



HAL
open science

Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne

César Niyigena

► **To cite this version:**

César Niyigena. Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22700 . tel-01487057

HAL Id: tel-01487057

<https://theses.hal.science/tel-01487057v1>

Submitted on 10 Mar 2017

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

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

N° DU : 2700

Année 2016

N° ED SPIC : 760

Université Blaise Pascal-Clermont II

**Ecole Doctorale
Sciences pour l'ingénieur de Clermont Ferrand**

Thèse
Présentée par :

César NIYIGENA

Pour obtenir le grade de :

Docteur de l'université Blaise Pascal

Spécialité : Génie Civil

**Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des
caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne.**

Soutenue publiquement le 03 juin 2016 devant le jury :

M. Vincent PICANDET	Rapporteur	Université Bretagne Sud
M. Christophe LANOS	Rapporteur	Université de Rennes 1
M. Mohamed SONEBI	Examineur	Queen's University of Belfast (UK)
M. Sofiane AMZIANE	Directeur de thèse	Université Blaise Pascal
M. Alaa CHATEAUNEUF	Co-Directeur de thèse	Université Blaise Pascal

Table des matières

Dédicaces.....	VI
Remerciements.....	VII
Résumé.....	VIII
Abstract.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Etude bibliographique.....	6
Introduction.....	6
1.1 <i>La culture du chanvre et son utilisation.....</i>	<i>6</i>
1.1.1 Chanvre : plante annuelle.....	6
1.1.2 Historique de la culture chanvre.....	7
1.1.3 Caractéristiques morphologiques des composants du chanvre.....	8
1.1.3.1 La tige de chanvre.....	8
1.1.3.2 Fleurs, feuilles et grains de chanvre.....	9
1.2 <i>Chènevotte et ses propriétés.....</i>	<i>10</i>
1.2.1 Procédure commune pour la caractérisation de la chènevotte.....	10
1.2.1.1 Stockage et séchage de la chènevotte avant essais.....	11
1.2.1.2 Echantillonnage par quartage.....	11
1.2.2 Masse volumique en vrac.....	12
1.2.2.1 Mesure expérimentale de la masse volumique en vrac.....	13
1.2.3 Capacité d'absorption d'eau.....	13
1.2.3.1 Mesure expérimentale de la capacité d'absorption d'eau.....	13
1.2.4 Conductivité thermique.....	14
1.2.5 Analyse granulométrique.....	15
1.2.5.1 Tamisage mécanique.....	15
1.2.5.2 Analyse d'image.....	16
1.2.5.3 Vidéogranulomètre (VDG 40).....	18
1.2.5.4 Tamisage jet d'air (alpine).....	19
1.3 <i>Liants.....</i>	<i>20</i>
1.3.1 La chaux.....	20
1.3.1.1 Propriétés mécaniques.....	21
1.3.2 Le ciment.....	22
1.3.2.1 Propriétés mécaniques.....	22
1.3.3 Liant pouzzolanique.....	23
1.3.4 Les mélanges chaux-pouzzolane.....	23
1.3.5 Batichanvre.....	24
1.4 <i>Propriétés du béton de chanvre.....</i>	<i>24</i>
1.4.1 Propriétés physiques et mécaniques.....	24
1.4.1.1 Masse volumique.....	24
1.4.1.2 Contrainte maximale de compression.....	25
1.4.1.3 Module d'Young.....	26
1.4.2 Propriétés thermiques.....	27
1.5 <i>Mesure des propriétés du béton de chanvre.....</i>	<i>31</i>
1.5.1 Essais sur éprouvettes de béton de chanvre.....	31
1.5.1.1 Types d'éprouvettes.....	31
1.5.1.2 Essais de compression simple.....	32
1.5.2 Détermination du module.....	33
1.5.2.1 Introduction.....	33
1.5.2.2 Chargement monotone.....	33
1.5.2.3 Chargement cyclique.....	34
1.6 <i>Facteurs influant sur les performances du béton de chanvre.....</i>	<i>36</i>
1.6.1 Mode de fabrication ou de mise en œuvre.....	37
1.6.2 Nature et quantité des constituants.....	38
1.6.2.1 Influence de la formulation.....	38

Table des matières

1.6.2.2	Influence de la nature du liant.....	40
1.6.2.3	Influence du chanvre	42
1.7	<i>Variabilités des matériaux</i>	47
1.7.1	Introduction.....	47
1.7.2	De la prise en compte des propriétés des composants à la variabilité des caractéristiques d'un matériau.....	47
1.7.3	Conclusion.....	50
1.8	<i>Conclusions et démarche de l'étude</i>	51
1.8.1	Conclusions.....	51
1.8.2	Démarche ou stratégie de l'étude.....	51
Chapitre 2: De la caractérisation expérimentale à la sélection de la chènevotte.....		55
	Introduction.....	55
2.1	<i>Types de chanvre étudiés</i>	55
2.2	<i>Etude expérimentale intra-caractéristique</i>	57
2.2.1	Masse volumique en vrac.....	57
2.2.2	Capacité d'absorption d'eau	58
2.2.3	Granulométrie.....	61
2.3	<i>Comparaison multicritère</i>	63
2.3.1	Corrélation entre les paramètres.....	64
2.3.2	Présentation des critères sur une échelle de comparaison	65
2.3.2.1	Principe de l'échelle.....	66
2.3.2.2	Limites de l'échelle	66
2.3.3	De la classification à la sélection des chanvres	66
2.3.3.1	Chanvres de catégorie 1	68
2.3.3.2	Chanvres de catégorie 2	68
2.3.3.3	Chanvre de catégorie 3.....	69
2.3.3.4	Un regard sur les résultats du RRT3	70
2.3.4	Choix et sélection des chanvres	72
2.4	<i>Conclusion</i>	73
Chapitre 3: Variabilité des propriétés des bétons de chanvre.....		75
	Introduction.....	75
3.1	<i>Matériels et méthodes utilisées</i>	75
3.1.1	Caractérisation de la chènevotte	75
3.1.2	Fabrication des éprouvettes.....	76
3.1.2.1	Formule testée.....	76
3.1.2.2	Protocole de préparation du mortier	76
3.1.2.3	Confection des éprouvettes.....	76
3.1.3	Protocole d'essai de compression.....	77
3.1.4	Grandeurs évaluées.....	78
3.1.4.1	Valeur moyenne et écart-type.....	78
3.1.4.2	Valeur caractéristique	79
3.1.4.3	Coefficient de variation (CV)	79
3.1.5	Tests statistiques.....	79
3.1.5.1	Test d'appartenance à une population.....	80
3.1.5.2	Test t de Student.....	81
3.2	<i>Résultats et analyses</i>	83
3.2.1	Reproductibilité des résultats selon les laboratoires d'essais.....	84
3.2.1.1	Masse volumique	85
3.2.1.2	Contrainte de compression	87
3.2.1.3	Module d'Young.....	88
3.2.2	Reproductibilité des résultats entre les gâchées.....	90
3.2.2.1	Contrainte maximale de compression.....	90
3.2.2.2	Module d'Young.....	91
3.2.3	Impact du type de chènevotte.....	91
3.2.3.1	Masse volumique	91
3.2.3.2	Contrainte maximale de compression.....	92

Table des matières

3.2.3.3	Module d'Young.....	93
3.2.4	Impact de la taille d'éprouvette	93
3.2.4.1	Masse volumique	93
3.2.4.2	Contrainte maximale de compression.....	94
3.2.4.3	Module d'Young.....	94
3.2.5	Corrélation entre les propriétés mécaniques	94
3.2.6	Synthèse des résultats.....	95
3.3	<i>Lois de distribution</i>	96
3.3.1	Masse volumique.....	96
3.3.2	Contrainte maximale de compression.....	98
3.3.3	Module d'Young	99
3.4	<i>Conclusions et perspectives</i>	100
Chapitre 4: Etude de l'impact de la méthode de calcul du module		102
	Introduction	102
4.1	<i>Contexte et paramètres de l'étude</i>	102
4.1.1	Caractéristiques de la chènevotte utilisée.....	103
4.1.2	Préparation d'éprouvettes pour les essais de compression	104
4.2	<i>Méthodes et stratégies de calcul du module</i>	104
4.2.1	Méthode flottante, tangente et cyclique	105
4.2.2	Ecrouissage et stratégies.....	106
4.3	<i>Réponse mécanique du béton de chanvre</i>	108
4.3.1	Selon la formulation	108
4.3.2	Selon l'âge du béton de chanvre	110
4.4	<i>Variabilité selon la méthode et l'âge du béton de chanvre</i>	112
4.4.1	Méthodes flottante, tangente et cyclique	112
4.4.2	Méthode d'écrouissage et différentes stratégies	116
4.4.3	Conclusion	121
4.5	<i>Proposition d'une loi de comportement mécanique du matériau béton de chanvre</i>	121
4.5.1	De l'intérêt d'une loi de comportement du béton de chanvre	121
4.5.2	Courbe expérimentale à chargement cyclique	122
4.5.3	Proposition d'une loi de comportement du béton de chanvre	122
4.5.4	Procédure d'identification des paramètres	125
4.5.5	Comparaison du modèle avec les courbes expérimentales	126
4.5.6	Conclusion	128
4.6	<i>Conclusions et perspectives</i>	129
Chapitre 5: Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre. 131		
	Introduction	131
5.1	<i>Contexte et paramètres de l'étude</i>	131
5.1.1	Caractéristiques des chènevotte utilisées	131
5.1.1.1	Teneur en eau à la fabrication	131
5.1.2	Préparation des éprouvettes.....	132
5.1.2.1	Fabrication des éprouvettes.....	132
5.1.2.2	Choix du type de malaxeur	132
5.1.2.3	Etiquetage des éprouvettes.....	133
5.1.2.4	Synthèse de la campagne d'essais.....	133
5.1.2.5	Formulation utilisée « type mur ».....	134
5.1.2.6	Remplissage des moules.....	135
5.1.3	Conditions de séchage.....	135
5.1.3.1	Séchage à l'air libre.....	135
5.1.3.2	Séchage à l'étuve.....	136
5.1.4	Protocole d'essai et méthode de calcul du module.....	137
5.2	<i>Résultats expérimentaux de l'étude</i>	137
5.2.1	Réponse mécanique selon le type de chanvre	137
5.2.2	Propriétés du béton de chanvre.....	139

Table des matières

5.2.2.1	Masse volumique	139
5.2.2.2	Contrainte de compression maximale.....	140
5.2.2.3	Module apparent et élastique	141
5.3	<i>Nombre d'éprouvettes statistiquement significatif.....</i>	<i>142</i>
5.3.1.1	Masse volumique après séchage.....	143
5.3.1.2	Contrainte maximale de compression.....	144
5.3.1.3	Module apparent.....	145
5.3.1.4	Module élastique.....	146
5.3.2	Conclusion	147
5.4	<i>Variabilité selon le type de chanvre utilisée</i>	<i>148</i>
5.4.1	Masse volumique (30j à 180j)	148
5.4.2	Contrainte de compression (30 à 180j).....	150
5.4.3	Module d'Young (30 à 180j)	151
5.4.4	Niveau de déformation (30 à 180j)	153
5.4.5	Conductivité thermique (30 à 180 jours)	154
5.5	<i>Variabilité selon le type d'éprouvette et la direction de compactage.....</i>	<i>155</i>
5.5.1	Masse volumique.....	155
5.5.2	Contrainte de compression	156
5.5.3	Module apparent et élastique	156
5.5.4	Conductivité thermique.....	158
5.5.5	Etude de corrélation	159
5.5.5.1	Contrainte de compression vs module.....	161
5.6	<i>Classification multicritère des bétons de chanvre</i>	<i>163</i>
5.6.1	Classification de différents types de béton chanvre	163
5.6.1.1	Béton de chanvre de groupe 1	164
5.6.1.2	Béton de chanvre de groupe 2	165
5.6.1.3	Béton de chanvre de catégorie 3.....	166
5.6.1.4	Conclusion	167
5.7	<i>Conclusions et perspectives.....</i>	<i>167</i>
5.7.1	Conclusions	167
5.7.2	Perspectives.....	168
	Conclusion générale et perspective	170
	Annexe A.....	174
	Annexe B.....	178
	Annexe C	181
	Annexe D.....	199
	Annexe E.....	203
	Bibliographie	204

Dédicaces

Je dédie ce travail de thèse à ma fille Léna, à mon épouse Alice et à mes parents.

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé de Décembre 2012 à Juin 2016 au sein du laboratoire Institut Pascal à Clermont Ferrand, et a été financé par la région d'Auvergne. Pour mener à bien ce travail de thèse, j'ai bénéficié d'un soutien de la part de différentes personnes auxquelles je souhaite adresser mes sincères remerciements.

En premier lieu, je tiens à remercier l'équipe de direction et d'encadrement. Merci à Professeur Sofiane AMZIANE mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il m'a témoignée en me choisissant pour travailler sur ce sujet. Je remercie également Professeur Alaa CHATEAUNEUF pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement sans faille.

Je tiens ensuite à remercier les membres du Jury qui ont accepté de rapporter et d'examiner mon travail de thèse. Merci à Vincent PICANDET MCF, HDR et à Professeur Christophe LANOS d'avoir accepté de rapporter mon travail de thèse. Merci à Dr Mohamed SONEBI pour avoir accepté le rôle de président du jury. Je tiens à souligner que j'ai apprécié et beaucoup appris du travail collaboratif effectué avec certains membres du jury, dans le cadre de travaux de recherche du comité technique RILEM 236 Bio-Based Building Materials.

Je remercie également Gaël GODI ingénieur responsable du Hall GC pour son aide dans la manipulation et l'utilisation des machines d'essais ainsi que les techniciens Philippe FARGEIX et Danyl CHANAL pour leur aide précieuse lors des travaux expérimentaux. Merci à l'ensemble de l'équipe pédagogique de Polytech' Clermont-Ferrand représentée par Professeur Pierre BREUL, pour leur aide et intégration qui m'ont permis d'accomplir avec succès ma mission de monitorat lors de cette thèse. Mes sincères remerciements envers cette même équipe pour m'avoir fait confiance à nouveau en me proposant un poste d'enseignant contractuel à la suite de ma thèse.

La vie en open space pendant trois ans et plus fut une expérience unique, caractérisée par des bons moments (pauses cafés doctorantes, sorties de temps en temps et bien plus) mais aussi des mauvais moments (stress, doute, parfois inquiétude insensée de ne pas pouvoir y arriver, etc.). J'ai vraiment eu la chance d'avoir des collègues sympathiques avec qui nous avons partagé ces moments, bons comme mauvais. Ils ont été là pour moi en cas de besoin de coup de main notamment pour les manipulations laborieuses. Merci à tous pour votre aide, l'ambiance et la bonne humeur : Amina, Abdoulaye, Bernard, Décroly, Mathilde, Mohammed, Maitham, Taher, Quock Ahn, Yassia, Hassen. Merci aussi à tous les autres doctorants du laboratoire surtout les nouveaux qui ont toujours gardé leur bonne humeur malgré le stress de la fin de thèse, je pense ici à Hugo, Hussam et Claude.

