillon.

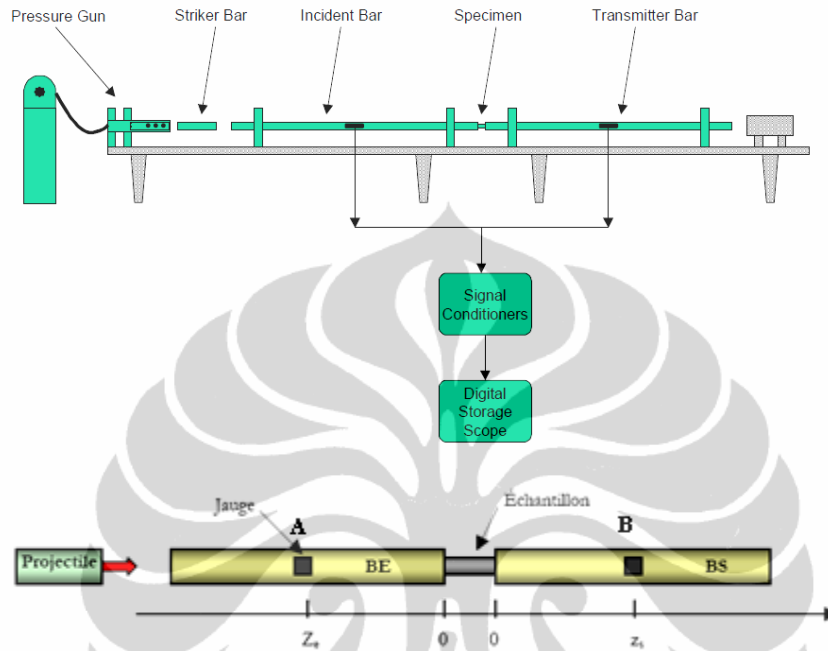


Figure 1.19. Schéma du principe de l'essai Hopkinson (Kaiser, 1998 ;Elnasri, 2006)

Soit $\epsilon_i(t)$, et $\epsilon_r(t)$ les déformations associées aux ondes incidente et réfléchiée mesurées par la jauge au point A à la barre d'entre (BE), et celle de $\epsilon_t(t)$ associée à l'onde transmise mesurée par la jauge au point B a la barre de sortie (figure 1.19). Une relation entre la vitesse particulière et la déformation peut être établie comme indiqué figure 1.20.

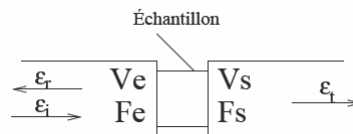


Figure 1.20. Equilibre de L'échantillon

Les informations recherchées dans la technique des barres sont les vitesses et déplacements au niveau des interfaces entrante (V_e, U_e) et sortante (V_s, U_s), ainsi

que les forces entrante (F_e) et sortante (F_s) (figure 16). Les forces développées aux deux interfaces sont :

$$\begin{cases} F_e(t) = S_b E_b ((\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t))) \\ F_s(t) = S_b E_b \varepsilon_t(t) \end{cases} \quad (1.3)$$

Les vitesses particulières au niveau des interfaces entrante ($v_e(t)$) et sortante ($v_s(t)$) s'écrivent alors

$$\begin{cases} v_e(t) = c_b (\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t)) \\ v_s(t) = c_b \varepsilon_t(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

Où S , E , C ($C = \sqrt{E/\rho}$) et ρ sont respectivement la section, le module de Young, la célérité et densité des barres. En intégrant les équations (1.4), on obtient les déplacements aux deux interfaces:

$$\begin{cases} u_e(t) = c_b \int_0^t (\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau)) d\tau \\ u_s(t) = c_b \int_0^t \varepsilon_t(\tau) d\tau \end{cases} \quad (1.5)$$

Les grandeurs nominales (contrainte, déformation et vitesse de déformation) dans l'échantillon sont alors déduites, en supposant toujours que la contrainte et la déformation sont homogènes.

$$\sigma_{nominale}(t) = \frac{F_e + F_s}{2S_e} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_{nominale}(t) = \frac{u_s(t) - u_e(t)}{l_e} \quad (1.7)$$

$$\dot{\varepsilon}_{nominale}(t) = \frac{v_s(t) - v_e(t)}{l_e} \quad (1.8)$$

Où S_e et l_e sont respectivement la section et longueur de l'échantillon. Pour respecter l'hypothèse que les ondes dans les barres restent élastiques pendant le chargement, la vitesse de chargement est limitée par la relation.

$$v_{max} \leq \frac{2\sigma_y}{\rho C} \quad (1.9)$$

Où σ_y et ρ sont respectivement la contrainte seuil et densité des barres.

La mesure des ondes incidente et réfléchiée permet donc de connaître les déformations subies par les barres. Les relations classiques de la mécanique permettent ensuite de déterminer la contrainte, la vitesse et le déplacement à chaque point de mesure. La figure 1.21 illustre typiquement les mesures des signaux délivrées par les jauges de déformation lors d'un essai sur une mousse syntactique avec des barres en aluminium de 25 mm de diamètre (Bouix, 2008).

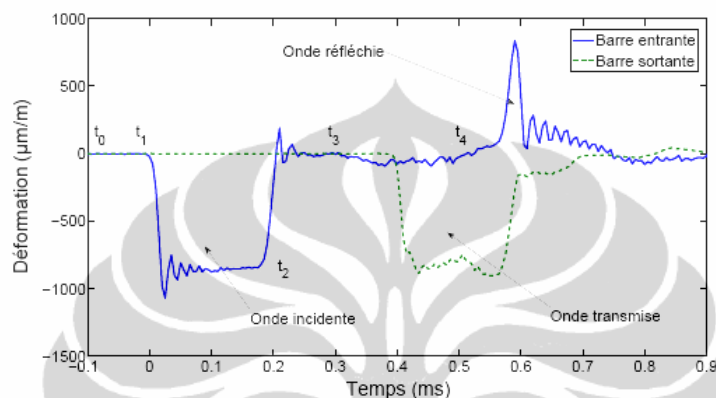


Figure 1.21. Ondes mesures lors d'un essai sur une mousse syntactique ($V_{\text{impact}} = 7.6 \text{ m.s}^{-1}$) (Bouix, 2008)

1.3.3 Les barres de Hopkinson viscoélastiques

Historiquement la technique des barres de Hopkinson a eu un succès limité dans la caractérisation des matériaux de faible impédance mécanique car dans ce cas, l'équilibre mécanique de l'échantillon est difficilement atteignable et les niveaux des signaux conduisent à de faibles rapports signal-bruit (Johnson, Sarva & Socrate, 2009). Récemment, pour caractériser les matériaux à faible impédance, des montages SHPB avec des barres de faible impédance, généralement en matière plastique telles que le Nylon (Bouix, 2008) avec les propriétés données tableau 9, ont été développés. Le présent travail démontre que l'utilisation des barres de Hopkinson peut être étendue en utilisant des barres viscoélastiques pour caractériser aux grands de vitesse de déformation des matériaux de faible densité et résistance mécanique, tels que le plastique, le caoutchouc et les mousses (Sawas et al, 1998). Le Béton de chanvre a une résistance en compression $f_{c_{0,075}}$ à

28 jours qui varie de 0,2 à 3,6 MPa et le module d'Young est inférieur à 170 Mpa, avec une densité de l'ordre de 600 à 1000 kg/m³ (Nguyen, 2010 ; Tornet et al, 2011). Ces propriétés appellent donc l'utilisation de barre en Nylon pour le montage SHPB.

Tableau 1.9. Impédance de différents matériaux (Bouix, 2008)

	E (MPa)	ρ (kg.m ⁻³)	$Z = \rho c$ (kg.s ⁻¹ .m ⁻²)
Acier 18-10	203000	7900	4×10^7
Aluminium AU4G	75000	2800	$1,4 \times 10^7$
Magnésium	46000	1740	$8,9 \times 10^6$
Plexiglas PMMA	2900	1800	$2,2 \times 10^6$
Nylon PA6	3300	1140	$1,7 \times 10^6$
Mousse de PPE	30	150	$6,7 \times 10^4$

Le comportement des matériaux étant viscoélastiques, la propagation des ondes dans ces barres est acoustiquement dispersive et sujette à un phénomène d'amortissement important. La prise en compte de la dispersion et de l'amortissement est indispensable pour réaliser un transport numérique précis des ondes, de leur point de mesure à l'échantillon (Bacon, 1998, Bouix, 2008)

1.3.4 Propagation des ondes de barre dans un solide viscoélastique

Bouix, (2008) rappelle les équations de propagation des ondes dans de barre viscoélastique. La loi de comportement linéaire est définie à partir par d'un module d'Young complexe $E^* = E_1(\omega) + iE_2(\omega)$, fonction de la pulsation $\omega = 2\pi f$ avec f la fréquence de l'excitation. Cette équation constitutive s'exprime, dans le domaine fréquentiel de Fourier, en posant $\tilde{\sigma}(x, \omega)$ et $\tilde{\varepsilon}(x, \omega)$ les transformées de Fourier de $\sigma(x, t)$ et de $\varepsilon(x, t)$. On obtient ainsi en vertu du principe de transposition :

$$\tilde{\sigma}(x, \omega) = E^*(\omega)\tilde{\varepsilon}(x, \omega) \quad (1.10)$$

Le caractère viscoélastique de la barre implique également une atténuation $\alpha(\omega)$ et une dispersion $k(\omega)$ de l'onde lors de sa propagation dans celle-ci. Cette atténuation et cette dispersion sont prises en compte pour la propagation des ondes

en définissant un coefficient de propagation d'ondes $\gamma(\omega)$. Pour cela, on peut reprendre l'équilibre dynamique sur un volume élémentaire de barre.

$$\frac{\partial^2 \tilde{\sigma}(x, \omega)}{\partial x^2} = -\rho \omega^2 \tilde{\varepsilon}(x, \omega) \quad (1.11)$$

Les déformations induites dans la barre sont gouvernées par l'équation unidimensionnelle de propagation d'ondes dans une barre viscoélastique :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \gamma^2(\omega) \right) \tilde{\varepsilon}(x, \omega) = 0 \quad (1.12)$$

Le coefficient de propagation d'ondes $\gamma(\omega)$ est défini de la manière suivante :

$$\gamma^2(\omega) = -\frac{\rho \omega^2}{E(\omega)} \quad (1.13)$$

Celui-ci est également lié à l'atténuation et à la dispersion dans le cadre de propagation d'ondes de barre et donc à la célérité de l'onde de barre :

$$\gamma(\omega) = \alpha(\omega) + ik(\omega) = \alpha(\omega) + i \frac{\omega}{c(\omega)} \quad (1.14)$$

La solution de l'équation de propagation d'ondes (1.11) donne l'expression de la déformation générée au point de mesure de la barre à une pulsation ω . A partir de cette équation, il est possible de déduire la déformation générée par le passage de cette onde en toute autre section de la barre grâce à ce coefficient de propagation $\gamma(\omega)$:

$$\tilde{\varepsilon}(x, \omega) = \tilde{P}(\omega) e^{-\gamma x} + \tilde{N}(\omega) e^{+\gamma x} \quad (1.15)$$

x représente l'abscisse de la section désirée ou encore la distance à partir du point de mesure de ces ondes incidente $\varepsilon_i(t)$ et réfléchie $\varepsilon_r(t)$, définies respectivement dans le domaine de Fourier par $\tilde{P}(\omega)$ et $\tilde{N}(\omega)$.

La figure 22 illustre la mesure des ondes relevées sur une barre viscoélastique en Nylon PA6 de 60 mm de diamètre, lors d'un essai sur une mousse de PPE. On s'aperçoit que les ondes incidente et réfléchie sont bien distinctes malgré un phénomène de traîne important du au choc viscoélastique du projectile sur la barre d'entrée (Zhao, 1992, Bussac et al, 2007, Bouix, 2008)

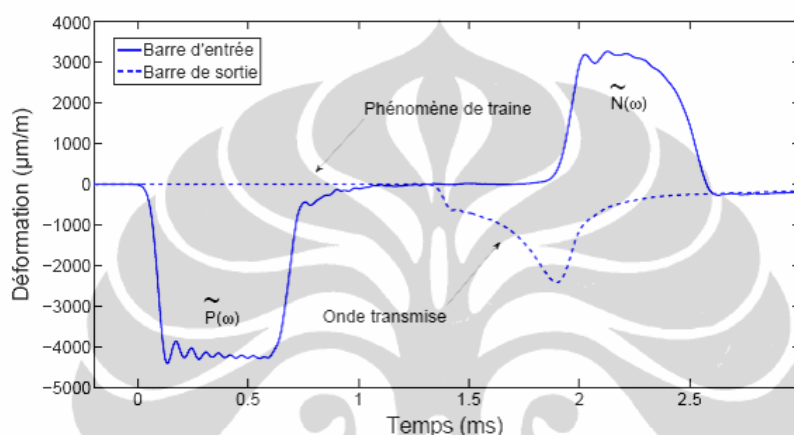


Figure 1.22. Ondes mesurées lors d'un essai sur une mousse de polypropylène (Bouix, 2008).