Je ne pourrais pas faire de bons remerciements si je ne remerciais pas ma famille qui m'a été d'un très grand soutien surtout moral malgré la distance qui nous séparait. Je remercie mon père et ma mère d'avoir été là pour moi durant l'ensemble de mes études et surtout pendant la thèse. Merci à mes frères et sœur ainsi que ma belle-sœur INGABIRE Marie Claire pour leur soutien moral.

Je remercie Alice, mon épouse, qui a été la personne qui m'a permis d'aller au terme de mon aventure. Merci pour son soutien inconditionnel, elle a su me remonter le moral pendant les moments difficiles et a été à l'écoute. Merci !

Pour finir, je remercie sincèrement la région d'Auvergne pour avoir financé ce travail de thèse.

Résumé

Les origines de la variabilité des propriétés du matériau béton de chanvre sont nombreuses. On distingue celles liées aux propriétés des ses constituants et du matériau lui-même auxquelles il faut ajouter les dispersions qui résultent des méthodes utilisées pour caractériser ce béton. Ce travail de thèse, s'intéresse à l'étude de la variabilité des propriétés du béton de chanvre en tenant compte de ces différentes sources et en particulier au type de chènevotte utilisée.

L'étude bibliographique réalisée permet de comprendre le matériau béton de chanvre, notamment ses constituants, les méthodes de caractérisations en usage ainsi que l'ampleur de la variabilité et de la sensibilité de ses propriétés vis-à-vis des différents paramètres. Cet état de l'art, permet en outre d'identifier les paramètres à considérer dans le cadre de cette thèse. Notre travail de thèse est alors subdivisé en 4 chapitres en plus de l'étude bibliographique.

Dans le deuxième chapitre, une étude multicritère sur les propriétés des chènevottes est présentée. Après une campagne expérimentale de caractérisation de 13 types de chanvre, une analyse des résultats à deux niveaux est réalisée. Elle prend en compte, la masse volumique, la capacité d'absorption d'eau et la granulométrie. Dans un premier temps on présente les résultats de l'étude mono-caractéristique ; il s'agit de la comparaison d'une caractéristique donnée pour l'ensemble des chènevottes. Dans un second temps, on présente les résultats de l'étude multicritère. Il s'agit d'analyser l'ensemble des chènevottes en prenant en comptes les différentes caractéristiques à la fois. A l'issue, les chènevottes sont classées en trois groupes.

Le chapitre 3 constitue une étude préliminaire tenant compte des différents paramètres sources de variabilités des propriétés du béton de chanvre, comme le laboratoire d'essai (équipements), la gâchée, la taille d'éprouvette et le type de chanvre. Les résultats obtenus montrent la nécessité d'étudier l'impact du type de la chènevotte. Par ailleurs, la dispersion considérable obtenue pour les résultats du module d'Young est vraisemblablement associée à sa méthode de calcul. Il devient alors important d'approfondir l'étude de son impact sur les valeurs du module d'Young obtenues.

Le chapitre 4 vise justement à étudier les méthodes de calcul du module d'Young. Les différentes méthodes de la littérature sont alors utilisées pour exploiter les courbes contrainte-déformation dont les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions. Les variabilités observées sur les résultats vis-à-vis de chacune des méthodes permettent alors de mettre en évidence leur impact et de proposer la méthode « flottante » comme étant la plus pertinente. Par ailleurs, un modèle permettant de décrire la loi de comportement mécanique du béton de chanvre est proposé. Il permet de déterminer la courbe enveloppe correspondant à la courbe expérimentale issue du chargement monotone, et permet également de reproduire la courbe expérimentale issue d'un chargement cyclique.

Dans le dernier chapitre, en se basant sur les résultats du chapitre 2, neuf types de chanvre ont été sélectionnés pour la confection des éprouvettes de l'étude. Dans les mêmes conditions (fabrication et essai), il a été mis en évidence expérimentalement l'impact de la chènevotte sur les propriétés mécaniques avec un facteur égal à 10 entre les valeurs faibles et élevées. La réponse mécanique caractérisée par des faibles (<5%), moyennes (>5% et <8%) et fortes (>8% et <20%) niveau de déformation a été mis en évidence. Ces variabilités, restent cependant moins marquées pour la conductivité thermique et la masse volumique du béton de chanvre.

L'étude met en évidence l'intérêt d'une étude approfondie sur l'interaction liant/chènevotte pour une meilleure compréhension de l'impact de la chènevotte sur le béton de chanvre.

Mots clés : *variabilité, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, béton de chanvre, chènevotte, granulats de chanvre, module d'Young, contrainte de compression, loi de comportement, loi de distribution statistique.*

Abstract

The origins of the variability of hemp concrete material properties are numerous. They include among others those related to the properties of its constituents and material itself as well as the methods used for their characterizations. This thesis is interested in the study of the variability of hemp concrete properties taking into account these different parameters and in particular the type of hemp particles used.

The literature review carried out allowed to present the hemp concrete material, the properties of its constituents, their methods of characterization and also the extend of properties variability and sensitivity due to various parameters. Furthermore, it allowed to identify the parameters to be considered in the context of this thesis. Therefore, this thesis is divided into four chapters in addition to the literature review.

In the second chapter, a multi-criteria study on the properties of hemp particles is presented. After an experimental study of characterization for 13 types of hemp particles, a two level analysis of result is performed. It takes into account the density, water absorption capacity and particle size distributions. First, the results of the single characteristic study are presented; it is about a comparison of a given characteristic for all hemp particles at the same time. Secondly, the results of the multi-criteria study are presented. In this last case, the analysis is carried out by taking into account all hemp particles and characteristics, both at the same time. The outcome of this study allowed to classify hemp particles into three groups from which, low, medium and high mechanical performances are expected, respectively.

Chapter 3 is a preliminary study taking into account various parameters as sources of variability for hemp concrete properties, such as the testing laboratory (equipments), the batch, the specimen size and hemp particles type. The obtained results highlight the need for further investigations about the impact of hemp particles type. Moreover, the considerable dispersion in the results of Young's modulus is likely associated with its calculation method. It then becomes important to deepen the study of its impact on the values of Young's modulus obtained.

The chapter 4 aims to answer the problem found on the method for calculating the Young's modulus. Various methods from literature are used to analyse the stress-strain curves from samples manufactured under the same conditions. The variability observed in results with respect to used method allowed to highlight their impact and to provide the floating method as the most pertinent since it presents less variability. In addition, a model to describe the mechanical behavior law of hemp concrete is proposed. It allows to determine the envelope curve which corresponds to experimental curve from the monotonic loading. It can also allow to reproduce the experimental curve from a cyclic loading.

In the last chapter, based on the results of chapter 2, nine types of hemp particles were selected for the preparation and manufacturing of specimens of the study. Under the same conditions (manufacturing and test), it has been demonstrated experimentally the impact of hemp particles on mechanical properties with a factor 10 between low and high values from obtained results. The mechanical response characterized by low (<5%), medium (>5% and <8%) and high (> 8% and <20%) level of deformation have been highlighted. These variabilities remain, however less marked for thermal conductivity and density of hemp concrete material.

This study highlights the interest of a comprehensive study on the interaction binder/hemp particles for a better understanding of the impact of hemp particles on hemp concrete.

Key words : *Variability, mechanical properties, thermal properties, hemp concrete, hemp particles, Young modulus, compressive strength, behavior law, statistical distribution law.*

Introduction générale

L'utilisation des éco-matériaux provenant des produits agricoles est une solution de plus en plus adoptée dans le domaine de la construction. En effet, comme tout autre domaine (transport, aéronautique, etc.), ce secteur doit faire face à la problématique des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à la raréfaction des matières premières, aux problématiques du recyclage et du développement durable.

A l'heure actuelle, l'usage des produits d'origine végétale comme matière première est une solution qui connaît un essor considérable dans beaucoup d'industries. Dans le domaine de la construction, les granulats d'origine minérale sont substitués par les granulats d'origine végétale. Nous pouvons citer à titre d'exemple, les broyats de tournesol ou encore de bois, et encore plus largement l'usage de la chènevotte (issue du chanvre).

Actuellement, la production française du chanvre provient d'une surface de culture d'environ 10 000 ha contre 120 000 ha au 19^{ème} siècle. D'après la tendance actuelle sur l'utilisation des granulats d'origine végétale et vu les atouts du chanvre (bilan CO₂ favorable, gestion de fin de vie facile, etc.), sa production devait augmenter au cours des années à venir. De ce fait, il est important d'avoir une bonne maîtrise de ce produit afin de garantir son utilisation à l'issue de sa production. *L'objectif de notre étude tel qu'il sera détaillé plus tard, est d'analyser l'impact de la variabilité de la chènevotte sur celle du béton de chanvre.*

Dans cette partie introductive, nous nous intéressons dans un premier temps, au contexte scientifique et économique de la thèse, ainsi qu'aux problématiques associés au développement durable. Il s'agit d'étudier l'impact de l'état actuel sur le réchauffement climatique et la raréfaction des matières premières. Compte tenu de ces enjeux environnementaux, il est essentiel d'examiner les solutions actuellement proposées pour la transition écologique basée sur l'utilisation des matériaux durables ou éco-matériaux.

Contexte scientifique et économique

Les chanvres produits en Auvergne ont un débouché dans le domaine de la construction et représentent ainsi une importance indéniable pour le développement de l'écosystème régional. Cependant, comme pour tout produit agricole, leur qualité peut être sensible au terrain de production (perméabilité du sol, minéralité, teneur organique, etc.), au climat (pluviométrie, ensoleillement, température) et au parcours agricole. Par conséquent, la variabilité de ces paramètres se traduit par l'irrégularité de la chènevotte produite.

Dans ce contexte, nous proposons d'étudier l'impact de la variabilité du granulats de chanvre sur les performances des bétons de chanvre vis-à-vis des recommandations et règles professionnelles en vigueur.

L'utilisation des granulats de chanvre dans la construction implique non seulement la garantie de leurs propriétés moyennes, mais surtout la maîtrise de leur dispersion, due à leur nature et mode de transformation. L'étude de sensibilité statistique permet d'évaluer l'impact de la variabilité des données d'entrée sur celle de la sortie, c.-à-d. du mode de comportement final du produit. Il est fort possible que certaines variabilités des granulats n'aient que peu d'influence sur les propriétés mécaniques et thermiques du béton de chanvre. Pour cela, notre travail porte sur l'étude de la relation entre les variabilités des propriétés des granulats et celles du béton de chanvre. Il s'agit de tenir compte des aléas sur la matière première et des incertitudes sur le mode de fabrication et de caractérisation.

L'aboutissement de la thèse permettra de mieux comprendre le rôle de la variabilité de la matière première sur les performances mécaniques, physiques et thermiques du matériau

béton de chanvre. Par ailleurs, l'intérêt direct de l'aboutissement de cette démonstration consistera en une plus grande viabilité économique de la production/transformation des chanvriers en circuit courts en Auvergne. Le gain en cycle de production (temps de transformation, transport, etc.) sera significatif s'il est possible de tolérer une certaine variabilité de granulats de chanvre. Plus précisément, il deviendra possible d'accroître le potentiel de production végétale et donc de la part de l'éco-construction, lorsque la fiabilité des bétons de chanvre sera mieux maîtrisée à travers des choix optimaux des composants sur des bases scientifiquement établies.

La confiance engendrée par ce type de démarche permettra aussi une meilleure assurabilité des constructions. Ce paramètre a d'ailleurs été identifié à maintes reprises comme étant un frein à l'expansion des marchés de granulats d'origine végétale.

L'impact économique de la filière chanvre en Auvergne sera alors une opportunité de création d'entreprises pour la 1^{ère} transformation des chanvres voire pour la réalisation d'unité de fabrication de parpaing, pour la confection de panneaux d'isolation en granulats de chanvre, etc. C'est de cette façon que notre étude s'intègre dans le sujet actuel sur les enjeux environnementaux du développement durable.

Enjeux environnementaux et développement durable

La révolution industrielle au 19^{ème} siècle a fait basculer notre société jusqu'à lors considérée comme artisanale en une société commerciale, industrielle et de consommation. Cette transformation a profondément affecté l'économie, la politique et la société. Ces transformations sont devenues de plus en plus néfastes à l'environnement. Pour limiter l'effet indésirable de ces transformations, un concept nouveau naît en 1987 lors de la commission Brundtland [1], celui du développement durable. Ainsi le rapport de cette commission définit ce terme comme suit : « le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Ce dernier s'appuie à la fois sur les domaines écologique, économique et socio-culturel. C'est-à-dire qu'il s'agit d'un développement à la fois écologiquement soutenable, économiquement efficace et socialement équitable.

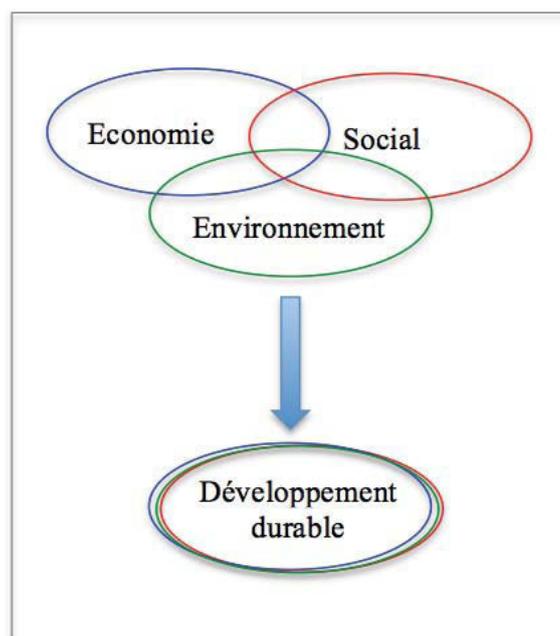


Figure 1-1: Principe du développement durable [2]

Cependant, les activités humaines sont considérées comme des menaces redoutables vis-à-vis de la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins. Ces menaces peuvent être nombreuses mais les plus dangereuses sont :

- Le réchauffement climatique, identifié aujourd'hui, par la majorité des scientifiques, comme une conséquence du rejet en quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, etc.) par les activités humaines. D'après [3], le terme gaz à effet de serre désigne « les constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge ».
- L'épuisement progressif ou la raréfaction des ressources naturelles (pétrole, gaz, granulats minéraux, etc.), dont certaines apparaissent pourtant à l'heure actuelle comme irremplaçables et indispensables au bon fonctionnement de notre société.

Avec l'objectif de faire face à ces menaces, quelques dispositifs (engagements, accords, etc.) ont été pris par les différents acteurs concernés, comme la communauté internationale et en particulier les pays développés.

Réchauffement climatique et engagements

La convention cadre des Nations Unies de 1992 [3] définit les « changements climatiques » comme « des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observé au cours de périodes comparables ».