Des lors, il est possible d'en déduire la force $\tilde{F}(x, \omega)$ appliquée ainsi que la vitesse particulière $\tilde{v}(x, \omega)$ d'une onde associée à une section-droite de la barre, par différentiation, à partir de la solution générale de l'équation de propagation d'onde (3.14)

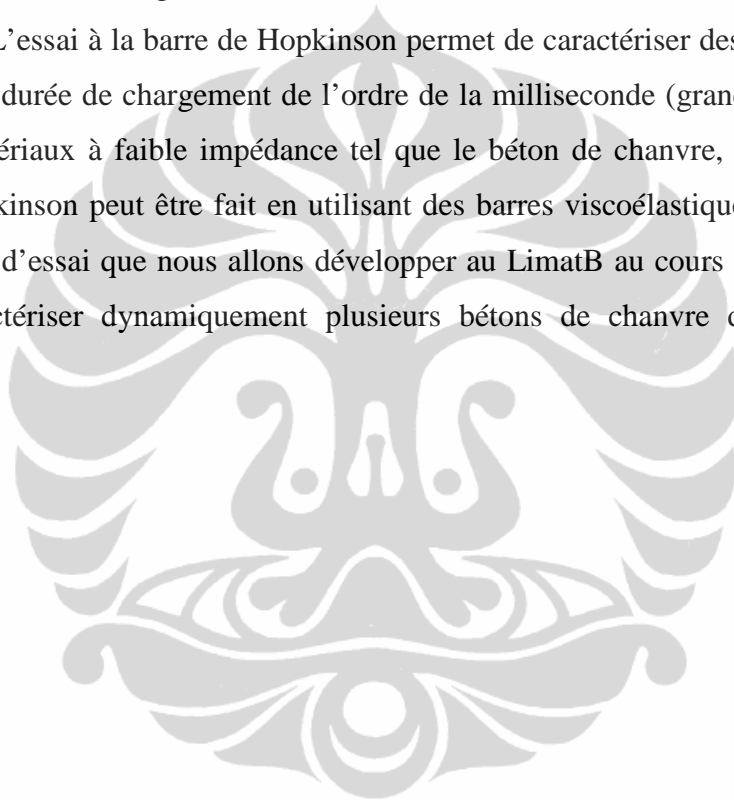
$$\begin{bmatrix} \tilde{F}(x, \omega) \\ \tilde{v}(x, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A\rho\omega^2}{\gamma^2}e^{-\gamma x} & \frac{A\rho\omega^2}{\gamma^2}e^{+\gamma x} \\ -\frac{i\omega}{\gamma}e^{-\gamma x} & -\frac{i\omega}{\gamma}e^{+\gamma x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P}(x, \omega) \\ \tilde{N}(x, \omega) \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

\tilde{F} et \tilde{v} sont respectivement la force appliquée à une section droite de la barre et la vitesse particulière, calculés à partir du coefficient de propagation $\gamma(\omega)$ de chacune des barres et déterminé par ailleurs.

1.4 Bilan

Le béton de chanvre est un matériau poreux obtenu en mélangeant un liant à base de chaux, du chanvre (chènevotte) et de l'eau. Les propriétés du composant et la méthode de compactage du béton de chanvre influent fortement sur son comportement mécanique.

Le comportement mécanique du béton de chanvre montre qu'il est un matériau à faible impédance car la résistance en compression ne dépasse pas pour l'instant 7 Mpa et le module d'Young est inférieur à 170 MPa avec une densité autour 400 à 1000 kg/m³. L'essai à la barre de Hopkinson permet de caractériser des matériaux soumis à une durée de chargement de l'ordre de la milliseconde (grande vitesse). Pour des matériaux à faible impédance tel que le béton de chanvre, l'essai à la barre de Hopkinson peut être fait en utilisant des barres viscoélastiques (Nylon). C'est ce type d'essai que nous allons développer au LimatB au cours de ce stage afin de caractériser dynamiquement plusieurs bétons de chanvre de densités différentes.



CHAPITRE 2

PROCESSUS DE MISE EN ŒUVRE ET

CARACTERISATION MECANIQUE DU BETON DE CHANVRE

Dans ce chapitre nous expliquons le processus de mise en œuvre du béton de chanvre avec différentes formulations et différents niveaux de compactage afin de préparer les éprouvettes pour les essais mécaniques en compression quasi-statique et les éprouvettes des essais dynamiques. Les étapes de fabrication des éprouvettes de béton de chanvre sont : formulation, malaxage et compactage ou moulage. Avec différents niveaux de compactage on pourra étudier l'influence du compactage sur le comportement mécanique en compression sous chargement quasi-statique et dynamique de béton de chanvre.

Le chapitre se déroulera comme suit :

Tout d'abord nous présentons les différentes éprouvettes testées (formulation et type de compactage). Ces formulations ont été choisies pour correspondre à celle de la thèse, en cours de Pierre Tronet (Doctorant au LimatB). Ensuite nous expliquerons le processus de mise en œuvre du béton de chanvre en trois étapes : malaxage, compactage ou moulage et cure. Durant la cure nous présenterons l'évolution des masses et l'évolution géométrique de nos éprouvettes. Puis nous présenterons les processus et les dispositifs pour effectuer les essais mécaniques en compression quasi-statique. Enfin nous présenterons la caractéristique mécanique de nos bétons de chanvre d'après les résultats des essais de compression. Cette caractéristique déterminera les paramètres de l'essai dynamique à la barre de Hopkinson que nous utiliserons par la suite.

Le chapitre 4 fera alors l'objet de l'étude dynamique et de la comparaison entre les comportements statique et dynamique des bétons de chanvre étudiés.

2.1 Formulation des composants du béton de chanvre

Dans notre étude nous utilisons les mêmes formulations que celles de Tronet et al (2011). Elles seront nommées M_2 et M_4 comme illustré dans tableau 5 (Chapitre 1), et rappelé dans le tableau 10. Pour étudier l'influence du compactage

nous utilisons la formulation M₂. La formulation du mélange M₂ compacté est extrêmement sèche. En effet il faut rappeler ici que lors du malaxage, l'intégralité de l'eau du mélange est absorbée par la chènevotte. Elle n'est reléguée que lors du compactage, les particules de chènevotte agissant comme des éponges qu'on essore. Afin de réaliser des éprouvettes non compactées, mais aux formulations comparables à M₂ donc nous modifions la formulation M₂, il a fallu ajouter de l'eau dans le mélange, en quantité nécessaire pour compenser l'absorption par les granulats, tout en gardant le même rapport massique entre le liant et le granulat. Ceci correspond au mélange M_{2Mod} du tableau 2.1, avec l'hypothèse que les granulats absorbent deux fois leur masse en eau (Nguyen, 2010)

Ici nous notons que la masse volumique initiale est la masse volumique après compactage. Les densités données pour M2 et M4 sont donc obtenues par compactage tandis que la densité de 440kg/m³ de M2mod résulte d'un simple moulage avec tassement manuel par tranches successives. Le paragraphe suivant présente le processus de mise en œuvre des différentes éprouvettes.

Tableau 2.1 Récapitulatif des les formulations M2, M_{2Mod}, et M4 pour 1 m³ béton du chanvre

Formulation	ρ_{initial} (kg/m ³)	Granulat (kg)	Liant (kg)	E/G	L/G	Type de compactage
M2mod	440	139	195	1,99	1,4	faible
M2	816	257	360	0,55	1,4	moyene
M4	940	500	271	0,55	0,54	fort

2.2 Processus de mise en œuvre du béton de chanvre

2.2.1 Préparation des moules des éprouvettes

- a) Pour réaliser les éprouvettes M2 nous utilisons le dispositif développé par Nguyen (figure 2.1). Ce dispositif est constitué d'éprouvettes en PVC, relativement peu rigide. Deux bagues de serrage permettent de limiter la déformation du moule. Ce type de moule peut être utilisé pour des pressions de compactages moyennes, induisant des contraintes radiales inférieures à 1MPa. Afin de limiter le frottement entre le béton de chanvre frais et la paroi du moule nous utilisons de l'huile de décoffrage comme lubrifiant.



Figure 2.1 moule en PVC pour réaliser l'éprouvette 100 mm de diamètre, 200 mm de hauteur

- b) Les éprouvettes $M_{2 \text{ mod}}$ sont simplement tassées manuellement, et directement moulées dans des moules en carton ou en PVC. Elles sont réalisées en plusieurs couches successives afin d'obtenir une densité homogène suivant la hauteur. Le dispositif est présenté en figure 2.2.



Figure.2.2 moulage en cartons 2,1 litre et tuyau de compacteur

- c) Pour les éprouvettes M_4 , en raison de la force de compactage très forte, nous utilisons un moule en acier (figure 2.3). Pour minimiser le glissement entre le béton de chanvre et la paroi de moules, nous lubrifions aussi à l'huile.



Figure 2.3 Moule en acier pour réaliser les éprouvettes M_4 (fort compactage)

2.2.2 Malaxage

Pour mélanger les trois composants de béton du chanvre nous utilisons un malaxeur. Le processus de malaxage se fait en suivant le protocole Cerezo (Cerezo, 2005). Dans notre cas nous utilisons deux types de malaxeur en fonction du volume et du nombre d'éprouvettes. Pour mélanger les éprouvettes de type M_2 dont le volume en vrac (avant compactage) est environ 20 litres, nous utilisons un malaxeur à béton hydraulique de 75 litres (Couvrot) à axe vertical (3 bras ; Figure 2. 4). Pour les mélanges $M_{2\text{mod}}$ et M_4 dont le volume était environ 15 litres, nous avons utilisé un malaxeur Hobart 20 litres.

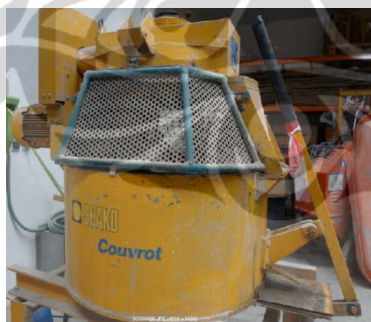


Figure 2.4 Malaxeur à béton hydraulique de 75 litres (Couvrot) à axe vertical (3 bras)

2.2.3 Moulage des éprouvettes

Pour réaliser les éprouvettes de chaque formulation (M_2 , $M_{2\text{mod}}$ et M_4), nous utilisons différents moules et différentes façon de compacter.

- a) Moule pour les éprouvettes M_2 (compactage moyen)

En utilisant le dispositif qui a été développé par Nguyen (Nguyen, 2010), 8 éprouvettes M_2 ont été fabriquées. Ce dispositif permet d'obtenir les éprouvettes

cylindriques d'environ 9,8 cm de diamètre et 20 cm d'hauteur. A l'aide d'une presse quatre colonnes Zwick^R de 250kN de capacité, nous pouvons contrôler la hauteur d'éprouvette souhaitée. La pression maximum appliquée dans le processus de compactage est pour ce mélange de 1.86 Mpa

b) Eprouvettes $M_{2\text{mod}}$ (compactage faible)

Le moules utilisés sont des moules d'éprouvettes normalisées « 11x22 ». La taille des éprouvettes est donc de 11,25 cm de diamètre et 22 cm de hauteur (2,1 litre). Nous pouvons utiliser des moules de carton car le compactage est faible donc il n'y a pas le gonflement de éprouvette après compactage.

c) Eprouvettes M_4 (Fort compactage)

Pour la formulation M_4 , Nous utilisons plus beaucoup de chènevotte. Afin de compenser la baisse de résistance du à une proportion plus faible de liant, la densité visée est aussi plus grande, et donc la pression de compactage est elle aussi plus grande. Donc il faut un moule qui peut tenir une contrainte radiale de l'ordre de 10 MPa. Dans ce cas nous utilisons un moule en acier de 10 cm de diamètre et 80 cm de hauteur, développé par Pierre Tronet et Thibaut Lecompte. La pression axiale maximum que nous appliquons dans le processus de compactage du béton de chanvre M_4 est 6.86 Mpa

2.3 Cure : évolution géométrique et massique des éprouvettes

Après trois jours les éprouvettes sont démoulées. Trois jours est le temps d'hydratation et de carbonatation nécessaire pour s'assurer de conserver l'intégrité des éprouvettes lors du démoulage. A partir de 3 jours, la géométrie et la masse des éprouvettes sont régulièrement mesurées. En observant les éprouvettes après démoulage nous connaissons la taille (hauteur et diamètre) et le poids initial. Pour privilégier l'hydratation sur le séchage, et pour pouvoir comparer les résultats de campagnes réalisées à différentes saisons, les éprouvettes sont conservées dans une salle à humidité contrôlé (HR 75%) et à une température moyenne de 20°C pendant 28 jours. La hauteur et le diamètre des éprouvettes M_2 et M_2 modifie sont mesurés tous les chaque trois jours pour estimer le gonflement ou le retrait éventuel, et évaluer l'activité de carbonatation. En effet la carbonatation consomme de l'eau et se traduit par une perte de masse de l'échantillon. En

observant l'évolution de la taille des éprouvettes M_2 et M_{2mod} il apparaît que les variations dimensionnelles sont négligeables sur la période étudiée (Figure 2.5)

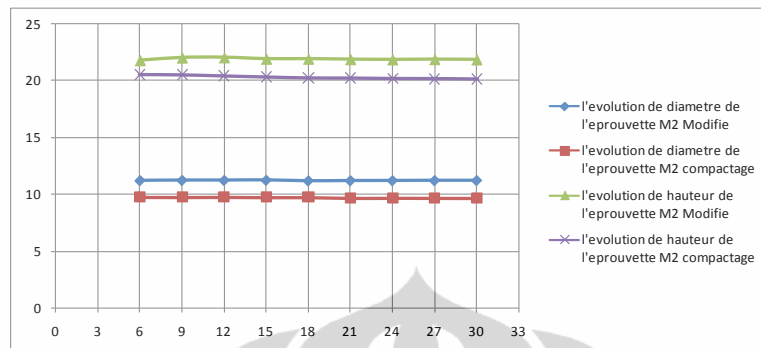


Figure 2.5. Evolution géométrique des éprouvettes M_2 et M_{2mod} .