En ce qui concerne le climat, les travaux scientifiques du GIEC¹ restent une référence. Dans le rapport publié par cet organisme en 1995 [4], il est conclu que « l'étude des preuves suggère une influence détectable de l'activité humaine sur le climat planétaire ». Deux ans plus tard, en s'appuyant sur ce rapport et sur la convention cadre des Nations Unies sur le réchauffement climatique [3], les débats des politiciens à l'échelle internationale se concluent par le protocole de Kyoto [5] signé par 160 pays. Ainsi, 38 pays industrialisés se sont engagés à réduire globalement entre 2008 et 2012 leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 5,2% par rapport au niveau de 1990.

L'actualité à ce sujet est la (COP-21)² du 30 Novembre au 12 Décembre 2015 à Paris. Suite à une augmentation d'environ 2 à 5°C d'ici 2100, la COP-21 devait initialement aboutir à un nouvel accord international sur le climat, applicable à tous les pays, avec l'objectif de maintenir le réchauffement climatique mondial en dessous de 2°C [6]. L'accord du samedi 12 décembre 2015 entre les 195 Etats participants à la conférence a été plus ambitieux que l'objectif initial. Il prévoit de le maintenir bien en dessous de 2°C et si possible poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1,5°C [7]. Cette initiative de la part des politiciens est encourageant dans la lutte contre le problème de réchauffement climatique. Cependant, elle est loin d'être suffisante. Par conséquent, d'autres solutions doivent être envisagées comme par exemple la transition écologique basée sur l'utilisation des énergies renouvelables et des éco-matériaux.

Transition écologique et matériaux durables

« Nous savons qu'il est possible de construire des sociétés soutenables au nord comme au »

¹ GIEC : Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

² COP-21 : 21^{ème} Conférence des parties à la convention –cadre des Nations Unis sur les changements climatiques et la 11^{ème} conférence des parties siégeant en tant que Réunion des parties au protocole de Kyoto (CRP-11).

sud, dans lesquelles l'homme vit en harmonie avec la nature. Pour que cette transition soit juste socialement, elle implique de réduire la surconsommation des plus riches pour que chacun puisse répondre à ses besoins fondamentaux et vivre dignement » [8].

L'ensemble des objectifs et mesures prises, veillent à la recherche et au développement de solutions nouvelles, moins énergivores tant pour leurs fabrications que pour leurs utilisations. Dans ce dernier cas, il s'agit de proposer les matériaux de construction capables de limiter la consommation en énergie de chauffage des bâtiments. En assurant un maximum de confort hygrothermique, acoustique et de l'air intérieur sain avec un minimum d'impact sur son environnement. Les matériaux composites bio-sourcés semblent répondre à ces exigences et offrent en plus une facilité dans la gestion de leur fin de vie.

Afin de satisfaire les exigences indiquées ci-dessus, il est important de choisir un matériau bien adapté. Compte tenu de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) (figure 1-2), les matériaux d'origines végétales semblent être une solution optimale et offrent divers avantages :

- ressources renouvelables : comparées aux autres matériaux comme le béton classique dont les carrières sont épuisables, les ressources d'origines végétales sont inépuisables tant qu'il existe des facilités et des moyens pour cultiver.

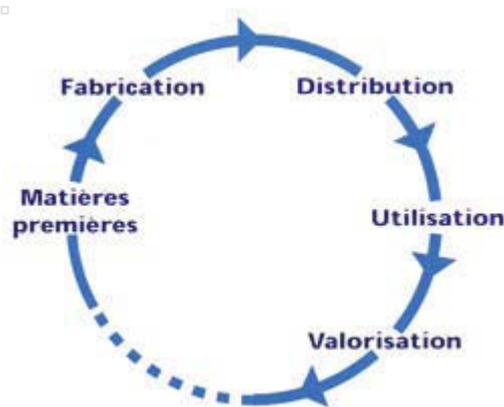


Figure 1-2: le cycle de vie d'un produit [9]

- faible énergie grise³ : les matériaux d'origine végétale ont une énergie grise faible ; par exemple sur la figure 1-3 le béton de chanvre a 90 kWh/m³ d'énergie grise contre la brique pleine avec 1443 kWh/m³.

³ La somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la gestion de fin de vie (démolition ou élimination),

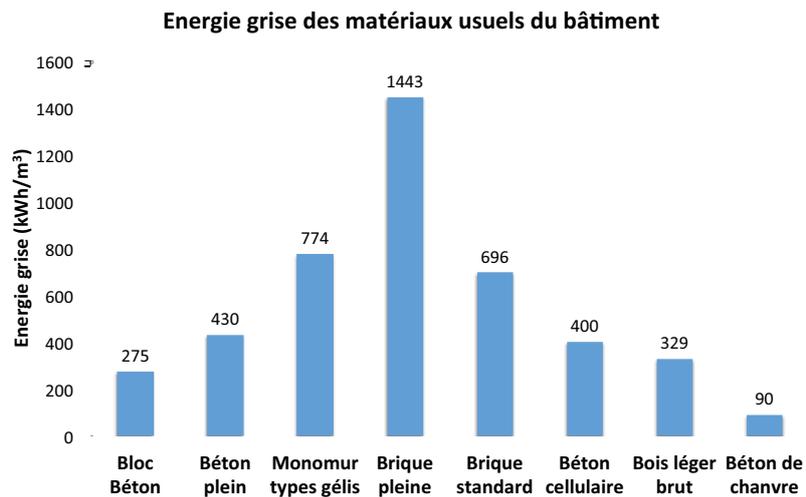


Figure 1-3: Quelques valeurs d'énergie grise pour les matériaux couramment utilisés dans le bâtiment⁴ [9].

- réduction des émissions nocives : les matériaux d'origine végétale, permettent une réduction des émissions de gaz à effet de serre, étant donné que leur croissance absorbe le CO₂ contenu dans l'atmosphère. Cependant, il convient de souligner que cette faculté se réduit considérablement pour les arbres adultes ; ceci n'est pas le cas pour le chanvre (plante annuelle), d'où son avantage incontournable. Dans la suite, nous allons nous intéresser à cette plante et à son utilisation pour la fabrication d'un matériau de construction connu sous le nom de « *béton de chanvre* ».

⁴ <http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php>

Chapitre 1: Etude bibliographique

Introduction

Cette étude bibliographique vise à présenter l'état actuel des connaissances sur l'utilisation du béton de chanvre, plus particulièrement sur la variabilité de ses performances vis-à-vis des constituants. Un intérêt tout particulier est porté à l'impact de la chènevotte. Ainsi, ce chapitre est divisé en trois parties principales: (i) la plante chanvre et ses applications, (ii) les liants, et (iii) le matériau béton de chanvre. Comme nous l'avons vu précédemment, le secteur du bâtiment doit faire face à la problématique du développement durable qui nécessite des solutions innovantes. Or, l'une des solutions envisageables réside dans l'utilisation des éco-matériaux dont fait partie le béton de chanvre. Nous nous intéressons dans un premier temps à la compréhension de la plante chanvre. Cette dernière est la source de la chènevotte, qui devient de plus en plus utilisable en construction, notamment pour ses propriétés hygrothermiques. Par la suite, nous nous intéressons aux types de liants. Ces derniers jouent un rôle essentiel, car mélangés à la chènevotte, ils permettent d'obtenir le béton de chanvre. Et enfin, le bilan sur les connaissances actuelles est effectué vis-à-vis du matériau béton de chanvre, notamment pour ses performances thermiques et mécaniques ainsi que les méthodes permettant de les mesurer. Dans ce même chapitre, nous nous intéressons à l'état de l'art sur les problématiques d'analyses de la variabilité sur les propriétés des matériaux communément utilisés dans le domaine du génie civil et de la construction. Ceci nous permettra alors d'adapter les méthodes et les outils utilisés sur le cas de notre matériau d'étude.

1.1 La culture du chanvre et son utilisation

1.1.1 Chanvre : plante annuelle

Le chanvre comprend trois espèces : *Cannabis sativa*–chanvre, *Cannabis indica*–chanvre, et *Cannabis ruderalis*–chanvre. Parmi celles-ci, seule la première est destinée à la culture du chanvre industriel. Elle se distingue des autres espèces par sa faible teneur en tétrahydrocannabinol (THC), moins de 2 %. En général, on trouve cette espèce en Europe et en Asie Centrale [10].



Figure 1-1: morphologie de la plante du chanvre [10]

Le chanvre (*Cannabis sativa* L.) est une plante annuelle de la famille des cannabinaées originaire d'Asie centrale. Cette angiosperme dicotylédone est cultivée depuis des millénaires

pour ses fibres et ses graines oléagineuses [11].

En général, la tige de chanvre mesure 2 à 4 m de hauteur pour un diamètre moyen variant de 1 à 3 cm. Sa morphologie est cependant très dépendante de l'espèce, des conditions environnementales et du stade de développement de la plante. La croissance du chanvre est assez courte, environ 4 mois [10].

1.1.2 Historique de la culture chanvre

Les premiers éléments sur l'utilisation du chanvre datant de l'époque Néolithique ont été découverts en Chine, alors que des analyses ont attesté de la présence du chanvre dans l'ouest de l'Europe dès les premiers siècles de notre ère [12]. Rencontré partout vers les années 1850, sa diminution ne cesse d'augmenter jusqu'à sa disparition en Europe vers les années 1960. La France reste alors le seul pays à garder une petite production. A la fin du siècle dernier, il y avait près de 176 000 ha de chanvre en France, on en cultivait dans presque toutes les régions. Il était beaucoup cultivé grâce à ses nombreuses applications, des vêtements et draps aux cordages et voiles pour la marine, ainsi que pour l'huile d'éclairage. Néanmoins, son importance va rapidement diminuer vers la fin du 19^{ème} siècle [13]. Le tableau 1-1 montre la diminution de la production du chanvre depuis 1830 jusqu'à 1914 ; pour les années 1890, 1891 et 1914, les tonnages prennent en compte le chanvre et le lin.

	1830	1840	1852	1862	1871	1889	1890	1891	1914
Ha	175000	176148	123352	100114	96395	53825	51990	51602	12500
Tonnes fibres ⁵		67507	64173	57433	49099	ND	61300	39500	32700

Tableau 1-1: Superficie et production de fibre de 1830 à 1914 [10].

L'importance du chanvre a rapidement diminué pour de nombreuses raisons : la disparition de la marine à voile, la concurrence par des fibres exotiques (coton, sisal, etc.) puis synthétiques, et enfin l'interdiction de sa culture aux Etats-Unis suivis par la plupart des pays occidentaux.

Toutefois, la France ne cessera jamais la culture du chanvre mais plutôt encadrera la production par la qualification des variétés cultivables⁶ et l'organisation des circuits de production. Ce qui lui permettra, non seulement de remettre en route une production industrielle à partir de 1973, mais aussi d'acquérir de nombreuses compétences. Elle est aujourd'hui le premier producteur européen avec près de 12 000 hectares de surface cultivée en 2012. De plus, la France dispose d'un organisme de sélection et de production de semence performant et efficacement opérationnel, des transformateurs et producteurs compétents et d'une expérience significative dans de nombreuses applications comme, par exemple, les matériaux de construction [13].

⁵ Cette série de chiffres est intéressante mais ne correspond pas au tonnage réel, le calcul est fait sur une production de fibres à l'ha de l'ordre de 1 à 2 tonnes de fibres. Compte tenu des surfaces, la production des fibres dépasse très certainement les chiffres présentés. Il faut donc penser à l'autoconsommation qui, par nature, est mal comptabilisée.

⁶ Près de 10 000 ha sont ensemencés chaque année avec des graines qui, conformément à la réglementation, produiront des plantes contenant au maximum 0,2% de THC, l'agent psychotrope du Cannabis. La CCPSC (Coopérative Centrale des Producteurs de Semences de Chanvre), membre de CenC, est pratiquement le seul producteur de semences européens.

1.1.3 Caractéristiques morphologiques des composants du chanvre

Le chanvre est une plante à feuilles palmées, qui possède une tige souvent non ramifiée pouvant atteindre en moyenne 2 à 3 mètres de hauteur. Ses racines sont trop développées et s'articulent autour d'une racine pivotante. Même si le chanvre est naturellement dioïque (fleurs mâles et femelle sur deux plantes distinctes), la plupart des espèces cultivées en France sont monoïques (fleurs mâles et femelles sur la même plante).

Dans cette partie, nous nous intéressons à la description des différentes parties du chanvre, à savoir : la tige, les fleurs et les graines.

1.1.3.1 La tige de chanvre

La tige de chanvre est composée de plusieurs tissus ou couches depuis son centre vers l'extérieur. En son centre, il y a un espace creux ou un trou comme indiqué sur la photo 1-1.

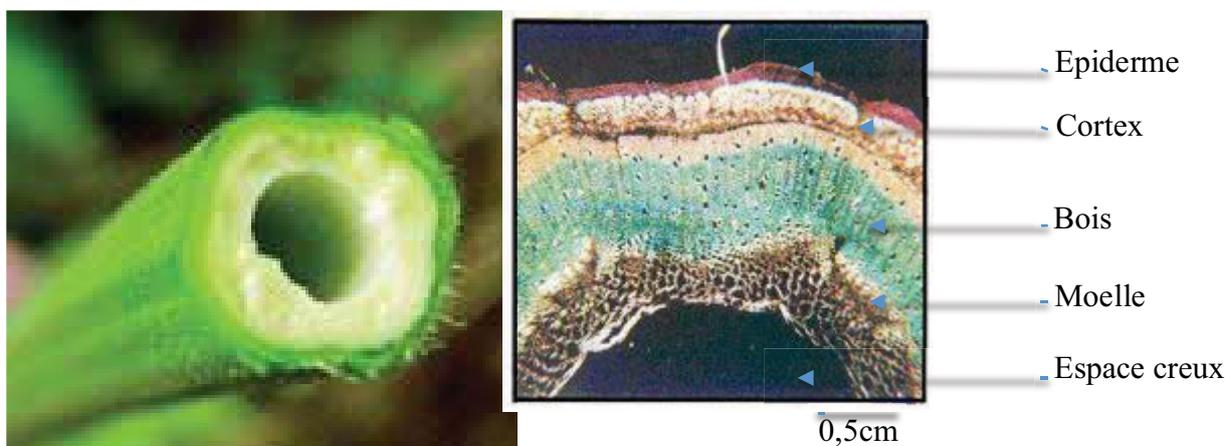


Photo 1-1: Tige de chanvre [14]

Figure 1-2: Micrographie d'une coupe transversale de la tige de chanvre colorée au carmino-vert de Mirande [15]

Cette structure est également retrouvée dans la tige de lin [16] ou dans l'une de ses diverses variétés [17]. Nous distinguons cinq parties essentielles (figure 1-2):

- **l'épiderme**, constitué d'une couche de cellules à paroi cellulosique ; il comprend une couche de nature lipidique en dépôt continu qui forme la cuticule ; ce dernier constitue la couche protectrice de la tige ;
- **le cortex**, qui contient les fibres corticales regroupées en amas (appelés faisceaux), eux mêmes englobés au sein de divers tissus ;
- **le bois**, qui est constitué de cellules de parenchyme, de fibres et de vaisseaux conducteurs ; *c'est cette partie de la tige qui produit la chènevotte utilisée en construction ;*
- **la moelle**, est constituée de parenchyme médullaire ;
- **l'espace creux**, appelé aussi lacune médullaire, ce dernier peut occuper plus de la moitié du diamètre, chez les plantes âgées.

Dans une étude conduite par B. F. Tjeerdsma et al. [18], il a été mis en évidence que la tige était composée pour 60% en masse par le bois et pour 40% par le cortex et l'épiderme. Grâce à un défibrage mécanique, on peut séparer les fibres et le bois, connu sous le nom de chènevotte. Ce sous-produit du chanvre est capable d'absorber l'eau jusqu'à trois ou quatre fois son poids initial [19]. Par conséquent, elle est utilisée comme litière pour les animaux.

Les particules de chanvre sont caractérisées par une faible masse volumique en vrac de l'ordre de 130 kg/m^3 et un pouvoir isolant élevé grâce à la constitution du bois, formé par des vaisseaux qui permettent la circulation de la sève. Après séchage, ces derniers se vident de la sève laissant ainsi une place à des alvéoles contenant de l'air, d'où le pouvoir isolant.

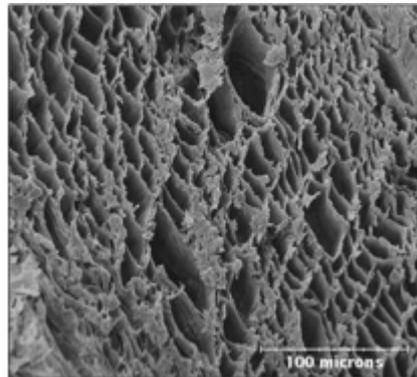


Figure 1-3: Micrographie de la partie boisée d'une tige de chanvre [20].

Quant à la fibre, elle est utilisée dans de nombreuses applications comme la papeterie pour la confection des papiers haut de gamme, l'isolation, la plasturgie en automobile remplaçant ainsi la fibre de verre et l'industrie du textile.

1.1.3.2 Fleurs, feuilles et grains de chanvre

La plupart des espèces de chanvre cultivées en France étant monoïques, les inflorescences femelles et mâles se retrouvent sur la même plante. Les fleurs mâles, composées de 5 sépales jaune-verdâtres, sont organisées en grappes disposées au niveau de la partie apicale des tiges. Tandis que les fleurs femelles sont regroupées au sommet des tiges. Ainsi les fleurs de chanvre sont utilisées en brasserie, ces dernières ajoutent un arôme fleuri, citronné et amer au goût de la bière [21].



a) fleur femelle



b) fleur mâle



c) feuille de chanvre

Figure 1-4: Fleurs et feuilles de chanvre

Les feuilles, illustrées sur la figure 1-4 c, combinées à la tige, sont utilisées pour les boissons chaudes, comme les tisanes au cannabis. Cependant celles-ci sont très peu chargées en THC, le principe actif de la "drogue" cannabis ; grâce à la variété de la culture et leur exposition au soleil qui entraîne la détérioration de celui-ci en cannabidiol CBD ; molécule aux puissants effets thérapeutiques [22].

Le fruit du chanvre connu sous le nom de chènevis, mais appelé par abus de langage, graine, est un akène de forme ovoïde, de couleur gris-brunâtre, de 3 à 5 mm de longueur [14]. Il

contient environ 25 à 30 % de protéines et 35 % d'acides gras. Grâce à sa composition véritablement nutritive, le chanvre constitue le meilleur choix pour une alimentation complète [23].

Il est clair que chacune des parties de chanvre est valorisable, ce qui fait la force de cette plante aux atouts multiples et intéressants. Dans le cadre de notre étude, nous ne nous intéressons pas à la plante dans son ensemble mais plutôt à la tige. Dans la suite de ce manuscrit, nous étudions plus particulièrement la chènevotte avec ses propriétés et applications.

1.2 Chènevotte et ses propriétés

La chènevotte est la partie centrale et boisée de la tige de chanvre. Elle est obtenue par défibrage mécanique et représente environ 45% du poids de la paille. Elle est constituée de composés cellulosiques et ligneux et se présente sous forme des granulats.

Elle correspond à la partie de la tige ayant véhiculé la sève pendant la croissance de la plante, et est, par conséquent, très hydrophile. Après défibrage mécanique, les particules de la chènevotte sont dépoussiérées, tamisées et triées en fonction des applications recherchées.



a) paillage de sol



b) Litière animale

Figure 1-5: Quelques applications de la chènevottes [24]

Les applications sont nombreuses comme : le paillage de sol, les litières animales, et le bâtiment en voie humide (béton et mortier de chanvre). Dans ces derniers cas, la maîtrise des propriétés spécifiques de la chènevotte est nécessaire comme par exemple, la granulométrie et la masse volumique. Elle permet d'assurer la bonne qualité du béton de chanvre. Dans la suite de cette partie, nous nous intéressons aux différentes propriétés de la chènevotte utilisée dans le bâtiment ainsi qu'aux méthodes nécessaires pour les mesurer.

1.2.1 Procédure commune pour la caractérisation de la chènevotte

Actuellement, il n'existe pas une norme sur la caractérisation des granulats d'origine végétale connus sous le nom de la chènevotte. Cependant des méthodes communes pour les spécialistes du béton de chanvre, sont en cours de mise en place par les membres du comité technique de la RILEM ; « Bio-aggregate-based Building Materials » (TC 236 BBM). Le premier livre à ce sujet est publié en 2013 par Sofiane Amziane et al. [25]. Par ailleurs, l'association Construire en Chanvre propose un « Label Granulat Chanvre Bâtiment » [26] à utiliser par des laboratoires accrédités. Parmi les méthodes de caractérisation disponibles dans la littérature, il y a des étapes communes préliminaires à chaque type de caractérisation.

1.2.1.1 Stockage et séchage de la chènevotte avant essais

Le granulat d'origine minérale, peut contenir de l'eau (teneur en eau initiale) selon les conditions de stockage, l'eau de pluie dans le cas d'un stockage à l'air libre ou l'humidité dans le cas d'un stockage dans un milieu couvert. Ainsi, si on souhaite mesurer ses propriétés telles que l'absorption d'eau [27] ou les porosités [28], on doit faire un séchage préalable à l'étuve à une température de 105°C.

Ce problème de teneur en eau initiale est généralement observé pour les granulats d'origine végétale (dont fait partie la chènevotte), étant donnée que ces derniers possèdent une grande capacité d'absorption d'eau liquide et capillaire [29]. Par conséquent, cela a un impact direct sur les propriétés mesurées du granulat, comme par exemple la teneur en eau, l'absorption d'eau, la masse volumique, etc. Pour éviter ce problème, un séchage préalable de la chènevotte est nécessaire. On rencontre alors dans la littérature diverses conditions de séchage de la chènevotte avant essai.

Afin de mesurer le coefficient d'absorption d'eau de la chènevotte, Magniont [30] a préalablement séché à l'étuve les échantillons à 105°C jusqu'à la stabilisation de la masse. Elle a par ailleurs séché les échantillons à une température de 103°C jusqu'à stabilisation de la masse afin de déterminer les isothermes de sorption/désorption à la vapeur. Cette température de séchage a été aussi utilisée par Niklas [31]. Une température de 80°C a été utilisée par Arnaud et Gourlay [32] afin de stabiliser la masse de la chènevotte avant essai. Plusieurs températures de séchage ont ainsi été utilisées pour stabiliser la masse de la chènevotte ; la température de 60°C étant celle utilisée par un grand nombre d'auteurs, [25,33–35].

Cette température a été particulièrement étudiée et validée par Nozahic [35] dans sa thèse. Trois échantillons (chènevotte et tournesol) de 50g ont été placés dans une étuve à 60°C pendant 48 heures et il a relevé l'évolution de la masse après 12, 24 et 48 heures. Les résultats de la figure 1-6 ont montré une faible variation de masse entre 12 et 48 heures, ce qui lui a permis de conclure qu'un séchage à 60°C pendant 48 heures était suffisant pour atteindre l'équilibre hydrique. En conséquence, lors de nos essais, nous utiliserons cette température.

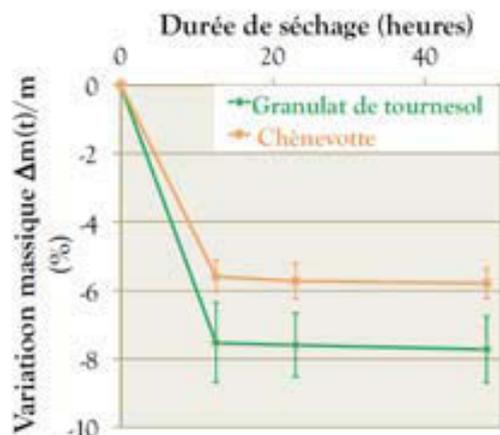


Figure 1-6: Courbe de séchage à 60°C des granulats de chanvre et de tournesol jusqu'à 48 heures [35]

1.2.1.2 Echantillonnage par quartage

Lorsque la chènevotte se trouve dans un récipient, d'éventuelles vibrations pendant le transport et la manutention entraînent la ségrégation du granulat. Ainsi, les particules fines ont

tendance à se déposer au fond du récipient. Lorsqu'on souhaite prélever un échantillon, les particules grossières arrivent alors en premier. De plus, si le récipient est fait en matière plastique, les particules fines ont tendance à coller sur les parois à cause de la force électrostatique. En conséquence, l'échantillonnage est biaisé. Pour éviter ce phénomène de ségrégation, il est proposé de procéder à un quartage [36] en respectant les étapes suivantes :

- bien mélanger l'échantillon de départ, environ 20 kg [25], à l'aide d'une plaque métallique ou à la main afin d'homogénéiser l'ensemble ;
- ensuite l'échantillon doit être placé sous forme d'un tas ;
- le quartage s'effectue alors en divisant le tas en quatre parties égales (figure 1-7), il faut veiller à séparer les parties avec un objet non coupant pour éviter d'endommager les particules ;
- l'opération de quartage est répétée jusqu'à l'obtention de la masse nécessaire pour l'essai.

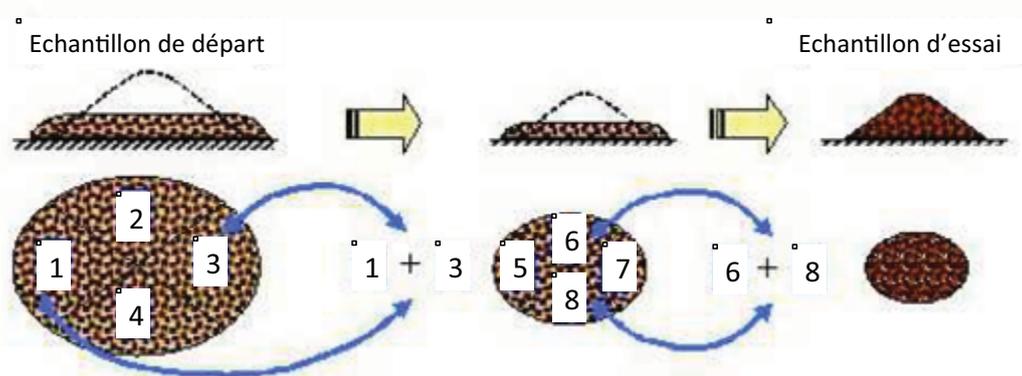


Figure 1-7: Schéma de principe de l'opération de quartage pour l'échantillonnage [36]

1.2.2 Masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac dont la définition est donnée en 1.2.2.1 est une caractéristique physique d'un granulat qui varie selon sa compacité et sa porosité. Dans le cas du granulat de chanvre, elle peut varier, suivant la nature, la teneur en fibre, la teneur en eau du granulat, etc.

Nom de l'auteur	Référence	Masse volumique apparente (kg/m ³)
T. M. DIHN	[37]	110,9±0,7
E. Gourlay	[38]	110
V. Nozahic	[35]	114,2±2,3
L. Arnaud	[32]	112 - 119
T. Verdier	[39]	148,3±1,9
C. Magniot	[30]	110 - 140
T.T. Nguyen	[19]	102,83
A. Evrad	[40]	100 - 120
P. De Buijn et al.	[41]	98
V. Cérezo	[33]	130
C. Cordier	[42]	110-155

Tableau 1-2: Résultats de la littérature sur la masse volumique apparente

Les résultats de la littérature synthésisés dans le tableau 1-2 montrent que les valeurs de la masse volumique apparente sont d'une variabilité considérable avec un minimum de 98 kg/m³ et un maximum de 155 kg/m³. Par ailleurs, cette variabilité peut être aussi liée à la technique ou méthode de mesure.

1.2.2.1 Mesure expérimentale de la masse volumique en vrac

Généralement, la masse volumique en vrac d'un matériau est définie comme étant la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides inter-particulaires et intra-particulaires. Elle peut avoir une valeur différente selon la compacité du matériau à partir duquel elle est déterminée. Dans le cas de la chènevotte, le Label Granulat Chanvre Bâtiment [26] préconise l'utilisation d'un moule 16x32cm comme récipient qui sert à mesurer le volume et à peser la masse de la chènevotte en même temps. Ainsi, le rapport masse sur volume permet de déterminer la masse volumique.

Amziane et al. [43] proposent une méthode pour déterminer la masse volumique apparente composé de neuf les étapes principales. Nous utiliserons ce protocole car il a déjà fait l'objet d'une étude inter-laboratoires et a été choisi et validé par ces derniers.

1.2.3 Capacité d'absorption d'eau

Grâce à sa structure capillaire et à son caractère hydrophile, le granulat de chanvre possède une grande capacité d'absorption d'eau liquide [44]. Cette capacité est nettement considérable par rapport aux autres granulats minéraux utilisés en construction. Les études antérieures ont montré que les particules de chanvre immergées dans l'eau peuvent atteindre sous 48 heures, une masse de saturation d'environ 5 fois leur masse sèche initiale [19,35,45]. Le taux de saturation de la chènevotte est influencé par la teneur en eau initiale, il est compris entre 70% et 95% après 5 minutes d'immersion pour la chènevotte initialement séchée à l'étuve [46][19,33,35].