Pour les éprouvettes M4 (fort compactage) nous devons garder la hauteur d'éprouvettes comme illustré figure 2.6 Ce maintien dimensionnel jusqu'à l'âge de 28 jours permet d'éviter le gonflement du à l'élasticité et la relaxation des éprouvettes fortement compactées.



Figure 2.6 Stockage l'éprouvette M4

La figure 2.7 présente l'évolution de poids des éprouvettes M_2 et M_{2mod} pendant 30 jours de stockage. Comme l'ont déjà montré Fidelius (2008) et Nguyen (2010), on peut distinguer 3

et qui se passe en période 0-3 jours de stockage parce que les éprouvettes sont zones d'évolution de poids ;

Zone 1 : évolution doucncore dans le moule, donc l'évaporation de l'eau est empêchée.

Zone 2 : pertes le masse des éprouvettes relativement rapide. Dans ce courbe nous pouvons dire que la perte de masse de $M_{2\text{mod}}$ est plus grande que celle de M_2 . Ceci est logique puisque le mélange $M_{2\text{mod}}$ initial contient plus d'eau. Cette eau s'évapore d'autant plus facilement que le mélange est moins dense.

Zone 3 : La masse des éprouvettes se stabilise après environ 28-30 jours. Les phénomènes de carbonatation et d'évaporation sont beaucoup moins actifs.

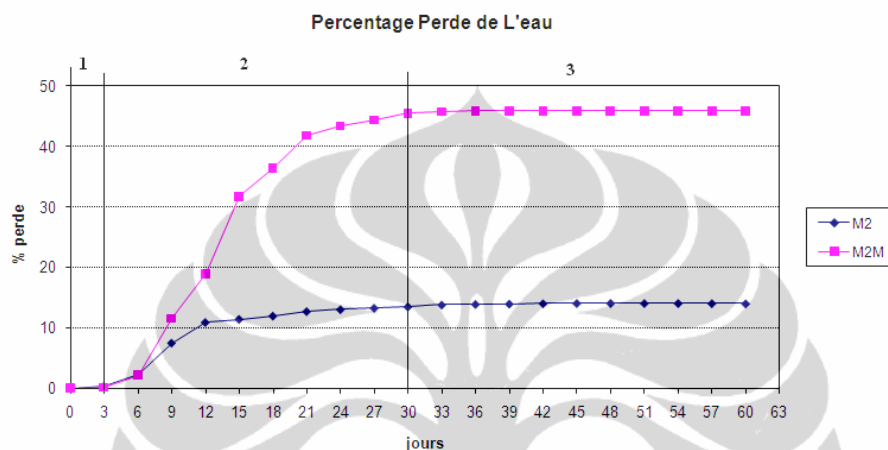


Figure 2.7 graphiques l'évolution de poids

Enfin de l'observation le pois des éprouvettes nous pouvons déterminer le masse volumique des nos béton de chanvre soit, 380 kg/m^3 , 734 kg/m^3 et 875 kg/m^3 respectivement pour $M_{2\text{mod}}$, M_2 et M_4 .

2.4 Essai de compression simple

2.4.1 Préparation de l'essai mécanique

a) Surfaçages

Avant l'essai de compression, l'éprouvette est surfacée pour assurer la planéité et le parallélisme des surfaces en contact avec la presse. Ce surfacage est réalisé avec une rectifieuse à béton (Figure 2.8). Ce surfacage est réalisé à sec du fait de la sensibilité à l'eau des mélanges chaux/chanvre. Dans le cas des éprouvettes $M_{2\text{mod}}$, très fragiles, le surfacage est proscrit. Les éprouvettes on donc été moulées avec soin afin de s'affranchir de surfacage.

Après le surfacage nous mesurons le diamètre et la hauteur des échantillons pour connaître la taille initiale avant l'essai de compression.



Figure 2.8 Dispositif de surfaçage

b) Mise en place des essais

Avant de placer l'éprouvette sur le dispositif de l'essai compression, nous installons une chaînette équipée d'un extensomètre afin de mesurer les déformations orthoradiales, comme illustré figure 2.9.

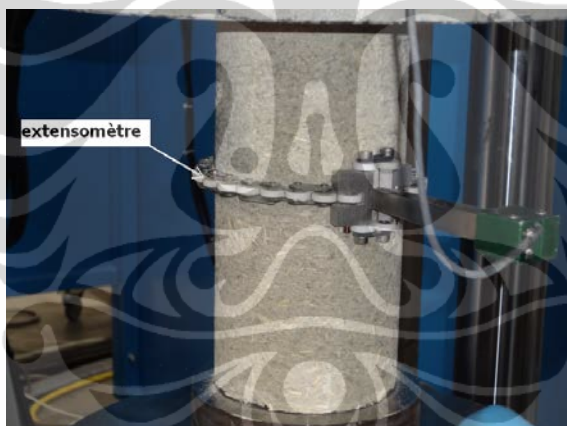


Figure 2.9 Positionnement d'un extensomètre

c) Dispositif de l'essai en compression

Le béton de chanvre n'est pas comme un béton classique : sa faible rigidité nécessite des appareillages relativement sensibles (sensibilité de l'ordre de 100 N). Le dispositif utilisé pour ces essais est une presse quatre colonnes Zwick HB 250 (figure 2.10), d'une capacité maximum en compression est 250 kN. Pour caractériser le comportement du béton de chanvre en compression les données acquises avec le logiciel Catman sont la force appliquée par la traverse (kN), déplacement axial de la traverse (mm) et déformation orthoradiale (%) obtenue avec la chaînette.



Figure 2.10 Machine Quatre colonnes Zwick HB 250

2.4.2 Processus de l'essai

Les essais de compression ont tous été réalisés à un âge des éprouvettes supérieur à 28 jours. Pour obtenir le comportement mécanique en compression des deux types de béton du chanvre (M_2 et M_{2Mod}) nous avons réalisé un essai de compression en chargement cyclique. 4 éprouvettes au minimum ont été comprimées pour chaque formulation.

2.4.3 Résultat (La caractérisation de mécanique du béton de chanvre en compression)

a. Caractérisation mécanique du béton de chanvre en compression

a) Béton de chanvre M_{2mod}

La figure 2.11 présente le résultat de l'essai sur une éprouvette. Les quatre essais réalisés sont répétables.

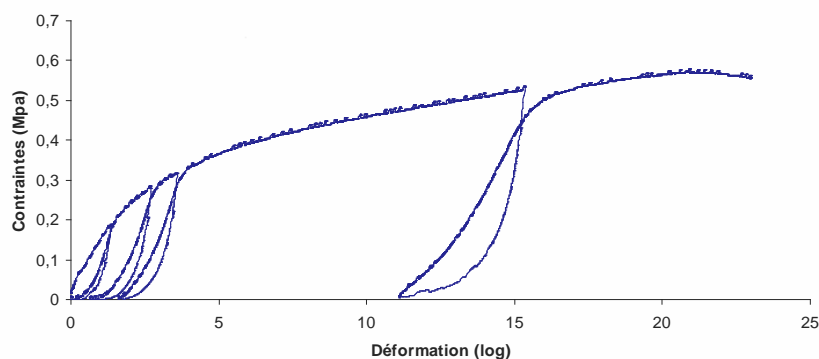


Figure 2.11. Courbe contrainte – déformation l'éprouvette M_{2mod}

Le béton de chanvre est un matériau poreux (pores intra-granulats et pores inter granulats). Le comportement mécanique en compression est influencé par la méthode de mise en œuvre (le dispositif et la méthode de compactage). Pour la formulation $M_{2\text{mod}}$, le compactage est manuel, donc faible. Ainsi le comportement en compression de l'éprouvette est relativement fragile pour un matériau de ce type. Sur la figure 33 nous pouvons observer que la rupture est atteinte pour une déformation logarithmique inférieure à 25 % et une contrainte inférieure à 0,6 Mpa avec une éprouvette après rupture très endommagée comme illustré figure 2.12.



Figure 2.12. Eprouvette $M_{2\text{mod}}$ en fin d'essai de compression simple.

Les éprouvettes $M_{2\text{mod}}$ présente une plus faible densité à cœur qu'en périphérie, comme observé sur les éprouvettes après rupture (figure 2.13).



Figure 2.13. Description l'éprouvettes M2 modifie

b) Béton de chanvre M₂

La formulation M₂ est la même formulation qui a été utilisée par Pierre Tronet (Tronet et al, 2010) avec le résultat de l'essai compression comme illustré figure 15 (chapitre 1, béton de chanvre 257 kg/m³ de chènevotte). Avec la même méthode de mise en œuvre et la même méthode d'essai nous avons le résultat de l'essai en compression comme illustré figure 2.14.

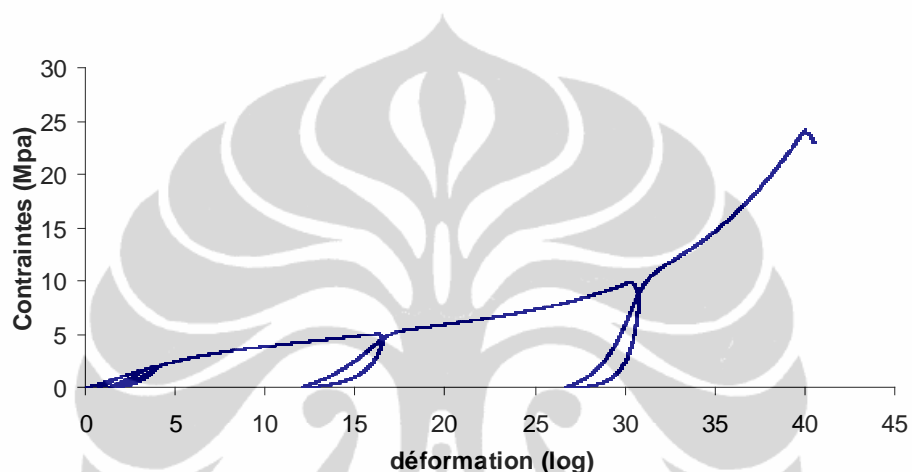


Figure 2.14 Courbe contrainte-déformation de l'essai de compression quasi-statique sur le béton de chanvre M₂

Comme déjà présenté par Nguyen précédemment (Nguyen, 2010) l'évolution des champs de déformation du béton de chanvre peut être distingué en quatre phases (chapitre 1 sub.2.1). Dans notre cas pour le béton de chanvre M₂ nous avons les mêmes résultats, mais nous notons que la Phase IV (phase la rupture) se passe seulement d'après l'analyse d'image avec ARAMIS parce que dans cette phase, la « peau » d'éprouvette est cassée donc ARAMIS indique une phase de rupture. Cependant, l'éprouvette n'est pas encore réellement rompue, mais continue à se densifier (figure 2.15).



Figure 2.15 Eprouvette M₂ en fin de l'essai de compression.

Sur la figure 2.15 nous pouvons voir que l'éprouvette n'est pas vraiment rompue, et présente très peu de déformation radiale : elle subit une compression axiale. Nous n'avons pas continué l'essai car la force de compression atteint 200 kN, c'est-à-dire presque la capacité maximum de la machine (250 kN).

c) Béton du chanvre M₄

Le béton de chanvre M₄ correspond à un fort compactage, avec un rapport de liant sur granulat (L/G) faible. Ceci induit un comportement en compression plus ductile. La figure 2.16 montre la relation contrainte/déformation d'après un essai en compression qui a été fait par Pierre Tronet (Tronet et al, 2010).