La quantité d'eau absorbée par le chanvre peut être classée en deux catégories. La quantité d'eau absorbée par le réseau capillaire des particules, eau absorbée en volume, la quantité d'eau constituée des fines pellicules d'eau présentes à la surface des granulats et les ménisques d'eau entre deux granulats, il s'agit de l'eau absorbée en surface. La méthode détaillée à la section 1.2.3.1 permet de déterminer la quantité d'eau globale. Pour limiter la quantité d'eau absorbée en surface, les granulats de chanvre sont secoués [33] ou encore essorés au moyen d'une essoreuse [25], [35]. Lorsqu'un béton de chanvre est fabriqué avec le liant hydraulique, il y a une compétition entre le liant et la chènevotte pour l'absorption de l'eau de gâchage. On observe alors un phénomène de « fausse prise » [47], car la forte absorption de la chènevotte perturbe l'hydratation du liant. Il devient alors nécessaire de maîtriser la capacité d'absorption du chanvre. Toutefois, ce phénomène de fausse prise n'est pas forcément observé pour les liants aériens, comme le plâtre [48] ou la chaux aérienne [49] par exemple.

1.2.3.1 Mesure expérimentale de la capacité d'absorption d'eau

Afin des limiter les problèmes de compétition d'eau de gâchage entre les granulats et le liant il convient de maîtriser la capacité d'absorption de la chènevotte. Plusieurs modes opératoires sont proposés dans la littérature et sont synthétisés dans cette partie ; le principe de calcul pour l'ensemble des auteurs [19,25,30,35,38,50] est le même et se base sur l'équation suivante :

$$W(t) = \frac{m_{(t)} - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{éq. 1-1}$$

avec $W(t)$: le taux d'absorption d'eau à un instant t [%], $m_{(t)}$: la masse des granulats végétaux imbibés d'eau en [g] et m_0 : la masse initiale des granulats avant immersion en [g].

La quantité d'eau absorbée se compose en une partie emprisonnée par le réseau capillaire des particules et en une autre partie retenue superficiellement par les particules ; la proportion d'eau inter-granulaire ne peut pas être déduite et ceci peut entraîner des erreurs. Pour limiter ces erreurs, Juárez [50], dans ses travaux de thèse cités par Magniont [30], a fait un séchage superficiel des granulats végétaux en utilisant du papier absorbant, afin d'éliminer l'eau inter-fibres ainsi que l'eau adsorbée à la surface. Par ailleurs, Cérezó [33] a négligé l'existence de la fine quantité d'eau présente à la surface des granulats et aux ménisques d'eau entre les deux particules consécutives. Les granulats ont été légèrement secoués pour limiter les ménisques et pour pouvoir les négliger dans le calcul. Nozahic [35] quant à lui, a adopté une autre technique qui consiste à utiliser un récipient maillé permettant l'évacuation rapide de l'eau de trempe et d'une partie de l'eau interstitielle. Le mode opératoire qu'il a utilisé dans sa thèse passe par cinq étapes et est synthétisé sur la figure 1-8.

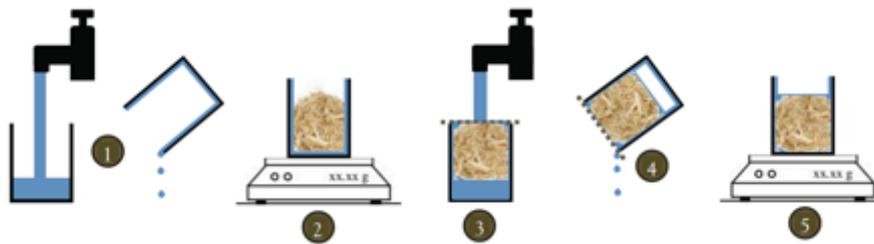


Figure 1-8: Etapes principales pour mesurer la quantité d'eau absorbée par des granulats végétaux [35].

Amziane et al. [51] recommandent 50g d'échantillons à tester, en plus, afin d'éviter l'eau inter-particulaire et l'eau adsorbée à la surface, après l'immersion du sac plastique contenant la chènevotte, il est proposé de l'essorer au moyen d'une essoreuse à salade, 100 fois, à raison d'environ 2 tours par seconde.

Trois échantillons doivent être testés, et l'immersion du sac contenant l'échantillon doit être faite après : 1 min, 5 min, 4 h et 48 h. Le calcul du taux d'absorption d'eau est fait au moyen de l'équation (1-1). Par ailleurs, le modèle théorique du comportement d'absorption d'eau du granulat végétal a été proposé par Nozahic et Amziane [52], selon l'équation suivante :

$$W = IRA + K_1 \times \text{Log}(t) \quad \text{éq. 1-2}$$

avec W le taux d'absorption d'eau en (%), IRA correspond au taux d'absorption d'eau en surface des particules, donc à la quantité d'eau absorbée pendant la première minute, (**IRA, EN 772-11**) [53], et K_1 le paramètre traduisant le taux d'absorption d'eau au sein de la particule (varie selon la porosité des particules) et t le temps d'immersion de la chènevotte.

1.2.4 Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un matériau à transférer de la chaleur par conduction. Elle est symbolisée par la lettre lambda λ et s'exprime en W/m.K. Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur ; à l'inverse, plus elle est faible, plus le matériau est isolant. C'est souvent le paramètre utilisé pour caractériser les matériaux isolants, car il est intrinsèque au matériau. Elle dépend principalement de la nature du matériau et de sa température, mais aussi d'autres paramètres comme l'humidité et la pression.

Parmi les méthodes utilisées pour mesurer la conductivité thermique, la plus couramment rencontrée dans la littérature est celle de la sonde fil chaud dite aussi « méthode en régime quasi établi ». Cette méthode consiste à imposer entre deux échantillons identiques un flux de

chaleur Q par effet Joule et mesurer la variation de température au voisinage de la sonde grâce à un thermocouple associé au fil chaud. La variation de la température est reliée à la conductivité thermique par la relation suivante [54]:

$$\Delta T(t) = \frac{P}{4\pi, \lambda_T, l} \ln(t) + k_1 \quad \text{éq. 1-3}$$

avec P la Puissance imposée au fil chaud en [W], l la longueur du fil chaud [m], et λ_T la conductivité thermique du matériau [W, m^{-1}, K^{-1}].

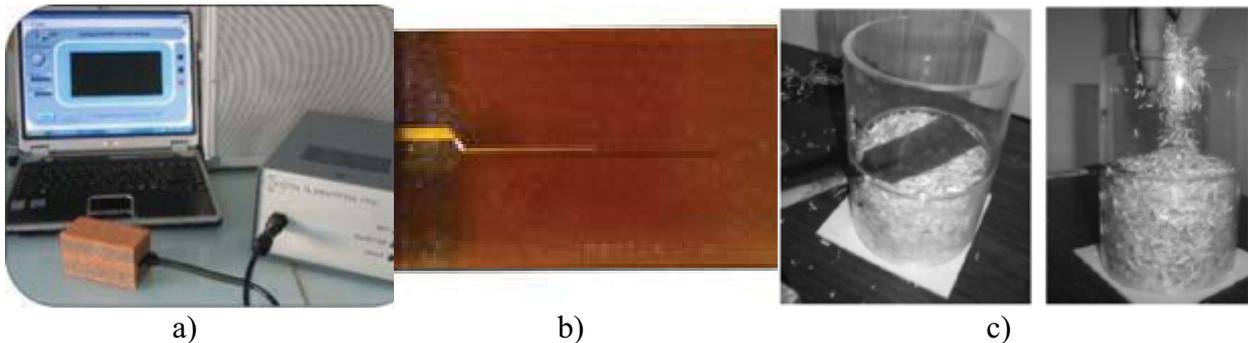


Figure 1-9: Dispositif de mesure FP2C de la société NéOTIM, a) poste de commande avec boîtier d'alimentation ; b) sonde fil chaud ; c) échantillons à tester [55].

Plusieurs dispositifs ou appareils de mesure sont disponibles sur le marché. Nous pouvons citer à titre d'exemple l'appareil λ -Meter EP 500 utilisée par Magniont [30], et l'appareil FP2C de la société NéOTIM utilisée par Nozahic [35], Gourlay [38], Amziane et al. [55] et dont le dispositif expérimental est illustré sur la Figure 1-9. Dans le cadre de notre travail de thèse, nous avons utilisé l'appareil FP2C de la société NéOTIM.

1.2.5 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à étudier la répartition des différents types de grains contenus dans un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques comme par exemple le poids ou la taille. Alors que cette analyse est initialement pratiquée pour les grains d'origine minérale, elle est aujourd'hui utilisée pour les granulats d'origine végétale, à l'aide de deux méthodes distinctes : tamisage mécanique ou analyse d'image [35].

Par ailleurs, il existe deux autres méthodes moins connues actuellement pour la caractérisation des granulats bio-sourcés. Il s'agit de la méthode d'analyse par vidéogranulomètre (VDG 40) et la méthode d'alpine (méthode par tamisage jet d'air).

1.2.5.1 Tamisage mécanique

Une étude récente a été réalisée par six laboratoires membres du comité technique TC-236 bio-based building materials. Dans cette étude, les deux premières méthodes citées ci-dessus ont été employées. Le tableau 1-3 synthétise les protocoles utilisés par chacun des laboratoires dans le cas du tamisage mécanique.

Nom du laboratoire	BRE Centre for Innovative Construction Materials (University of Bath)	Institut Pascal (UBP)	LIMaiB (Université Bretagne Sud)	DGCB (ENTPE)	IFSTTAR	LMDC (Université de Toulouse)	Combloux-Agro ressource (Université de Liège)
Masse de l'échantillon (g)	100	150	200	50	50	200	50
Diamètre maximal du tamis (mm)	203	315	315	315	315	315	203
Temps de vibration mécanique	10	15	40	5 ⁷	20	30	10
Nombre d'essais	5	3	3	10	5	3	5
Température de séchage (°C) ⁸	105	-	60	-	40 séchage : 2 jours	-	50

Tableau 1-3 : Protocoles utilisés par différents laboratoires pour la granulométrie par tamisage [43]

En conclusion de l'étude [43], il a été recommandé de sécher l'échantillon à 60°C jusqu'à l'obtention d'une variation de la masse inférieure à 0,1% entre 2 pesées sous l'intervalle de 24 h. La masse de l'échantillon recommandée est de 100 gr. Les deux méthodes sont jugées complémentaires mais toutefois la méthode par tamisage mécanique reste la plus adaptée pour déterminer la teneur en fibre et en poussière. Ainsi, la teneur en fibre correspond à la quantité (en pourcentage) de fibres que contient un échantillon de granulat de chanvre. Tandis que la teneur en poussière est définie d'après certains auteurs [38] comme le pourcentage de passant à un tamis de 0,5 mm de diamètre. D'après le Label Granulat Chanvre Bâtiment [26], le taux de poussière équivaut au pourcentage de passant à un tamis de 0,25 mm de diamètre.

1.2.5.2 Analyse d'image

La granulométrie par analyse d'image est plus récente par rapport au tamisage mécanique. Elle a été utilisée et publiée pour la première fois en 1996 par Nazar et al. [56]. Ils ont mis au point une méthode automatisée permettant d'obtenir des informations plus riches que dans la méthode précédente, notamment les paramètres géométriques des particules comme l'aire, la longueur et la largeur.

Par la suite, cette méthode est utilisée par plusieurs auteurs. Nguyen [19] l'a utilisée sous le logiciel ImageTool pour tracer les courbes granulométriques en fonction des dimensions extrêmes des particules de chanvre. D'autres auteurs, [25,35,38] ont aussi utilisé la même méthode sous le logiciel ImageJ. Ces deux logiciels sont en accès libre. Le comité technique TC-236 bio-based building materials [43] a également travaillé sur l'analyse d'image. En adoptant les protocoles résumés dans le tableau 1-4.

⁷ Le tamisage a été fait manuellement.

⁸ Les échantillons dont la température est donnée ont été séchés jusqu'à stabilisation de la masse.

Etude bibliographique

Laboratoires	Masse (g)	Aire minimum (mm²)	Particules analysés	Taille et moyen d'acquisition de l'image	Méthode d'analyse et logiciel utilisé
Institut Pascal (UBP)	1g parmi les refus sur un tamis de 0,5mm	1	830	Camera Photo : 420x297 mm ²	ImageTool : Féret
LIMatB (université Bretagne Sud)	4	0,08	260	Scan 600 DPI 23,6 pixels/mm Photo : 9(210x297 mm ²)	ImageJ : Ellipse+Féret Image Tool : Féret
DGCB (ENTPE)	5	0,44	3100	Camera Photo : 400x300 mm ²	ImageJ : Ellipse
IFSTTAR	*	0,5	3200	Camera Photo : 5(400x300 mm ²)	ImageJ : Ellipse+Féret
Combloux-Agro-ressource (Université de Liège)	8	1	5350	Scan 300DPI 11,8pixels/m m	ImagePro : Féret
LMDC (université de Toulouse)	6	0,03	3700	Scan 600 DPI 23,6pixels/m m	ImageTool : Féret

Tableau 1-4: Différents protocoles pour la granulométrie par analyse d'image [43]

Nozahic a proposé dans une étude antérieure [35], la démarche à suivre pour la méthode d'analyse d'image selon le schéma de la figure 1-10.

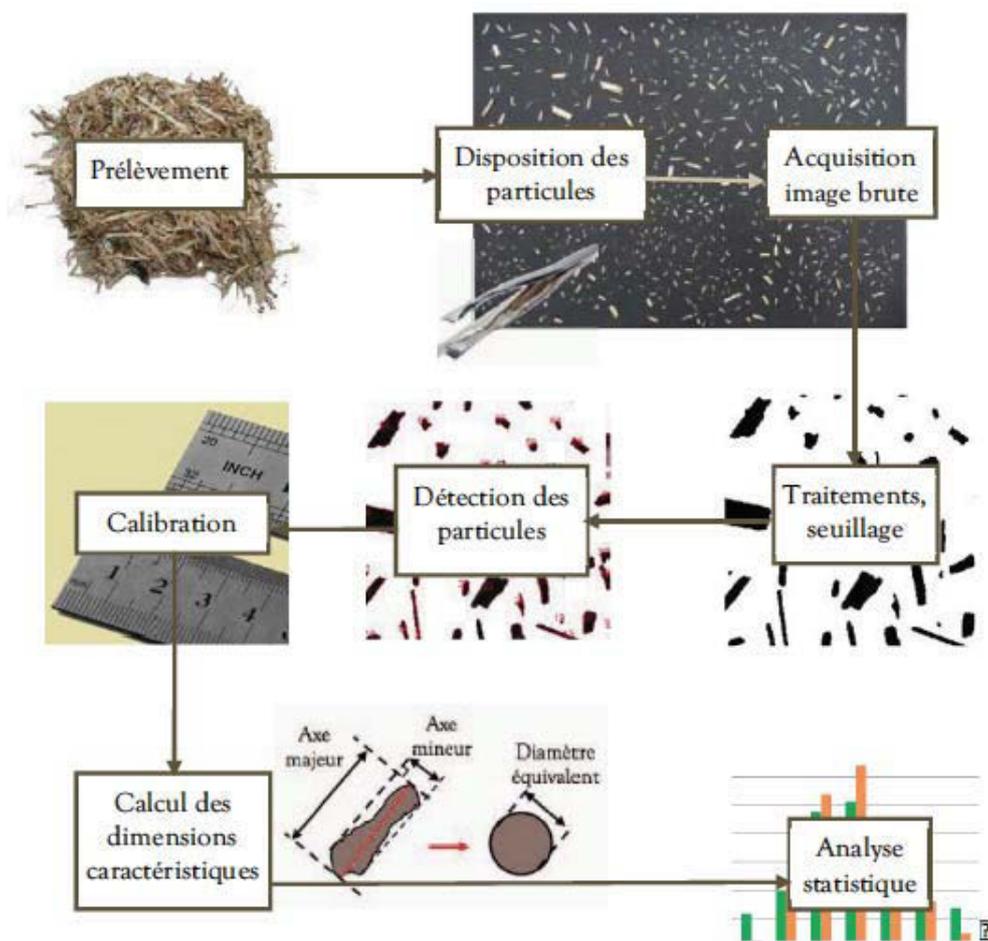


Figure 1-10: Protocole d'analyse granulométrique par imagerie pour les granulats végétaux [35]

Cette analyse passe par quatre étapes essentielles :

- échantillonnage et prise de l'image (photo) ;
- traitement d'image ;
- calcul des caractéristiques des particules ;
- analyse des résultats.

Après comparaison de plusieurs protocoles, le comité technique TC-236 bio-based building materials a conclu que 3 à 6 gr d'échantillons sont nécessaires. Pour une représentation significative de l'échantillon, le nombre minimum des particules identifiées doit être 3000.

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons la même méthode avec un échantillon de 3 gr. En effet l'étalement des particules de chanvre avant la prise de la photo à analyser doit se faire sans chevauchement. Cette opération étant laborieuse, il est intéressant de prendre l'échantillon le plus petit possible, pour accélérer le traitement, notamment en présence d'un grand nombre d'échantillons.

1.2.5.3 Vidéogranulomètre (VDG 40)

Le vidéogranulomètre est un appareil de mesure de la répartition granulométrique des granulats minéraux (sable, gravier, etc.) utilisés en génie civil. Ce dernier peut remplacer la méthode classique par tamisage mécanique. Dans une étude très récente [57], la méthode VDG 40 a été adaptée à la caractérisation des granulats de chanvre.

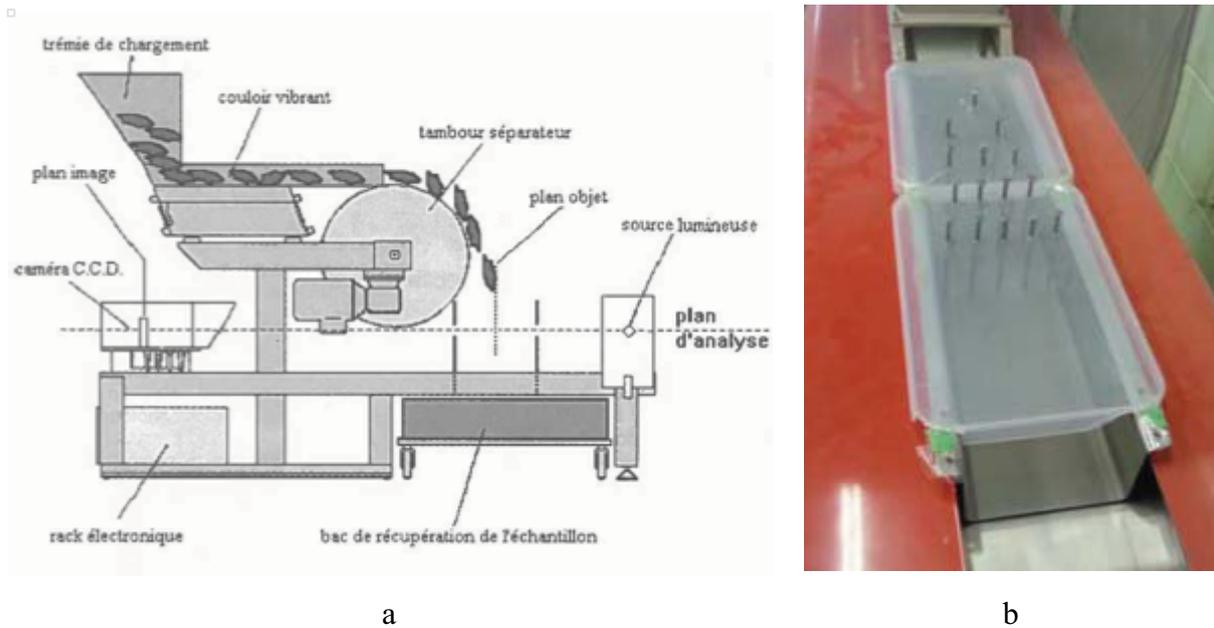


Figure 1-11: Dispositif expérimental de l'analyse vidéo granulométrique [36]

En effet, lors du passage des particules dans le couloir vibrant, elles passent sous forme d'un seul amas et arrivent au niveau de la caméra sous forme d'un bloc, ce qui biaise les résultats. De ce fait, une adaptation consiste à mettre les clous verticalement au niveau du couloir figure 1-11 b, de façon à diviser l'amas en deux parties successivement jusqu'à ce que les particules soient complètement séparées.

Après adaptation du dispositif expérimental, les essais peuvent être conduits en considérant des échantillons de 100 gr. La vibration du tapis est réglée pour chaque essai entre 50 et 60% de sa capacité maximale. Puisque cette méthode n'est pas compatible avec les particules de dimensions inférieures à 1 mm, ces particules doivent être analysées par tamisage mécanique. Dans ces configurations d'essai, des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une bonne précision [57]. Comparée à la méthode d'analyse d'image, la méthode par vidéogranulomètre a été jugée idéale grâce à sa rapidité d'exécution et à sa grande précision. Cependant, son inconvénient est qu'il est toujours nécessaire de la coupler à une autre méthode pour les particules inférieures à 1mm.

1.2.5.4 Tamisage jet d'air (alpine)

Lors de l'utilisation de cette méthode, contrairement au tamisage classique, les tamis ne sont pas agités. Les particules à analyser sont mises sur le tamis ; elles sont ensuite aspirées au moyen d'une fente à dépression, (figure 1-12). L'appareil est branché à un aspirateur classique et la fente à mouvement rotatif permet d'aspirer les particules (le passât). On connaît alors la quantité des tamisats et de refus. Dans cette méthode, un seul tamis est utilisé à la fois alors que dans la méthode classique toute la colonne de tamis est entièrement agitée.



Figure 1-12: Le dispositif expérimental pour la méthode alpine [57].

Dans une étude récente réalisée au CEREMA de Clermont-Ferrand [36], cette méthode a été utilisée pour caractériser la granulométrie du chanvre. Ils ont considéré un échantillon de 15 grammes pour une durée d'essai de 20 minutes. Les tamis utilisés lors de cette étude sont : 0,125, 0,5, 1, 2 et 4mm. La masse de tamisats est pesée au bout de 10, 20 et 30 min, respectivement. Dans cette configuration d'étude, ils sont arrivés à la conclusion que cette méthode n'apporte pas d'informations additionnelles par rapport au tamisage classique et malheureusement ne montre pas de précision supérieure. Par ailleurs, vis-à-vis de ses avantages, en particulier sa rapidité, cette méthode est jugée intéressante pour un usage ponctuel. Toutefois, la non disponibilité des équipements ainsi qu'une faible facilité d'exécution de l'essai peuvent freiner son utilisation.

1.3 Liants

Comme pour le béton classique, la formulation du béton de chanvre nécessite l'utilisation d'un liant adapté. Dans la littérature, plusieurs types de liants sont utilisés pour fabriquer le béton de chanvre comme par exemple, le ciment [33], la chaux [58], la pouzzolane [35] etc. Le choix optimal du liant à utiliser n'est pas facile dès lors qu'il s'agit du béton de chanvre. En effet, ce choix est souvent compliqué par le caractère hydrophile du granulat chènevotte, puisqu'il peut y avoir une compétition en absorption d'eau de gâchage. De plus, le liant choisi doit permettre d'obtenir un mélange parfaitement homogène, avec une meilleure ouvrabilité du béton de chanvre à l'état frais. Après la prise, il doit permettre d'obtenir les caractéristiques mécaniques minimales du matériau [10]. Les études antérieures ont montré que les liants hydrauliques répondent mal à ces exigences [33,59].

Dans la suite de cette partie nous présentons les liants souvent utilisés pour le matériau béton de chanvre, notamment la chaux, le ciment et la pouzzolane.

1.3.1 La chaux

La chaux est définie comme un matériau poudreux à l'état naturel, obtenu par calcination de pierre calcaire. La cuisson se fait industriellement dans un four à chaux à des températures comprises entre 900°C et 1300°C. Selon leur composition et procédure de fabrication, il existe plusieurs types de chaux, à savoir : la chaux vive, la chaux aérienne et la chaux hydraulique. Le cycle et les principales étapes pour la fabrication de la chaux aérienne sont

donnés sur la figure 1-13.

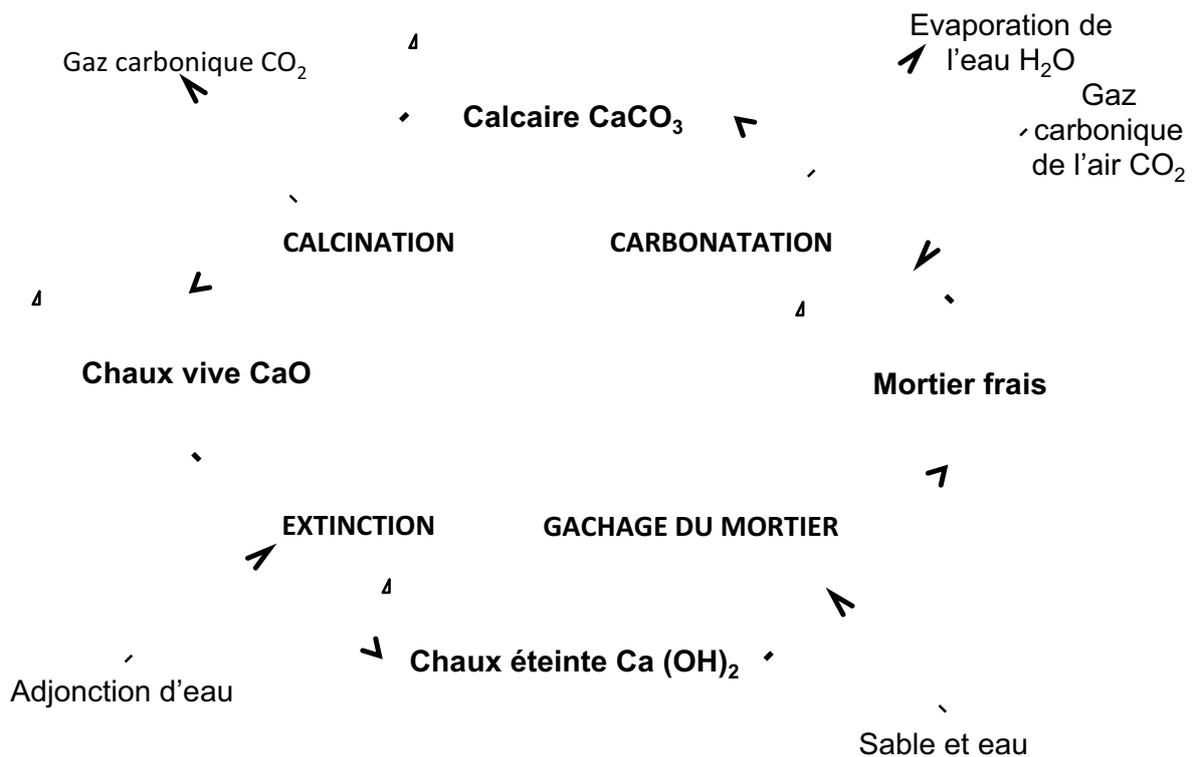


Figure 1-13: cycle de la chaux : du calcaire à la chaux aérienne

La chaux vive (CaO) est le produit direct de la calcination de la pierre de calcaire (CaCO_3). La chaux éteinte (Ca(OH)_2) est obtenue par la réaction de l'eau avec la chaux vive. La chaux éteinte est dite aérienne car elle réagit avec le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air. Lors du gâchage de la chaux éteinte avec l'eau et le granulat, il se passe un phénomène de carbonatation de l'hydroxyde de calcium en présence du CO_2 de l'air, ce qui conduit finalement à la formation de carbonate de calcium (phénomène de prise aérienne). Quant à la chaux hydraulique, elle contient en plus des silicates des alumines car elle provient de calcaire argileux. Elle est dite chaux hydraulique, car elle durcit en présence d'eau.

1.3.1.1 Propriétés mécaniques

La chaux présente des performances mécaniques très faibles. Dans le cas de la chaux aérienne, puisque sa réaction de durcissement se produit par carbonatation naturelle, il en résulte que le développement des résistances mécaniques est très lent.

En présence de CO_2 et pour une durée de conservation minimum de 6 mois, les résistances mécaniques sur le mortier peuvent monter à environ 3 à 5 MPa [60–62]. Ces résistances sont relativement faibles comparées à celles des ciments par exemple. Cependant il convient de souligner que la réaction de carbonatation peut se poursuivre durant plusieurs années. Ainsi, les performances maximales atteintes vont dépendre principalement des conditions de conservation comme l'humidité relative, la température ambiante ou encore la présence du dioxyde de soufre.

1.3.2 Le ciment

Le ciment est un produit obtenu en chauffant à haute température de 1450°C un mélange de calcaire et d'argile. Le calcaire est essentiellement composé par le carbonate de calcium (CaCO_3) tandis que l'argile est composée notamment de la silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3 . Après cuisson, on obtient le clinker. A ce dernier produit, on ajoute le gypse puis le mélange est finement broyé, on obtient ainsi le ciment « portland ». Lors du broyage de clinker, on peut ajouter d'autres éléments comme le laitier de haut fourneaux, les fillers de calcaire, les cendres de centrales thermiques, etc. ; on obtient alors les différentes catégories de ciment « à ajouts ».

On distingue pour les ciments courants cinq types principaux :

- CEM I : ciment portland contenant au moins 95 % de clinker ;
- CEM II : le ciment composé pouvant contenir de 6 à 35 % d'ajout au clinker (fumée de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau, etc.) ;
- CEM III : ciment de haut fourneau qui contient 36 à 95% de laitier ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique qui contient les composants pouzzolaniques de l'ordre de 11 à 55% ;
- CEM V : ciment constitué essentiellement de composants pouzzolaniques d'environ 18 à 50% avec également de laitier de l'ordre de 18 à 50%.

Ces différents types de ciment se distinguent par leurs différentes propriétés comme le temps de prise ou encore la résistance mécanique par exemple.