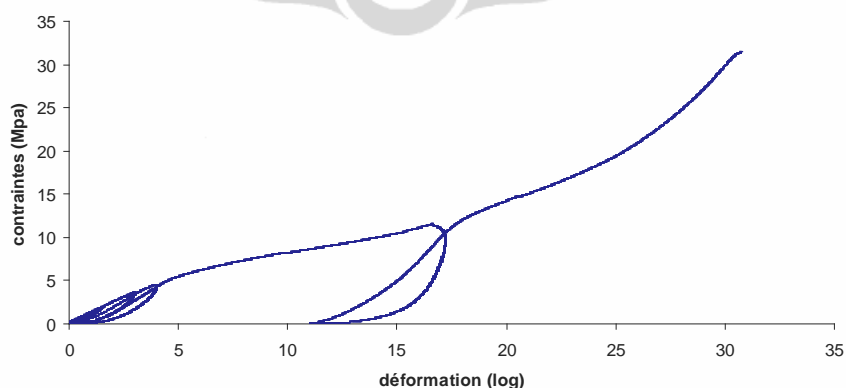


Figure 2.16. Courbe contrainte-déformation de l'essai de compression quasi-statique sur le béton de chanvre M₄

Le module d'Young (E), des éprouvettes est calculé en fonction du plus fort accroissement du rapport contrainte/déformation enregistré au début des sollicitations selon la même méthode de Nguyen (Nguyen, 2010) déjà utilisée. Le module d'Young de chaque type de béton de chanvre comme illustre figure 2.17.

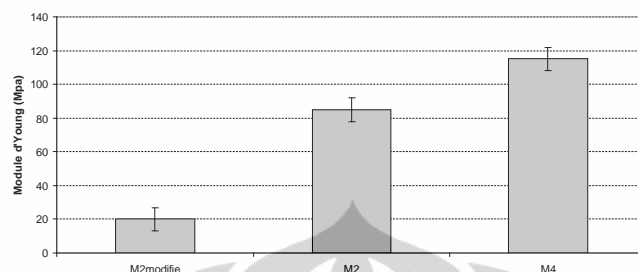
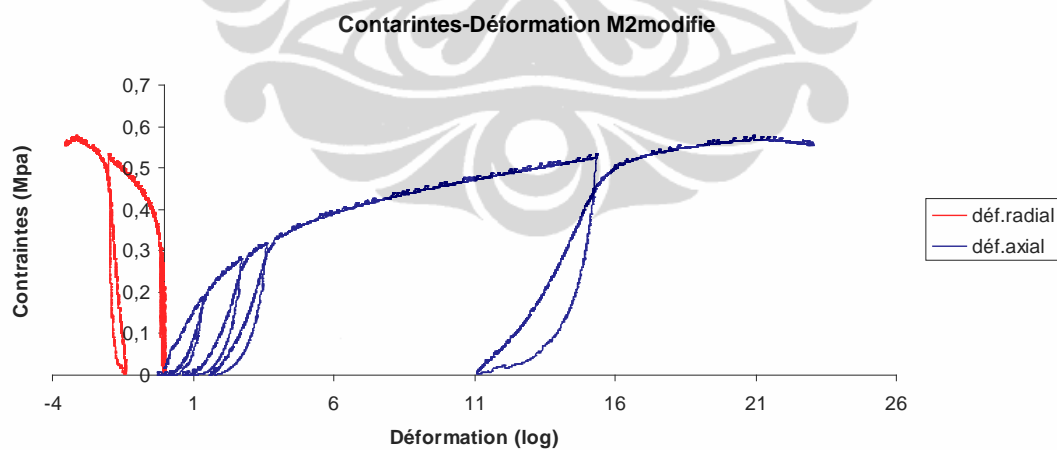
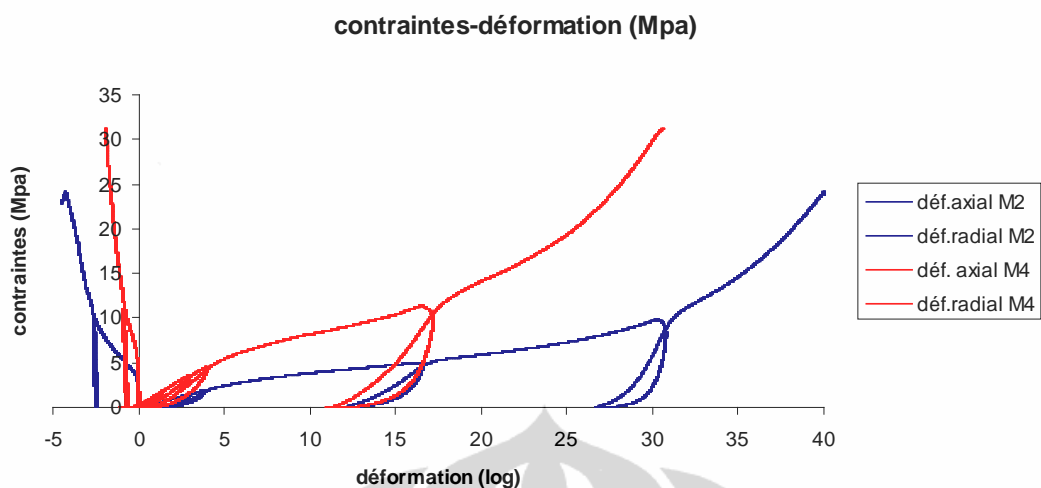


Figure 2.17. Le module d'Young béton de chanvre chaque type formulation

La déformation radiale du béton M4 est plus faible celle du M2 comme nous présentions dans figure 2.18 ce phénomène montre que béton de chanvre M4 est plus compacte. Au début de l'essai déformation radiale des nos éprouvettes est relativement petite.



(a)



(b)

Figure 2.18. Courbe contraintes (Mpa) en fonction déformation radial (%) et axial (log) formulation M2modifie (a), formulation M2 et M4 (b).

b. La comparaison de comportement mécanique des bétons de chanvre M2M, M2 et M4

Pour comparer le comportement en compression des nos éprouvettes. Figure 2.19 Nous comparons en considérant la contraintes résistances qui a correspondance de déformation 1.5% ($f_{c0.015}$) et 7.5 % ($f_{c0.075}$). Ces déformations de référence permettent de caractériser de manière satisfaisante le comportement mécanique des matériaux sur une plage de déformation limitée (0 – 15%) Nguyen (Nguyen, 2010).

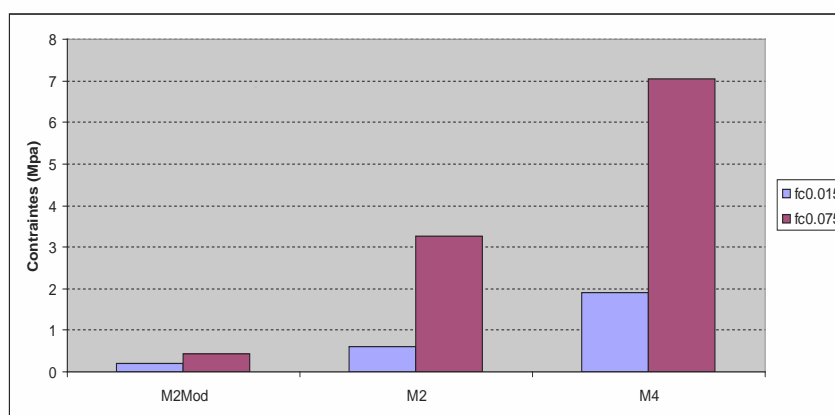


Figure 2.19. Description le différent contrainte chaque type béton de chanvre

Figure 2.10 nous pressentons la comparaison comportement mécanique en compression dont montre que l'effet de compactage est significatif. Nous rappelons que le différent de formulation du composant du béton de chanvre sur le rapport entre liant et granulat (L/G) soit ; M2 et M2modifie ont la même valeur est 1,4. Liant/Granulat pour M4 est 0,45. C'est-à-dire que l'effet de compactage est très dominant sur le comportement mécanique en compression.

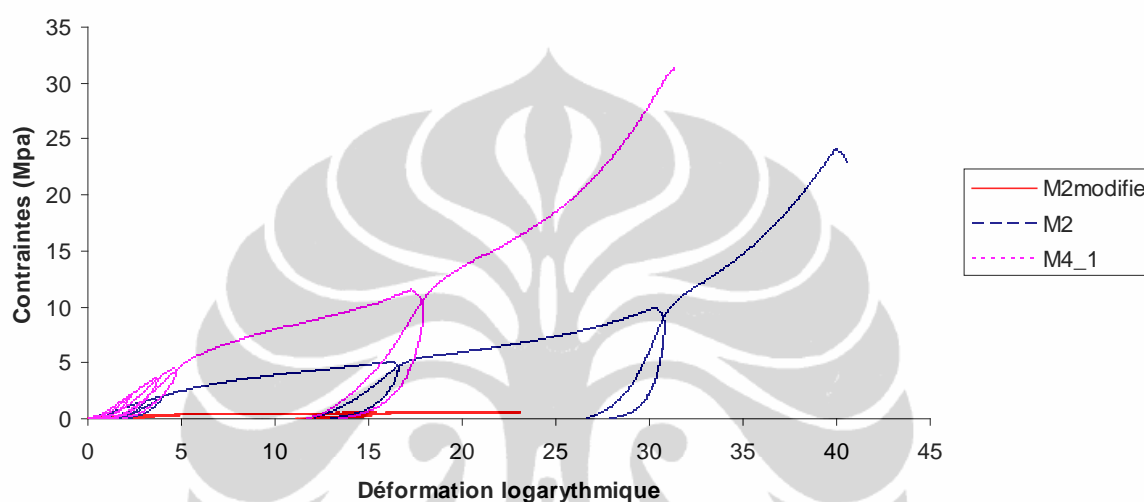


Figure 2.20 Courbe contrainte-déformation comparaison

2.5 Bilan

Les trois type de béton de chanvre que nous étudions ($M2_{modifie}$, M2, et M4) sont significativement de différents en comportement mécanique en compression et physiquement.

Le béton de chanvre M2 modifie a un comportement plus fragiles, une faible résistance ($f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$ soit 0,2 Mpa et 0,4 Mpa respectivement et phase rupture inferieur 0,6 Mpa), et est plus léger (masse volumique 380 kg/m^3), Il a aussi une faible lien inter-particules des chènevotte donc nous ne pouvons pas faire d'échantillon pour l'essai dynamique par carottage.

Le béton de chanvre M2 est plus compact, il a été réalisé en utilisant moule de PVC avec une pression de compression maximum 1,68 Mpa. Le lien inter-particulaire est plus fort donc il a été possible de réaliser des échantillons en carottage. La contrainte en compression $f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$ soit 0,6Mpa et 3,25Mpa

respectivement. Le module d'Young soit d'ordre 85 Mpa. La Masse volumique a l'état sec est de 734 kg/m^3 .

Physiquement, le béton de chanvre M4 est plus solide que M2 car il a été compacté à plus haut pression (6,86 Mpa) en utilisant un moule en acier. Il est possible de le carottage aussi bien en direction axiale que radiale. La contrainte en compression $f_{c0,015}$ et $f_{c0,075}$ soit 2 Mpa et 7 Mpa respectivement. Le module d'Young est de l'ordre de 115 Mpa. Sa masse volumique à l'état sec est de l'ordre de 875 kg/m^3



CHAPITRE 3

ESSAIS DYNAMIQUES SUR LE BETON DE CHANVRE AVEC LE DISPOSITIF DE BARRES D'HOPKINSON

À la différence des machines d'essai quasi-statiques, une barre de Hopkinson permet de déterminer les propriétés des matériaux dans des conditions dynamiques c'est à dire pour étudier la réponse de ce matériau sous chargement à vitesse élevée entre 400 et 2000 s⁻¹.

Le dispositif de barre d'Hopkinson du LimatB permet de choisir entre trois types de barres : acier, aluminium et barres viscoélastiques en Nylon (figure 3.1). Dans notre cas les éprouvettes de béton de chanvre ont des résistances inférieures à 6 Mpa donc nous utilisons les barres en Nylon de 50 mm de diamètre.



Figure 3.1 Le dispositif Barre de Hopkinson (LimatB)

En général le dispositif d'essai dynamique de barre de Hopkinson se compose :

- D'un cadre support des barres
- D'une série de barres (projectile, barre d'entrée et barre de sortie)
- D'un dispositif source de chargement (tube de compression et cylindre de lancement)
- D'un dispositif de mesure (Jauge de déformation, amplificateur, carte d'acquisition et ordinateur avec logiciel informatique de support)

Un dispositif complémentaire pour évaluer les résultats des mesures de déformation consiste en une camera rapide à haute définition, couplée au logiciel ARAMIS pour le traitement des images et l'obtention d'un champ de déformation au cours de l'essai.

3.1 Préparation des essais dynamiques aux barres de Hopkinson

3.1.1 Dispositif de l'essai dynamique aux barres de hopkinson

Dans la préparation du dispositif aux barres de Hopkinson nous nous assurons que les barres cylindriques sont rigoureusement alignées et coulissent librement. Les barres viscoélastiques sont décrites dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Propriétés des barres Nylon

Paramètre	Barre d'entrée	Barre de Sortant	Projectile
Diametre (mm)	50.4	50.4	40
Longueur (m)	3.095	1.999	1.001
Masse volumique (kg/m ³)	1758.2	1758.2	1140.4
Célérité (m/s)	1760.2	1760.2	1759.5
Nominal de déformation (V ⁻¹)	1.30 E-03	1.30 E-03	-
Dist.Jauge/Echantillon	1.506	0.5	-
Initial Force (N)	100 (N)	-	-
Filter frequency (kHz)	100	100	

Dans le processus de l'essai SHPB nous avons utilisé deux logiciels :

1. Vishay/LabView : Pour l'acquisition des jauges pendant l'essai aux barres
2. Photron FASCAM Viwer (PFV) : pour contrôler la caméra rapide

Pour le traitement des résultats il existe :

1. David pour le traitement et dépouillement des enregistrements d'ondes dans la barre.
2. ARAMIS pour traitement les images qu'a été enregistré par logiciel PFV en but calculé de déformation pendant dure l'essai.

Avant de faire l'essai SHPB avec l'éprouvette nous devons faire une série d'essais à vide pour obtenir une corrélation entre la pression de l'air dans le réservoir du canon et la vitesse du projectile. D'après la loi de comportement des éprouvettes en essai quasi statique nous pouvons prédire la force que nous appliquons aux barres et estimer la pression d'air à utiliser.

3.1.2 Préparation des échantillons

Comme nous l'avons présenté précédemment dans chapitre 2. Nous avons trois types d'éprouvettes de béton de chanvre (tableau 3.2). En général les échantillons pour l'essai dynamique en barre de Hopkinson sont de forme cylindrique. Au cours de l'essai leur diamètre "d" doit demeurer égal ou légèrement inférieur à celui des barres. De manière à annuler les effets d'inertie, sa hauteur "L₀" peut s'approcher de la valeur définie comme suit (Longere, 1995) :

- SAMANTA

$$\frac{L_0}{R_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot v_p \quad (3.1)$$

- DAVIES et HUNTER

$$\frac{L_0}{R_0} = v_e \cdot \sqrt{3} \quad (3.2)$$

- CREA

$$\frac{L_0}{R_0} = 2,3 \quad (3.3)$$

Avec

L₀ : Longueur d'échantillon

R₀ : Rayon d'échantillon

v_e : Coefficient de Poisson de l'échantillon

Dans notre cas nous faisons les éprouvettes en moulage dans des moules PVC pour les éprouvettes M_{2mod}. Pour les éprouvettes M₂ et M₄, les éprouvettes des essais dynamiques sont usinées dans des éprouvettes identiques à celles du

chapitre 2. La taille des éprouvettes est choisie entre la valeur qui a été proposée par DAVIES et HUNTER et la valeur proposée par CREA. En adaptant le diamètre de la barre Nylon qui est disponible (50 mm) nous choisissons un diamètre d'échantillon de 47 mm < 50 mm, et une longueur de 35 mm:

a. Echantillons de type M_{2Mod}

Les éprouvettes M_{2mod} réalisées pour les essais quasi statiques sont très friables donc nous ne pouvons pas extraire d'échantillon par carottage ou usinage. Un petit moule PVC a donc été utilisé, comme illustré figure 3.2. De même que dans le chapitre précédent, l'échantillon étant très friable, il faut s'assurer dès le moulage d'une bonne planéité et d'un bon parallélisme entre les surfaces de contact lors de l'essai. Dans l'essai dynamique nous indiquons l'échantillon M_{2mod} sous la référence M2M_x (x : numéro d'échantillon).



Figure 3.2 moules en PVC pour réaliser l'échantillon essai dynamique M2M

b. Echantillons de type M_2 et M_4

Pour ces formulations, un usinage (carottage à la scie cloche ou fraisage, Figure 3.3) est possible. Afin d'évaluer l'effet de l'anisotropie du béton de chanvre compacté sur le comportement dynamique nous avons fait des carottages dans l'axe de compression et perpendiculairement à cet axe. Au préalable, les éprouvettes de 10 cm x 20 cm ont été débitées à la scie à ruban. (Figure 3.3)



Figure 3.3 machines pour couper l'éprouvette



Figure 3.4 Les dispositifs d'usinage

La nomenclature des échantillons M_2 pour l'essai dynamique est $M2_x$ en axial $M2R_x$ en radial, et pour M_4 est $M4_x$, en axial et $M4R_x$ en radial. Pour indiquer la position d'échantillon dans la grande éprouvette nous utilisons la cotation $MXYZ$, par exemple $M421$ correspond à la formulation M_4 , l'éprouvette numéro 2, de carottage 1 (première couche de la partie haute de l'éprouvette) comme illustré figure 3.5.



Figure 3.5 Position des échantillons avant usinage

Nous avons besoin d'indiquer cette position d'échantillon dans la grande éprouvette car souvent la densité n'est pas homogène dans les grandes éprouvettes du fait des frottements à la paroi de la matrice de compression.

Le tableau 3.2 liste les principales caractéristiques des différents échantillons réalisés. Dans ce tableau nous avons trouvé qu'il y a inhomogénéité sur la densité des les échantillons à partir d'un même grande éprouvette.

Tab. 3.2. caractéristiques des éprouvettes pour les essais dynamiques

Serie	Serie SHPB	Diametre (mm)	Longeur (mm)	Densité (kg/M3)	Direction carottage	Etat stockage	
M2M1	M2M1	46.74	34.41	362	Moulage	humide	
M2M2	M2M2	46.85	34.13	364			
M2M3	M2M3	46.61	34.57	366			
M2M4	M2M4	47.05	34.33	360			
M223	M2_1	47.05	34.01	693	Carrotage Axial	humide	
M243	M2_2	46.97	33.8	787			
M222	M2_3	47.08	33.82	783			
M241	M2_4	47.04	34.35	834			
M221	M2E_1	46.72	32.07	728		sèche/étuve	
M242	M2E_2	46.66	33.98	782			
M211	M2R_1	46.8	34.8	755		Carrotage Radial	humide
M212	M2R_2	46.8	33.65	769			
M213	M2R_3	47	34.97	705			
M254	M2R_4	47.03	35.19	695			
M251	M2RE_1	46.98	33.62	679	sèche/étuve		
M252	M2RE_2	46.65	34.37	716			
M253	M2RE_3	46.95	35.26	671			
M421	M4_1	46.32	31.98	894	Carrotage Axial		humide
M422	M4_2	46.35	34.66	903			
M424	M4_3	46.53	32.63	806			
M425	M4_4	46.42	29.11	792			
M431A	M4R_1	47.67	40.13	815	Carrotage Radial		
M431B	M4R_2	47.38	38.06	851			
M432B	M4R_3	47.59	40.55	846			

Enfin les éprouvettes sont mouchetées de peinture noire pour les mesures de champs à la camera rapide (Figure 3.6)



Figure 3.6 La peinture de l'échantillon

3.2 Mise en place d'essais dynamiques

Pour réaliser un essai de compression aux barres de Hopkinson, nous plaçons l'échantillon à tester entre deux barres élancées, et instrumentées par des jauges de déformation. La déformation axiale de barre son mesurées par jauge placées au milieu de la barre entrante et à 500 mm du bout de la barre sortante. Le pont est alimenté par un courant de 2Volts et les signaux amplifiés avec des gains allant de 125 à 2500. La variation relative de la résistance et la déformation de la jauge sont proportionnels avec un coefficient appelé facteur (k) de jauge égal a 2.1, à température ambiante. Les signaux sont enregistrés par une carte d'acquisition 14bits et à 8 voies d'entrées avec une base de temps de 1 μ s.

3.2.1 Mode opératoire de l'essai aux barres de Hopkinson

a. La calibration du système

La calibration du système permet de régler la sensibilité des ponts de jauges extensométriques. Les tensions de sortie recueillies par les jauges de déformation sont converties en déformation. Les relations entre tension et déformation s'écrivent :

$$\varepsilon_A(t) = Y_A U_A(t) \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_B(t) = Y_B U_B(t)$$

Y_A , Y_B sont les coefficients de calibration exprimés en V^{-1} .

U_A , U_B sont les tensions de sortie des jauges extensométriques exprimés en Volts.

La détermination des coefficients de calibration peut être réalisée par essai à vide.

b. L'essai barre d'Hopkinson

Les étapes dans l'essai aux barres de Hopkinsons ont présentées en annexe.

3.2.2 Dépouillement du résultat des l'essai en utilisant logiciel DAVID

En utilisant le logiciel DAVID nous pouvons faire le dépouillement pour obtenir les résultats des essais. Les processus de dépouillement à l'aide logiciel David sont:

- Open David file (.tra et .ref)
- Edit parametre ; entrer et valider le caractéristiques de dispositif et entre le fichier .BAN
- Waves; cutting ; calibration ; transport
- Results ; strain stress & other ; export Files.

Nous pouvons voir les résultats en forme d'une graphique comme illustre figure 3.7

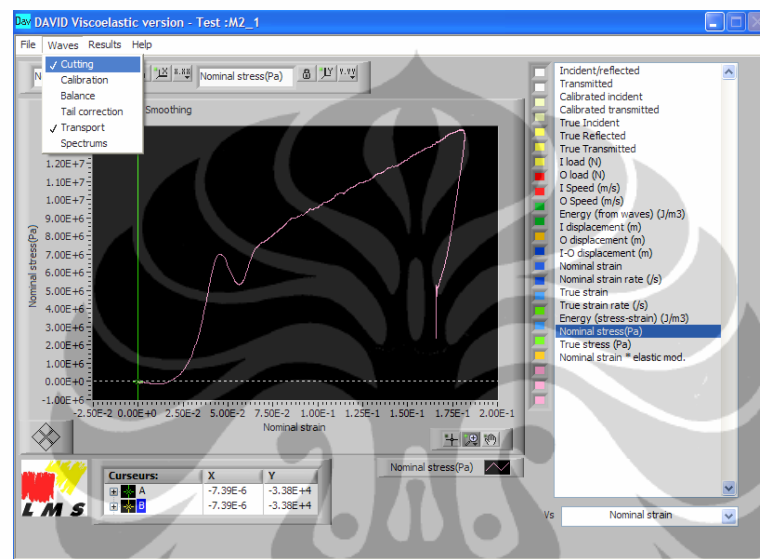


Figure 3.7 Visualisation le résultat de dépouillement par logiciel DAVID

Figure 3.7 illustre le courbe de contraintes nominale en fonction de la déformation nominale. Nous pouvons voir aussi les autres courbes comme dans la liste de DAVID.

3.2.3 Dépouillement du résultat des l'essai en utilisant logiciel ARAMIS

La mesure de déformation pendant l'essai aux barres de Hopkinson peut aussi se faire en utilisant l'image qui a été enregistrée par la camera rapide et ensuite analyser en utilisant le logiciel ARAMIS. Le résultat du dépouillement avec ARAMIS est la courbe déformation (log) en fonction du temps. Ce résultat est comparé avec la résultat de dépouillement en utilisant le logiciel DAVID (annexe3).

En général, la déformation en analyse par ARAMIS et DAVID sont en accord au début de l'essai. Ce phénomène montre que l'utilisation d'ARAMIS pour la mesure de la déformation est limitée à la période de temps pendant laquelle l'intégrité de l'échantillon est complète.

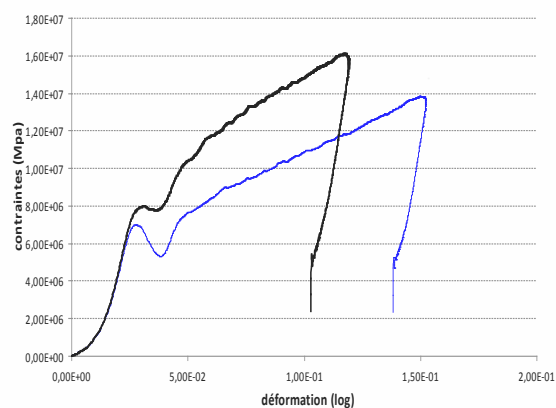
3.3 Résultat

Les motivations des expérimentations sur béton de chanvre dans ces parties sont :

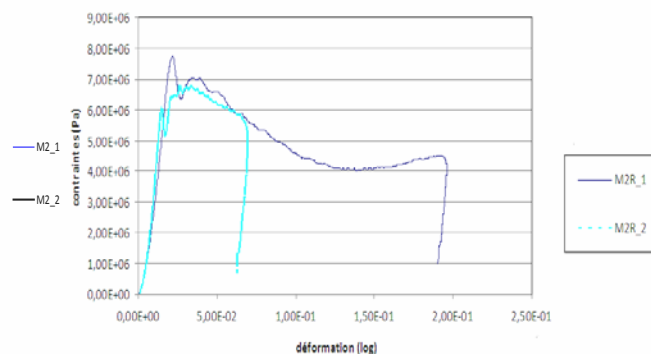
- comparer le comportement du béton de chanvre sous chargement quasi statique et chargement dynamique (pour étudier la sensibilité à la vitesse de déformation).
- voir l'effet de la teneur en eau du béton de chanvre (humide et sec) sous chargement dynamique.
- connaître l'effet de la direction de chargement par rapport de la direction de compactage sous chargement dynamique.