1.3.2.1 Propriétés mécaniques

Les ciments sont mélangés avec le sable, le gravier et l'eau, avec éventuellement des adjuvants, pour fabriquer des mortiers et des bétons. Les ciments confèrent de résistances mécaniques élevées à ces mortiers et bétons après prise et durcissement. Ces résistances sont bien meilleures en compression, avec un rapport de 10 entre la compression et la traction/flexion. La résistance évolue plus ou moins rapidement en fonction des conditions de séchage. En général, on atteint 40% de la résistance attendue au bout de 2 jours et 70% dès l'âge de 7 jours.

Parmi les paramètres essentiels pour la résistance d'un mortier ou d'un béton, on distingue le rapport eau efficace⁹/liant (ciment) (E_{eff}/C) et le type de ciment ainsi que son dosage. Ces paramètres sont essentiellement pris en compte dans le processus de formulation des bétons. Selon la formulation, il est possible d'obtenir à 28 jours des bétons de :

- 25MPa (bétons courants avec un rapport E_{eff}/C de 0,60) ;
- 100 MPa (bétons à très hautes performances avec un rapport E_{eff}/C de 0,30 à 0,40) ;
- 150 MPa (bétons ultra hautes performances avec un rapport E_{eff}/C de 0,15 à 0,20).

Les performances obtenues dans le cas du béton classique, se réduisent fortement pour le cas du béton de chanvre.

⁹ eau efficace = eau total-eau absorbée par les granulats

1.3.3 Liant pouzzolanique

D'après la norme américaine ASTM-C-618 [63], les pouzzolanes sont définies comme suit : « des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas eux-mêmes de propriétés liantes mais qui, sous forme de poudres et en présence d'humidité, réagissent avec l'hydroxyde de calcium (CaOH_2) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes ». Cette réaction est appelée « **pouzzolanique** ».

Par ailleurs, les pouzzolanes naturelles sont définies dans la norme NF EN 197-1 [64] comme « des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique, des propriétés pouzzolaniques ». Elles sont formées de deux manières différentes [65]:

- volcaniques : scories, ponces, basalte ;
- sédimentaires ou d'altération : zéolites, silice sédimentaire, opales.

L'utilisation des pouzzolanes naturelles est très ancienne. Elles sont utilisées depuis l'antiquité comme liants pour fabriquer les bétons de construction, tel que dans l'exemple du pont du Gard. Il existe actuellement de nombreuses réalisations de liants, mortiers et bétons basés sur un mélange entre des pouzzolanes et la chaux. Toutefois, l'utilisation de ce type de liant (pouzzolanique) avec les granulats d'origine végétale reste très limitée [35].

1.3.4 Les mélanges chaux-pouzzolane

Le mélange d'addition pouzzolanique et de chaux (aérienne ou hydraulique), avec éventuellement du ciment, a été utilisé dans de nombreuses études pour le développement des bétons de végétaux, [2,19,26,30,33,58]. L'association de ces deux liants permet d'obtenir la pâte liante minérale ayant des propriétés nécessaires et compatibles avec les particules de chanvre. Il devient alors possible de fabriquer des bétons à base de granulats végétaux en permettant [66] :

- une amélioration nette de la résistance mécanique du matériau final ;
- une porosité convenable, mais il convient de souligner que l'addition de ciment à des mortiers de chaux aérienne conduit à une diminution de la porosité ;
- le bon maintien des performances thermiques et acoustiques avec une bonne stabilité à l'eau.

La prise dans ces mélanges est basée sur une réaction pouzzolanique qui est plus lente que dans le cas de la réaction d'hydratation du ciment, ce qui est intéressant dans les cas des bétons à base des granulats végétaux. En effet, ces granulats (hydrophiles) nécessitent une évacuation de l'eau de gâchage pour atteindre des performances mécaniques appréciables [29]. De plus, ces mélanges limitent le pH du milieu interstitiel, ce qui diminue l'attaque alcaline des granulats végétaux. Dans une étude réalisée par Toledo et al. [67], ils ont observé sur un mélange ciment-laitier une amélioration de la durabilité d'un béton à base de sisal (sensible à l'attaque alcaline), qui est attribuée à une chute de pH dans le mélange.

Les pouzzolanes contribuent à l'amélioration de la résistance mécanique des bétons à long terme. Cette amélioration est souvent observée pour les dosages courants de 80 à 150 kg/m^3 en remplacement d'une partie du ciment. En revanche, on observe à court terme (durant le premier mois) des baisses sensibles de la résistance.

1.3.5 Batichanvre

C'est un liant à base de chaux naturelle de Saint-Astier, spécialement formulé pour la fabrication de mortiers et bétons en mélange avec du chanvre. Il est composé essentiellement de 70% de chaux naturelle de Saint-Astier et de 30% de liants hydrauliques et pouzzolaniques (composition massique). A ces composants principaux, on peut ajouter d'éventuels adjuvants spécifiques.

Dans le cadre de notre étude, le choix a été fait d'utiliser un liant déjà validé pour la fabrication des bétons de chanvre. Le BATICHANVRE étant déjà validé et commercialisé pour l'utilisation dans la construction, nous l'avons choisi pour notre étude. Sa fiche technique détaillée est donnée en annexe E.

1.4 Propriétés du béton de chanvre

De nombreuses recherches menées jusqu'à présent [2,68,69] montrent que le matériau béton de chanvre présente des atouts sur le plan thermique et acoustique grâce à sa légèreté et sa porosité. Cependant, il se comporte très mal mécaniquement [32,33]. Compte tenu des problèmes d'éco-conception et de développement durable, notamment dans le secteur de la construction, grâce à ses atouts environnementaux, le béton de chanvre est considéré comme une solution pertinente. A notre connaissance, ce matériau reste à ce jour le seul agrobéton¹⁰ à faire l'objet de règles professionnelles de mise en œuvre manuelle [70]. Dans cette section, un état de l'art sur les propriétés du matériau béton de chanvre est proposé, en même temps que les matériels et méthodes nécessaires pour les mesurer.

1.4.1 Propriétés physiques et mécaniques

Plusieurs paramètres influencent les comportements physiques et mécaniques du béton de chanvre. Certains sont dus à la nature des constituants du béton comme la taille des granulats, le type de liant, et d'autres sont dus au procédé de fabrication, tels que l'énergie de compactage, la méthode de moulage etc., [19,33]. Plus tard, nous analyserons dans la partie 1.6 les paramètres influant sur le comportement du béton de chanvre. Pour l'instant, nous nous intéressons en particulier, à la masse volumique, à la contrainte maximale de compression ainsi qu'au module d'Young.

1.4.1.1 Masse volumique

La masse volumique du béton de chanvre est fortement liée au dosage, c.à.d., à la teneur en granulat et en liant, à la taille des granulats et à leur porosité ainsi qu'à l'énergie de compactage. En prenant en compte ces paramètres, on trouve dans la littérature des valeurs très variées de la masse volumique.

Plusieurs formulations ont été testées par Cérezo [33], avec un nombre d'éprouvettes compris entre 12 et 29 pour chaque formulation. La distribution des masses volumiques pour chaque formulation est homogène, avec des coefficients de variation entre 1,5 % et 3,5% pour la masse volumique.

¹⁰ Les composites mélangeant des produits issus de l'agriculture ou de la foresterie avec un liant minéral (chaux, ciment, etc.).

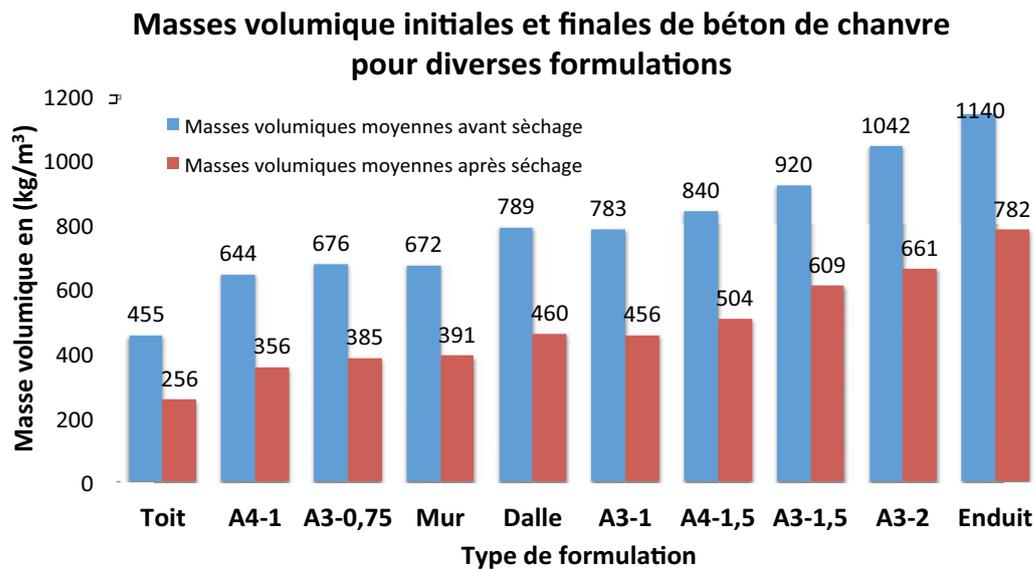


Figure 1-14: Masse volumique initiale et finale du béton de chanvre pour différentes formulations [33].

Cependant, pour les dix formulations étudiées, Cérezo a obtenu des valeurs de masse volumique finale moyen allant de 256 kg/m^3 à 782 kg/m^3 . Ses résultats montrent une faible dispersion au sein d'une même formulation. Cependant, la grande dispersion est observée pour les différentes formulations étudiées comme illustré sur la figure 1-14.

Par ailleurs, cette variabilité peut être aussi liée à la technique ou méthode de mesure. F. Collet [2] a déterminé la masse volumique de deux types de chanvre en utilisant trois méthodes, par pesé et mesure des dimensions, par pycnomètre et par prosimètre à mercure. Une première étape de son étude consiste à déterminer le volume élémentaire représentatif entre des cubes de 2,5 cm, 5 cm, 10 cm et 20 cm d'arête. La variation de la masse volumique obtenue entre les échantillons de 20 cm et de 5 cm d'arête est de l'ordre de 4 %. Face à cette faible variation de la masse volumique moyenne entre les échantillons de 20 cm et de 5 cm d'arête, elle conclut que les échantillons de 5 cm d'arête sont bien représentatifs du béton de chanvre. Par ailleurs, on observe des écarts dans les différentes méthodes de mesure qu'elle a utilisées. Dans l'essai au pycnomètre, la masse volumique apparente est de 390 kg/m^3 pour la gâchée A et de 425 kg/m^3 pour la gâchée B. L'essai au porosimètre à mercure a donné une masse volumique apparente sèche de 609 kg/m^3 et 664 kg/m^3 pour les gâchées A et B respectivement. Avec la méthode de pesé et mesure des dimensions, pour deux séries différentes dans la gâchée A, elle a obtenu 408 kg/m^3 et 406 kg/m^3 avec 6,6% et 2,7% de coefficient de variation pour la première et la deuxième série, respectivement. Dans la gâchée B, la masse volumique moyenne des échantillons de 5 cm d'arête est de 438 kg/m^3 avec un coefficient de variation de 5,7%.

1.4.1.2 Contrainte maximale de compression

Nguyen [19] a mis en évidence les paramètres influant sur la résistance à la compression du béton de chanvre. D'après lui, en raison de la faible rigidité de la chènevotte, le béton de chanvre possède un comportement mécanique très ductile en compression et en traction. Il a obtenu une résistance en compression pour une déformation de 7,5% après 28 jours qui varie entre 0,2 MPa et 3,6 MPa. Cette variation est fonction du granulat utilisé, du compactage et de la composition. Pour sa part, Cérezo [33] a obtenu une résistance en compression variant

entre 0,25 et 1,15 MPa. Pour les faibles dosages en liant, la résistance à la compression est de l'ordre de 0,25 MPa. Pour les dosages intermédiaires, elle varie entre 0,4 et 0,8 MPa et pour les forts dosages, elle est de l'ordre de 1,15 MPa. Elle a conclu que du point de vue mécanique, le béton de chanvre se caractérise par un comportement élasto-plastique et qu'il doit être utilisé avec une structure porteuse afin de répondre aux exigences structurales ; une étude détaillée sur ce sujet a été réalisée par Gross et Walker [71].

D'autres paramètres peuvent aussi influencer sur le comportement mécanique du béton de chanvre, comme par exemple les conditions de séchage, l'âge du béton de chanvre et la taille de la chènevotte [32]. En tenant compte de ces paramètres, Arnaud et Gourlay [32] ont obtenu des contraintes qui varient entre 0,35 MPa et 0,85 MPa pour l'âge de 21 jours à 24 mois, le comportement devenait de moins à moins ductile avec une déformation de 0,11 à 0,04 %. La contrainte maximale de compression peut être améliorée en augmentant l'énergie de compactage pendant la fabrication, mais elle reste limitée à 3 MPa pour une pression de compactage variant entre 0,6 MPa et 1 MPa [72]. Nguyen [19] a obtenu une résistance en compression supérieure à 3,5 MPa à l'âge de 28 jours en utilisant une contrainte de compactage maintenue pendant 48 heures sur la pâte fraîche avant démoulage.

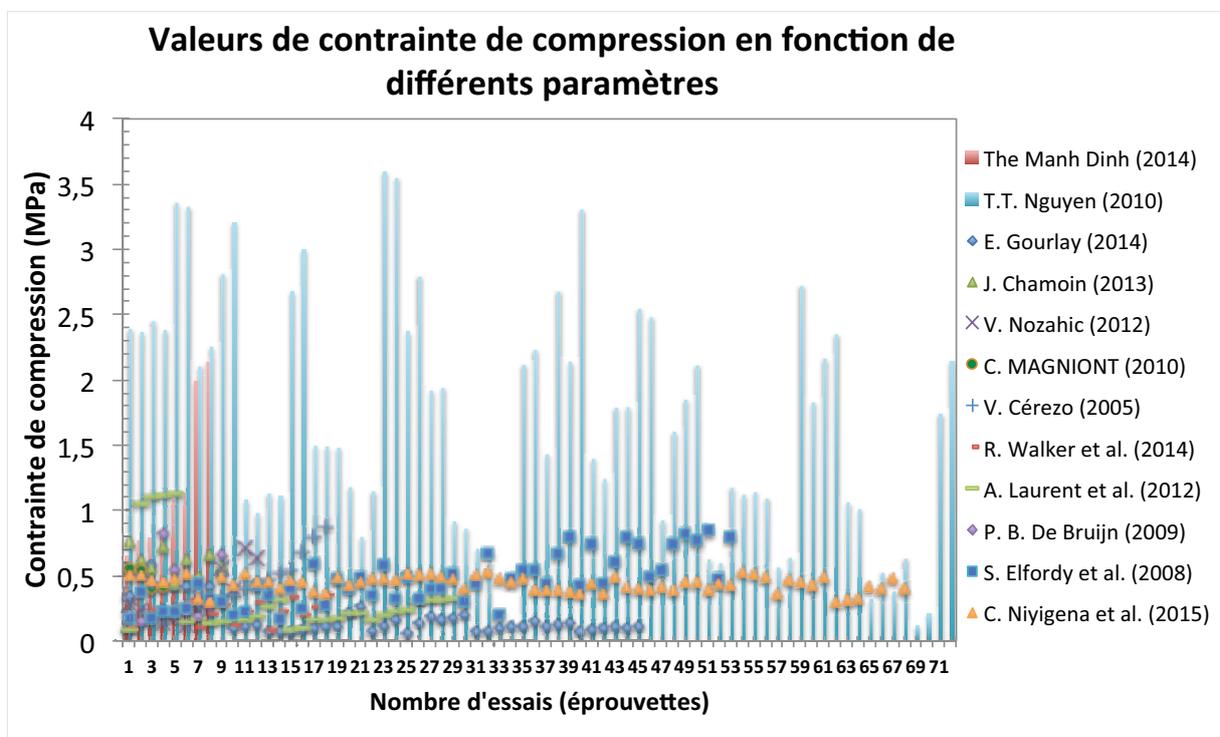


Figure 1-15: Variation de contrainte de compression en fonction des différents paramètres, [19,30,32,33,35,37,38,58,73–76].