Nous présentons certaines courbes de contrainte nominale en fonction de déformation pour illustrer ces comparaisons.

Tout d'abord nous présentons les résultats de chaque groupe d'essais, c'est à dire pour une même pression de tir. Chaque type d'échantillons est testé au minimum deux fois comme nous le présentons dans tableau annexe 3.



(a)



(b)

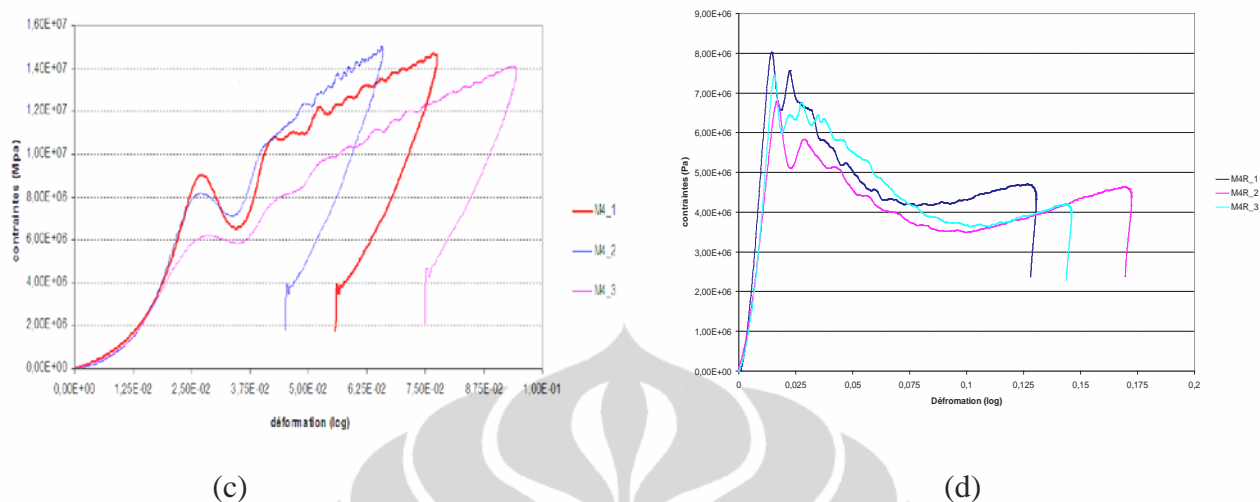
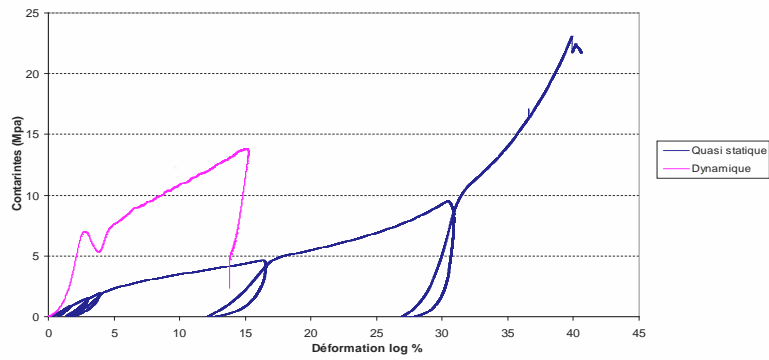


Figure 3.8 Courbe contraintes-déformation, essais de répétabilité sur les échantillons M2 (a), M2R (b), M4 (c), M4R (d)

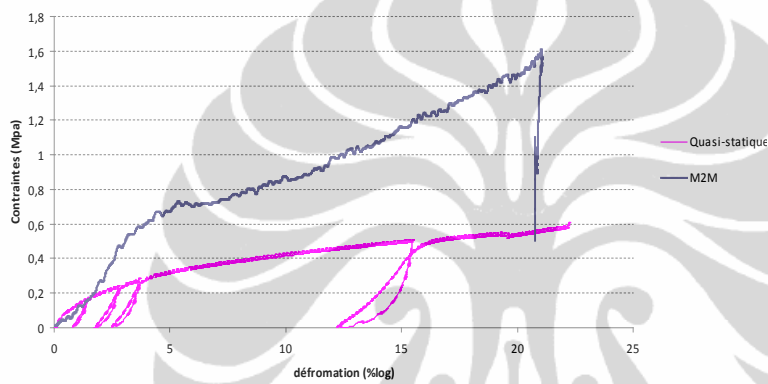
La répétabilité (figure 3.8) des essais est excellente pour une déformation inférieure à 2,5% pour les échantillons en carottage axial et inférieure à 1,25% pour les échantillons en carottage radial. Au-delà de ces valeurs de déformation, la répétabilité devient moins bonne, avec des écarts significatifs (pour les essais en carottage axial $\pm 12,5\%$, et pour en carottage radial $\pm 10\%$)

3.3.1 La sensibilité à la vitesse de déformation du béton de chanvre

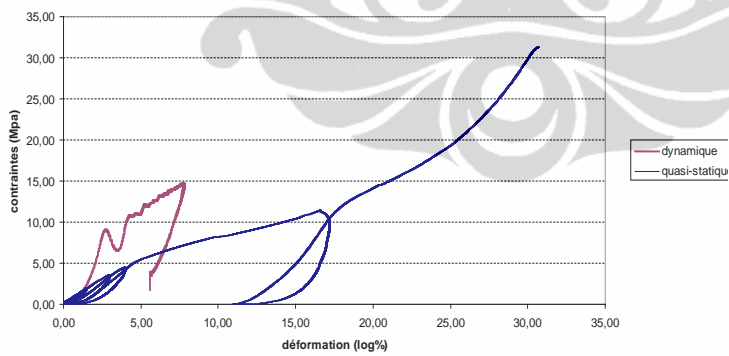
Dans le cadre de la comparaison du comportement mécanique en compression de béton de chanvre sous chargement quasi statique et chargement dynamique, nous comparons la courbe contraintes-déformation sous les deux types de chargement pour un échantillon en carottage axial.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.9 Courbe contraintes-déformation l'essai Quasi statique comparaisons avec l'essai dynamique de l'échantillon M2 (a), M2M (b) et M4 (c)

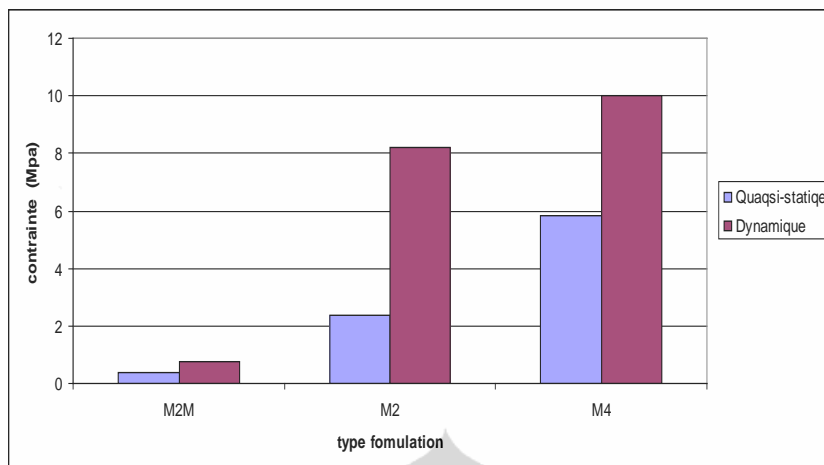


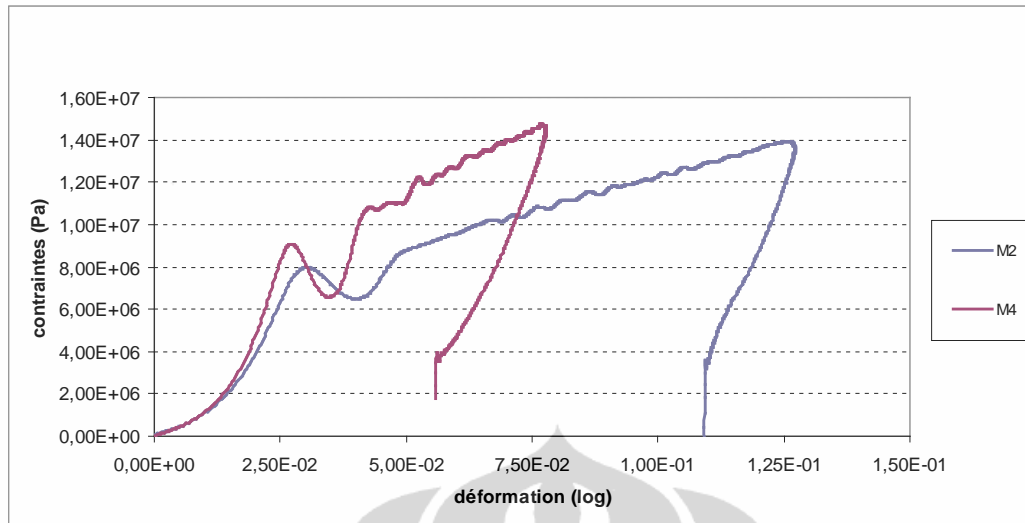
Figure 3.9 Comparassions contrainte moyenne résistance sous chargement quasi-statique et dynamique à la déformation 5%

Figure 3.9 et 3.10 nous montrons que la résistance mécanique en compression du béton de chanvre sous chargement dynamique est plus élevée 2 fois, 4 fois et 1.5 fois sont respectivement M2M, M2 et M4.

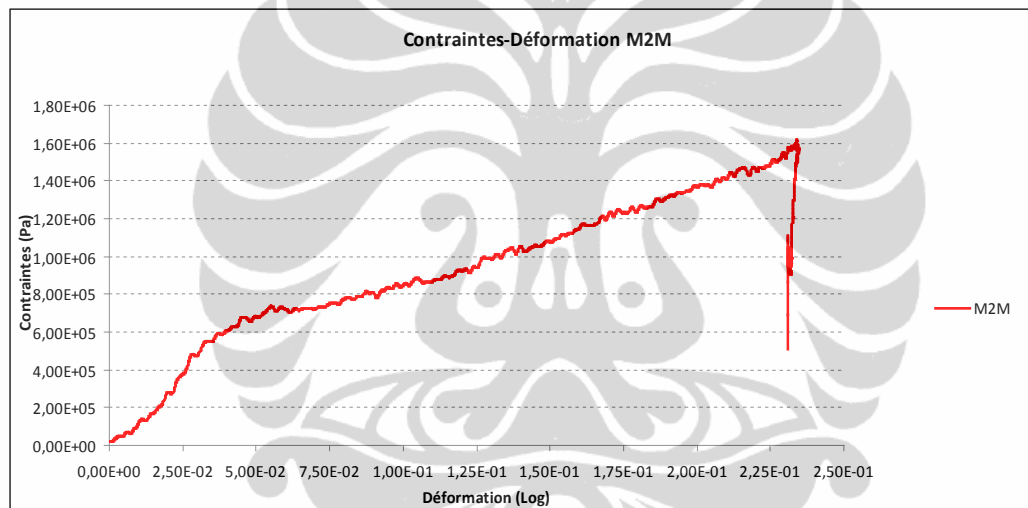
La vitesse de déformation des les essais quasi-statique en compression sont 0.26 s^{-1} , 0.046 s^{-1} et 0.045 s^{-1} pour béton de chanvre M2M, M2 et M4 respectivement. Dans les essais dynamique la vitesse de déformation sont 225 s^{-1} , 150 s^{-1} , 150 s^{-1} pour béton de chanvre M2M, M2 et M4 respectivement.

3.3.2 L'effet du compactage

Pour observer l'effet de compactage sous chargement dynamique, nous comparons les trois type d'échantillon base sur type de la formulation du Composant béton de chanvre soit M2M, M2 et M4.



(a)



(b)

Figure 3.11 courbe contrainte déformation sous chargement dynamique, (a) M2 et M4 (b) M2M

Figure 3.11 Nous pouvons voir en comparant les réponses des bétons M2M, M2 et M4 que l'effet du compactage est très important, avec un niveau de contrainte croissant avec le niveau de compactage et une contrainte multipliée par 15 pour une déformation de 0,05 entre le béton M2M et M4, une contrainte multipliée 1,2 entre le béton M2 et M4.

3.3.3 L'effet de séchage béton de chanvre

Comme nous l'avons présenté précédemment, les éprouvette sont stockées dans une salle à humidité contrôlée (HR 75%, 20⁰C), cet état de stockage permet de conserver constante la teneur en eau des échantillons. Pour observer l'effet d'une teneur en eau plus faible, nous considérons un béton de chanvre M2. D'après l'évolution de l'humidité au cours d'un essai de séchage, nous déterminons une humidité relative initiale de 9% selon la formule suivante :

Percentage humidite (%) = $(\text{masse initial}-\text{masse final}) \times 100 / \text{masse final}$

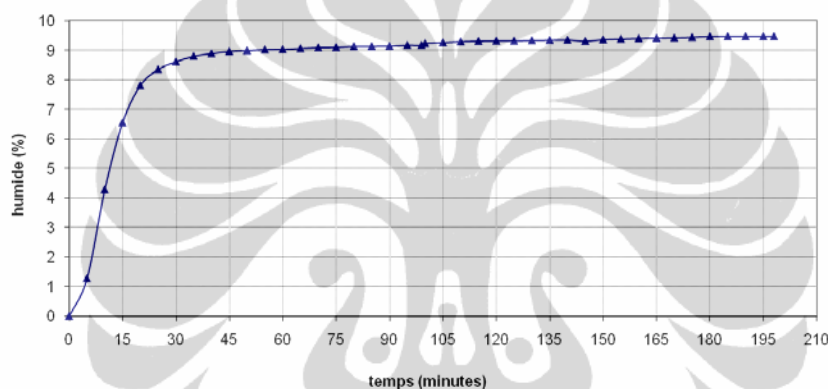


Figure 3.12 L'évolution de humidité au cours du temps sous température constants 115°C échantillon M2

Pour obtenir les échantillons qui ont une teneur en eau nulle nous laissons les échantillons dans une étuve à la température de 110⁰C pendant une semaine, jusqu'à ce que la masse soit constante.

Les essais dynamique réalisés sur 2 échantillons M2 (carottage axial) sont dénommés M2E et 3, respectivement pour les échantillons M2R (carottage radial) M2RE. Le résultat de l'essai est présenté figure 3.13.

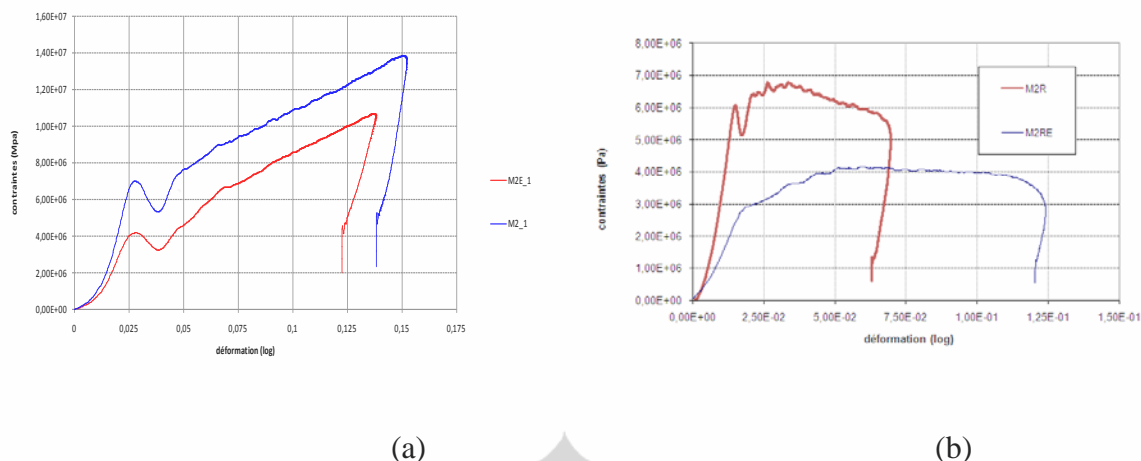


Figure 3.13 comparaison des courbes contraintes déformation entre M2 avec M2E (a), M2R avec M2RE

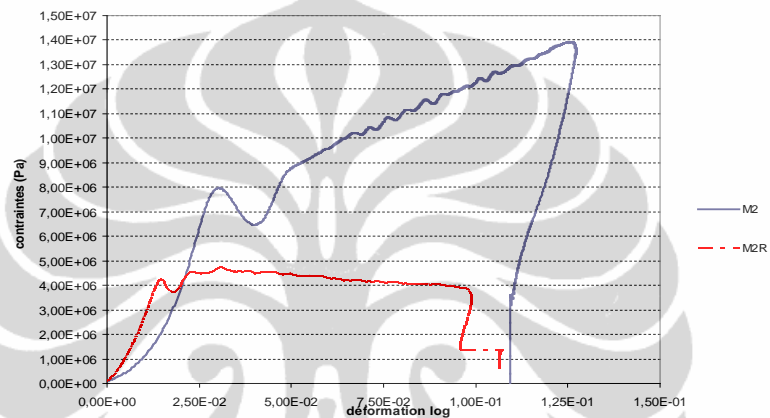
Le résultat des essais dans ce cas montre qu'il y a diminution des résistances de béton de chanvre en effet de séchage. Les valeurs contrainte résistance ($f_{c,0.05}$) sont 7.65 Mpa pour M2 , 4.6 Mpa pour M2E, 6.2 Mpa pour M2R et 4 Mpa pour M2RE.

3.3.4 L'effet de la direction de sollicitation

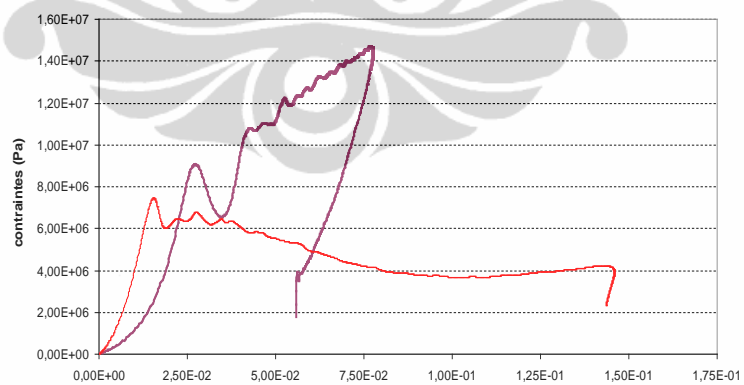
Les processus de compactage qui se fait dans une direction longitudinale en gendre inévitablement une orientation préférentielle des particules dans le plan perpendiculaire à la direction de compactage (Nguyen, 2010). Ce phénomène peut provoquer un effet d'anisotropie sur le comportement du béton de chanvre. Pour observer l'effet du sens de sollicitation nous réalisons des essais dynamiques sur des échantillons qui ont été faits en carottage radial sur béton de chanvre M2 et M4. La Figure 3.14 et 3.15 suivante illustre les différentes réponses obtenues entre les deux types d'échantillons (carottage axial et radial).



Figure 3.14 description l'échantillon qui se fait en carottage axial et radial



(a)



(b)

Figure 3.15 Courbe contraintes-déformation d l'essai dynamique comparaison entre l'échantillon carottage axial et radial M2 (a), M4 (b)

D'après figure 3.15 nous pouvons dire que il y a une forte différence de résistance en compression sous chargement dynamique du béton de chanvre ce qui montre un comportement anisotrope du béton de chanvre compacté. La contrainte résistance sous chargement dynamique (pour une déformation 5%) de l'échantillon carottage axial est plus élevée ± 2 fois que l'échantillon carottage radial.



CHAPITRE 4

CONCLUSION ET SUGGESTION

4.1 Conclusion

Le béton de chanvre est obtenu en mélangeant la chènevotte avec un liant à base de chaux et d'eau. Les recherches réalisées sur le béton de chanvre jusqu'à aujourd'hui portent davantage sur son comportement mécanique et ses performances en tant que matériau isolant thermique et acoustique. Aucune étude à ce jour n'a été menée sur le comportement dynamique de ce matériau.

La méthode d'essai dynamique utilisé au cours de ce stage est l'essai aux barres d'Hopkinson (Split Hopkinson Pressure Barre -SHPB). Les barres peuvent être en acier, en aluminium ou en Nylon. Le choix de la barre dépend du type de matériau à tester. Son impédance doit être proche de celle du matériau testé. C'est pourquoi pour le béton de chanvre nous avons utilisé une barre viscoélastique en Nylon. Les échantillons d'essais dynamiques sont extraits de grandes éprouvettes. Il est difficile d'obtenir des échantillons de même densité du fait de l'hétérogénéité des grandes éprouvettes, qui sont obtenues par moulage ou compactage.

En générale la résistance mécanique du béton de chanvre est plus haute sous chargement dynamique que sous chargement quasi statique. Le comportement du béton de chanvre sous chargement dynamique est influencé par plusieurs paramètres tels que la composition du mélange, la méthode de compactage, le stockage et la direction de chargement. D'après les résultats d'essais la méthode de compactage est la plus influente sur le comportement statique comme dynamique. La teneur en eau peut également influencer la résistance à la compression : le matériau est moins résistant aux charges dynamiques après séchage. Le comportement du béton de chanvre dépend aussi fortement de la direction de sollicitation. En effet, des différences significatives apparaissent entre un chargement suivant l'axe de compactage ou perpendiculairement à l'axe.

4.2 Sugestions

Le résultat que nous avons obtenu montre qu'il y a le différent autant que les essais sont répertoire. Il est difficile pour obtenir certaines échantillon qui sont

homogène donc nous ne pouvons pas caractériser le comportement dynamique qui représenté le comportement d'un type de formulation.

La méthode préparation d'échantillon en carottage peut être perturbe le comportement de béton de chanvre donc il est importance pour essayer trouve d'une méthode qui peut faire d'un échantillon sans perturbé.

La comparaison comportement mécanique en compression quasi-statique et dynamique est discutable car dans l'essai quasi statique nous faisons l'essai de grande éprouvette (10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur) donc il est intéressant pour faire l'essai quasi statique en compression avec petit échantillon qui a la même taille d'échantillon de l'essai dynamique.



BIBLIOGRAPHIE

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

Arnaud Lauren et Boyeux Bernar. (2011), *La chenevotte comme nouveau granulat écologique et performant pour une utilisation dans le bâtiment*, Copyright – académie d'Agriculture de France – 2011. Séance du 12 janvier. 9 p

Bacon. C. (1998), *An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic hopkinson bar*. Experimental Mechanics.

BOULOC, P. (2006), *Le Chanvre Industriel*. Éditions France Agricole, France.

Bouix. R. (2008), *Caractérisation mécanique et modélisation numérique du comportement des mousses polymériques sous sollicitation statiques et dynamiques*, Thèse, Faculté d'ingénieur, L'école national supérieure d'arts et métiers, Paristech, Mai 2008.171 p

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

Collet. F. (2004), *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de Génie Civil à faibles impacts environnementaux*, Thèse Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Décembre 2004, 220 p.

ELNASRI. I. (2006), *Comportement des matériaux cellulaires sous impact et de panneaux sandwichs sous perforation dynamique*, Thèse Génie Mécanique-Génie Civil ,L'école Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2006, 125 p.

FIDELIUS. S. (2008), *"Etude de la mise en œuvre du béton de chanvre pour la construction"*, Mémoire de stage, Ingénierie Mécanique et Génie Civil , Université de Bretagne-sud, Juin 2008. 90p

J.L. Hanus, B. Magnain, B. Durand, J. Alanis-Rodriguez, P. Bailly. (2008) *Dépouillement d'un essai de flexion dynamique aux barres de Hopkinson sur un matériau quasi-fragile*, Prisme, Université Centre Val de Loire, ENSI de Bourges, CSMA, Mai 2011. 2p

T.P.M. Johnson & S.S. Sarva & S. Socrate. (2010), *Comparison of Low Impedance Split-Hopkinson Pressure Bar Techniques in the Characterization of Polyurea*, Experimental Mechanics 50:931–940, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Published online: 29 October 2009

Michael A. Kaiser (1998). *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*, These Master of mechanical engineering, faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Mai 1998, 94 p

Kolsky H. (1949), *An investigation of the properties of materials at very high rates of Loading*. Proceeding of the Physical Society of London, B62, 676–700.

Longere. P. (1995), *Choix de la géométrie de l'échantillon de compression dynamique*, ECTA 95 R 090, Direction de la recherche et de la technologie (Délégation Générale pour l'Armement), juillet 1995, 46 p

J. Minet , A. Evrard. (2007), *Bétons de chanvre-chaux: Un matériau composite durable pour la régulation hygrothermique*, Symposium Proceeding Paper p 43, Lhoist Recherche et développement Architecture et climat – UCL, KMS Brussel, Novembre 2007

Nguyen.T.T (2010). *Contribution a l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*", Thèse Génie civil Science pour l'ingénieur, Université de Bretagne-sud, Janvier 2010, 168 p.

Periasamy. C. (2010), *A split hopkinson pressure bar apparatus for high strain rate testing of interpenetrating phase composites (IPC): Measurements and Modeling*, Thèse Master of Science, Auburn University, Alabama, 105 p.

Sawas. O, N. S. Brar and R. A. Brockman. (1997). *Dynamic Characterization of Compliant Materials Using an All-polymeric Split Hopkinson Bar*, Postdoctoral Fellow, N. S. Brar is Research Physicist, University of Dayton Research Institute, Dayton, OH 45469-0182 VOL.38 No.03, Novembre 1997.7p.

Tronet. P, Vincent Picandet, Thibaut Lecompte, et Christophe Baley. (2011), *Béton de chanvre : Effet du dosage en granulat sur les propriétés thermique et mécanique*, Comptes Rendus des JNC 17 – Poitiers 2011, Université Bretagne Sud, 2011. 11p.

Tran le. A. D.(2010), *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment*, Thèse Génie civil Science pour l'ingénieur, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Novembre 2010.221 p

Zhao. H. (1992), *Analyse de l'essai aux barres d'Hopkinson Application a la mesure du comportement dynamique des matériaux*, Thèse , L'école nationale des ponts et chaussées, décembre 1992, 100p

Ouvrages

(Association construire en chanvre, 2007)

« Construire en chanvre, règles professionnelles d'exécution » Collection recherche développement métier, ed° SEBTP

Liens Internet

(Balthazard Cotte Bâtiment) Disponible sur :

<http://www.balthazard.com/fr/index.html>

(Cerezo, 2005), Cérézo V, "*Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique*". *Resume Thèse Génie Civil: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005.*

Disponible sur :

http://flora.insa-lyon.fr/insa/jsp/login_anonymous.jsp?record=default%3AUNIMARC%3A133526

(Gueraiche, 2008), Larbi Gueraiche, "Mise au point du dispositif à barre de pression d'Hopkinson divisée (BPHD)", Disponible sur :

http://www.memoireonline.com/05/08/1142/m_mise-au-point-dispositif-barre-de-pression-d-hopkinson-divisee-bphd1.html

(MAISON.com) ; <http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php>

(Evrard A, 2002). Evrard A, "*L'utilisation du chanvre dans la construction*".

Novembre, 2002, 4 p . Disponible sur : <http://www.chanvre-info.ch/info/>

(Fruchard), Eddy Fruchard, "*Caractéristique du chanvre*", 3p.

Disponible sur : <http://boisetpaille.com>

(Tradical edition 2008) disponible sur le site d'internet :

<http://www.comptoir-ecologique>

Normandie.fr/site/assets/files/fiches/LesBetonsDeChanvreAvecTradical.pdf

ANNEXE

ANNEXE 1 : Donnes les échantillons de l'essai barre d'Hopkinsons

Serie	serie SHPB	Diametre (mm)	Longeur (mm)	Poids (gr)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Direction carottage	Etat stockage
M2M1	M2M1	46.74	34.41	21.4	1.72E-03	5.90E-05	362	Moulage	humide
M2M2	M2M2	46.85	34.13	21.4	1.72E-03	5.88E-05	364		
M2M3	M2M3	46.61	34.57	21.6	1.71E-03	5.90E-05	366		
M2M4	M2M4	47.05	34.33	21.5	1.74E-03	5.97E-05	360		
M223	M2_1	47.05	34.01	41	1.74E-03	5.91E-05	693	Carottage Axial	humide
M243	M2_2	46.97	33.8	46.1	1.73E-03	5.86E-05	787		
M222	M2_3	47.08	33.82	46.1	1.74E-03	5.89E-05	783		
M241	M2_4	47.04	34.35	49.8	1.74E-03	5.97E-05	834		
M221	M2E_1	46.72	32.07	40	1.71E-03	5.50E-05	728	Carottage Axial	sèche/étuve
M242	M2E_2	46.66	33.98	45.45	1.71E-03	5.81E-05	782		
M211	M2R_1	46.8	34.8	45.2	1.72E-03	5.99E-05	755	Carottage Radial	humide
M212	M2R_2	46.8	33.65	44.5	1.72E-03	5.79E-05	769		
M213	M2R_3	47	34.97	42.8	1.73E-03	6.07E-05	705		
M254	M2R_4	47.03	35.19	42.5	1.74E-03	6.11E-05	695		
M251	M2RE_1	46.98	33.62	39.55	1.73E-03	5.83E-05	679		
M252	M2RE_2	46.65	34.37	42.05	1.71E-03	5.87E-05	716		
M253	M2RE_3	46.95	35.26	40.95	1.73E-03	6.10E-05	671	Carottage Radial	sèche/étuve
M421	M4_1	46.32	31.98	48.2	1.69E-03	5.39E-05	894		
M422	M4_2	46.35	34.66	52.8	1.69E-03	5.85E-05	903	Carottage Axial	humide
M424	M4_3	46.53	32.63	44.7	1.70E-03	5.55E-05	806		
M425	M4_4	46.42	29.11	39	1.69E-03	4.93E-05	792		
M431A	M4R_1	47.67	40.13	58.4	1.78E-03	7.16E-05	815	Carottage Radial	
M431B	M4R_2	47.38	38.06	57.1	1.76E-03	6.71E-05	851		
M432B	M4R_3	47.59	40.55	61	1.78E-03	7.21E-05	846		

ANNEXE 2 : Les Etapes Dans L'essai Barre Hopkinson.

Pour commencer l'essai nous lançons le logiciel Lab view en click sur le symbole mozilla^R et en suite nous allons voir l'image comme figure 1.

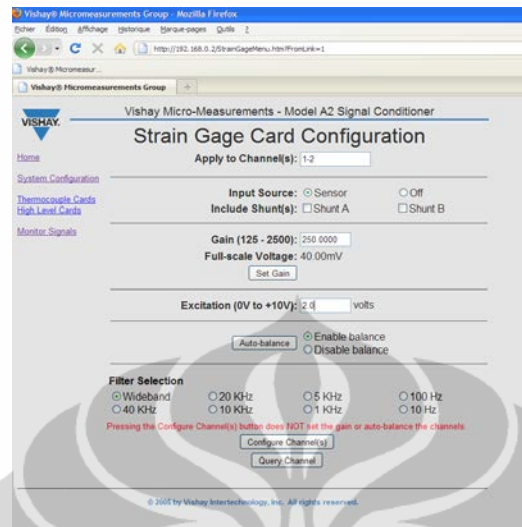


Figure 1. visualisation l'onglet Vishay de logiciel Lab view

Nous entrons de donne de paramètre de jauge sur l'onglet de Vishay. En suit nous lançons le onglet avant manip figure 2.

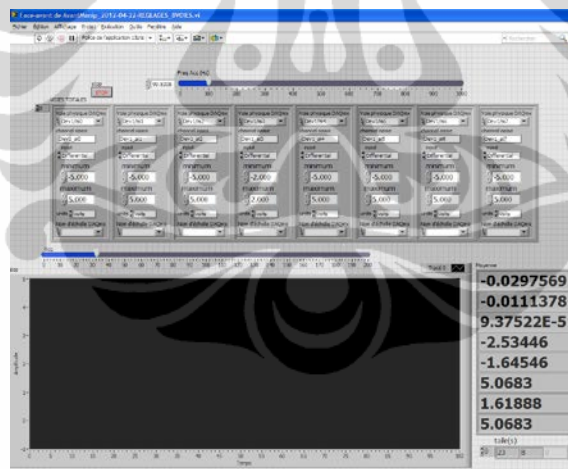


Figure 2 visualisations l'onglet Avant manip

L'onglet d'Avant manip nous utilisons pour tare le mesure de jauge jus qu'a prés que nulle.

En suit nous lançons le onglet face avant ACQUISITION figure 3.

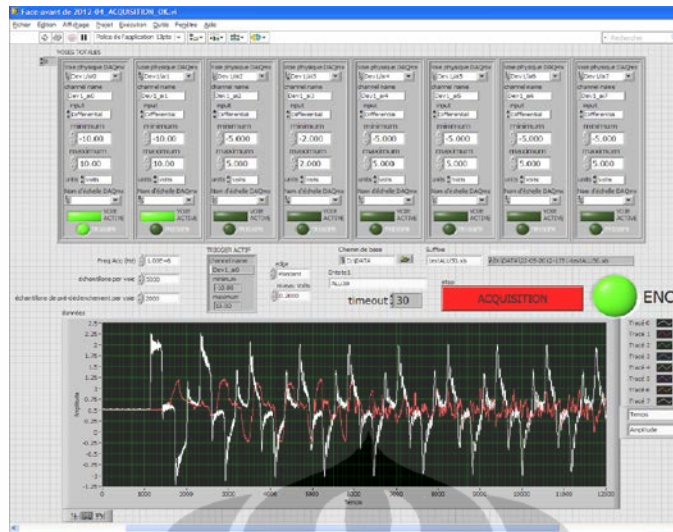


Figure 3 visualisations l'onglet face avant ACQUISITION

L'onglet d'acquisition a été utilisé pour régler l'enregistrement d'onde de déformation qui a été mesuré par jauge.

La source de chargement est l'air comprimé dans tube qui s'installe à la cylindre de lancement du projectile. Nous donnons l'air de comprimé ce dépend le force que nous souhaitons (en unité de compression en bar). Cette compression a relié à la vitesse de projectile. Dans le processus de chargement, nous click ACQUISITION → prépare la compression de l'air → valider le camera est prêt en click trigger → appuyer le bouton pour lancer de projectile.

En suit nous lançons le onglet POST Manip figure 4

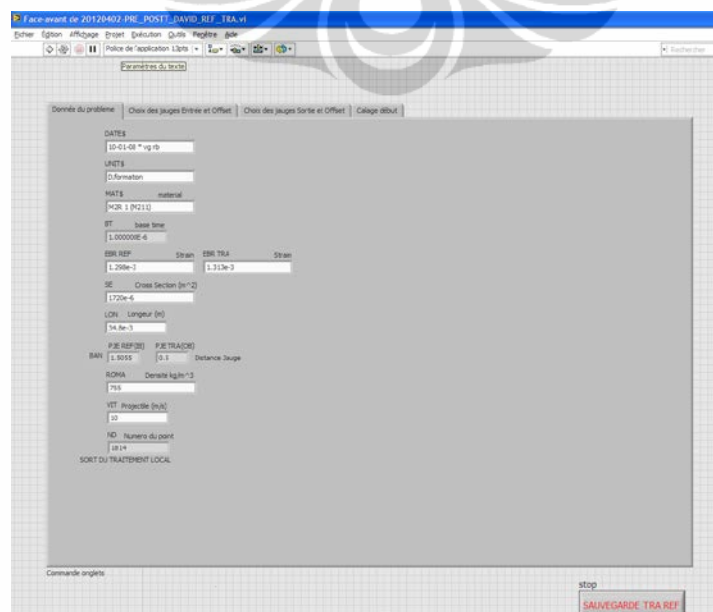
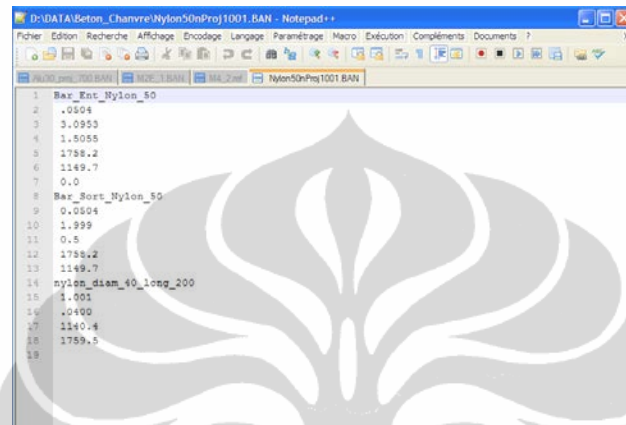


Figure 4 visualisations l'onglet Post manip

Pour faire le processus Post manip, nous avons besoin faire un dossier « .BAN » figure 5 qui se compose les données des barres et projectile ; diamètre de barre (m), longueur de barre (m), distant de jauges (m), masse volumique de barre (kg/m^3) et célérité matériaux de la barre (m/s).

Sur l'onglet de post manip nous entrons le données d'échantillon : de diamètre, longueur et leur poids.



```

1 Bar_Ext_Nylon_50
2 .0204
3 3.0953
4 1.5055
5 1758.2
6 1149.7
7 0.0
8 Bar_Sot_Nylon_50
9 0.0204
10 1.2899
11 0.5
12 1758.2
13 1149.7
14 nylon_diam_40_long_200
15 1.001
16 .0400
17 1140.4
18 1759.5
19

```

Figure 5 visualisations fichier « .BAN »

Les résultats des processus de Post manip sont deux classeurs ; point ref (.ref) et point tra (.tra) qui aurait été utilisé dans le processus dépouillement avec logiciel DAVID.

ANNEXE 3 : Données des échantillons d'essais de répétabilité

Serie	serie SHPB	Densité (kg/m ³)	pression de l'air (bar)
M2M1	M2M1	362	1.32
M2M2	M2M2	364	1.32
M2M3	M2M3	366	1.32
M223	M2_1	693	2
M243	M2_2	787	2
M222	M2_3	783	3
M241	M2_4	834	3
M221	M2E_1	728	2
M242	M2E_2	782	2
M211	M2R_1	755	2
M212	M2R_2	769	1
M213	M2R_3	705	1
M254	M2R_4	695	1
M251	M2RE_1	679	1
M252	M2RE_2	716	1
M253	M2RE_3	671	1
M421	M4_1	894	2.5
M422	M4_2	903	2.5
M424	M4_3	806	2.5
M425	M4_4	792	2.5
M431A	M4R_1	815	1.5
M431B	M4R_2	851	1.5
M432B	M4R_3	846	1.5

ANNEXE 4 : Courbe déformation en fonction du temps, dépouillement par ARAMIS et DAVID (jauge)