La figure 1-15 montre dans quelle mesure les valeurs de la contrainte peuvent varier selon les paramètres pris en compte lors de l'étude. The Mahn [37] et Nguyen [19] ont des valeurs de contrainte de compression d'environ 2 MPa et 3,5 MPa respectivement. Des valeurs faibles de l'ordre de 0,2 MPa sont obtenues par Elfordy et al. [75] et Gourlay [38]. Les sources de ces dispersions sont nombreuses, elles seront discutées plus loin dans ce manuscrit (§1.6).

1.4.1.3 Module d'Young

Les valeurs du module d'Young trouvées dans la littérature présentent aussi de grandes variabilités. De plus, les méthodes utilisées pour son calcul sont assez différentes.

Cérezo [33], définit le module d'Young par la pente à l'origine de la courbe contrainte déformation en considérant valable l'hypothèse des petites déformations. Pour divers dosages et pour une durée de 0 à 12 mois et plus, les valeurs du module sont très différentes. Pour les faibles dosages en liant, le module global de rigidité augmente de 1 à 3 MPa. Pour des dosages intermédiaires de 32 à 95 MPa et les forts dosages le module passe de 100 à 160 MPa.

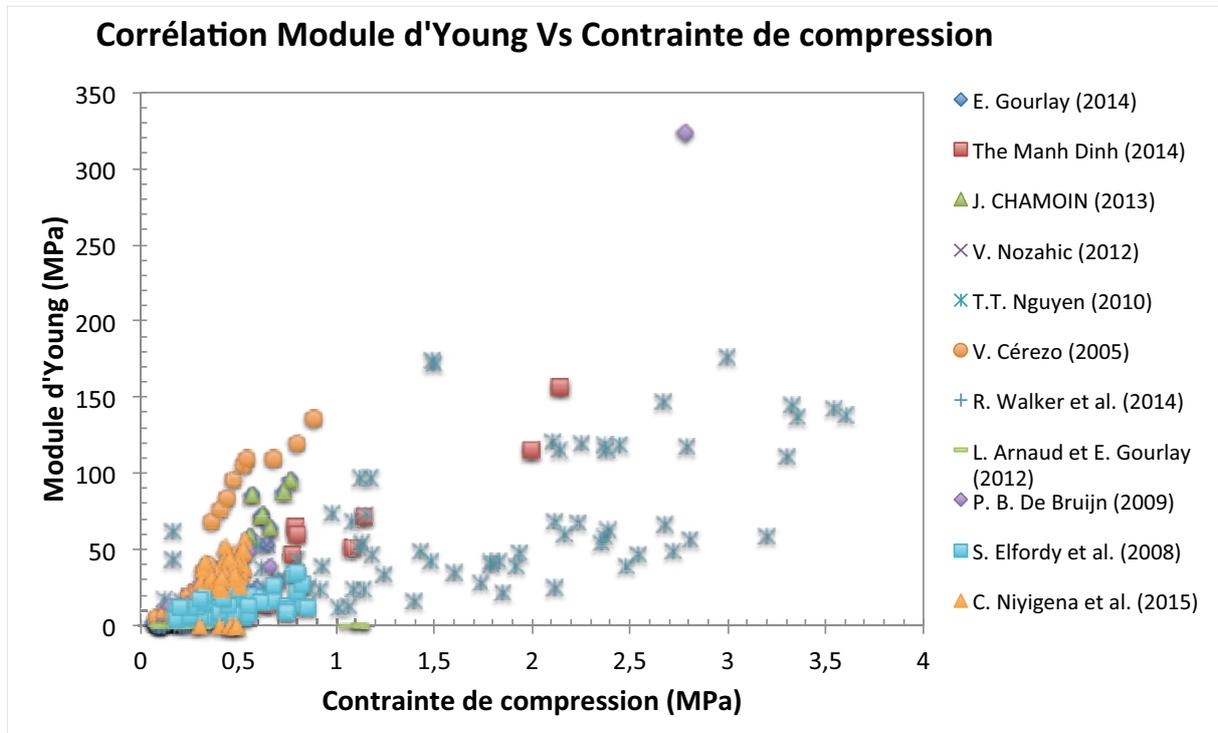


Figure 1-16: Variation de module d'Young en fonction de la contrainte de compression pour le béton de chanvre [19,32,33,35,37,58,73-77].

Pour diverses formulations avec de la chènevotte pure, Nguyen [19] a obtenu à 90 jours, les valeurs de module qui varient entre 25 MPa et 176 MPa. Dans son étude, le module d'Young est calculé en fonction du plus fort accroissement du rapport contrainte/déformation enregistré au début des sollicitations. Les paramètres essentiels considérés sont le dosage en liant et les rapports E/L et L/G.

D'après la figure 1-16, le module d'Young du béton de chanvre augmente avec la contrainte de compression. Cependant, cette tendance croissante est dispersée. Cela reste logique dans la mesure où les auteurs n'ont pas conduits leurs études dans les mêmes configurations. Par ailleurs, la dispersion observée montre dans quelle mesure les propriétés mécaniques du chanvre sont sensibles aux différents paramètres.

1.4.2 Propriétés thermiques

Le béton de chanvre, considéré comme un bon matériau isolant, a une conductivité thermique de l'ordre de 0,06 à 0,2 W/m.K en fonction de sa composition et sa structure. Sa conductivité est influencée par plusieurs paramètres. La figure 1-17 illustre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour différents matériaux, dans le but de comparer le matériau béton de chanvre avec d'autres matériaux de construction. Les conductivités du béton de chanvre pour les quatre applications : sol, mur, toiture et enduit sont issues des règles professionnelles d'exécution pour ce matériau béton de chanvre [70].

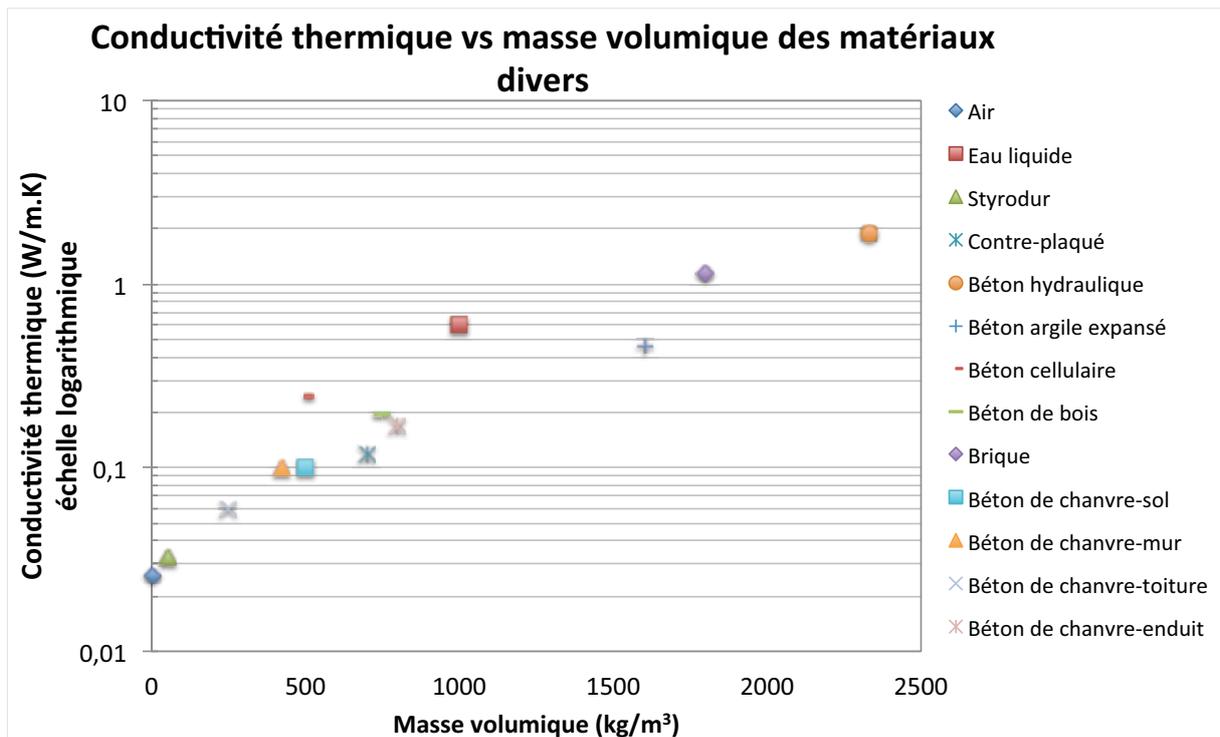


Figure 1-17: Conductivité thermique de différents matériaux en fonction de la masse volumique

Quel que soit le matériau considéré, il semble que la conductivité thermique augmente avec la masse volumique. Les travaux réalisés par plusieurs auteurs sur le béton de chanvre ont permis de mettre en évidence la même tendance (figure 1-18). Ceci s'explique par le fait que plus la masse volumique augmente, plus la porosité diminue. En effet, les pores avec de l'air immobile favorisent l'isolation.

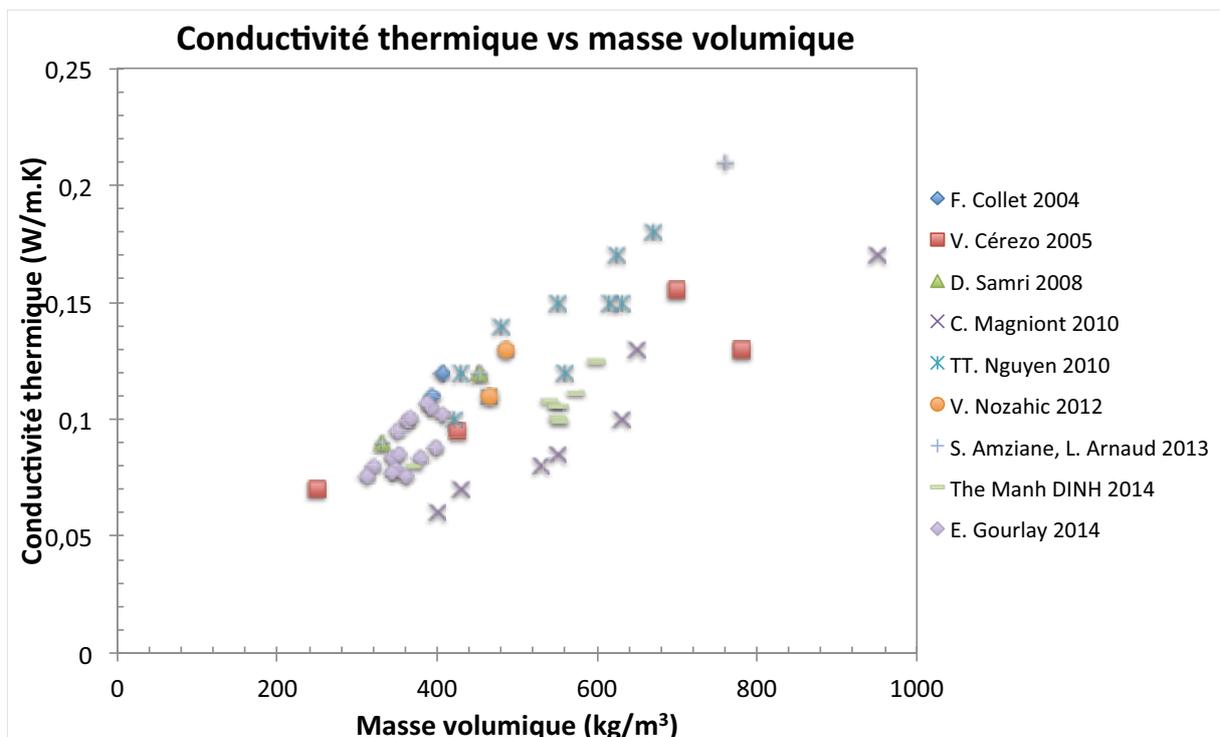


Figure 1-18: conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la masse volumique [2,19,25,30,33–35,37,38]

Etude bibliographique

Il est aussi important de souligner que la conductivité thermique du béton de chanvre varie en fonction d'autres paramètres tels que l'humidité relative, la teneur en eau, l'énergie de compactage ainsi que sa direction.

Dans ce dernier cas, les travaux réalisés par différents auteurs [19,35,37,38,78] ont permis de mettre en évidence l'impact de la direction de compactage sur la conductivité thermique du béton de chanvre. Nguyen a montré que le compactage induit une anisotropie de la structure et des propriétés. Tous les auteurs arrivent à la même conclusion que la conductivité thermique est plus faible, lorsqu'elle est mesurée avec le flux de chaleur parallèle à la direction de compactage. Le tableau 1-5 synthétise les résultats de la littérature pour la conductivité thermique mesurée dans les deux directions. Avec λ_{\perp} et $\lambda_{//}$ la conductivité thermique mesurée avec le flux perpendiculaire et parallèle à la direction de compactage, respectivement.

Référence	λ_{\perp}	$\lambda_{//}$	$\lambda_{\perp}/\lambda_{//}$
T. T. Nguyen [19]	0,104-0,170	0,066-0,120	1,20-1,80
V. Picandet [78]	0,110-0,165	0,075-0,115	1,30-1,60
V. Nozahic [35]	0,149-0,182	0,129-0,137	1,15-1,33
T. M. Dinh [37]	0,095-0,147	0,080-0,125	1,13-1,24

Tableau 1-5: Valeurs de conductivité thermique du béton de chanvre selon la direction de compactage

La relation de linéarité comportementale entre la conductivité thermique et la masse volumique, a été constatée pour les matériaux isolants en général (figure 1-17), et pour le béton de chanvre en particulier, (figure 1-18). Cette relation est toujours vérifiée dans les deux directions d'analyse (figure 1-19).

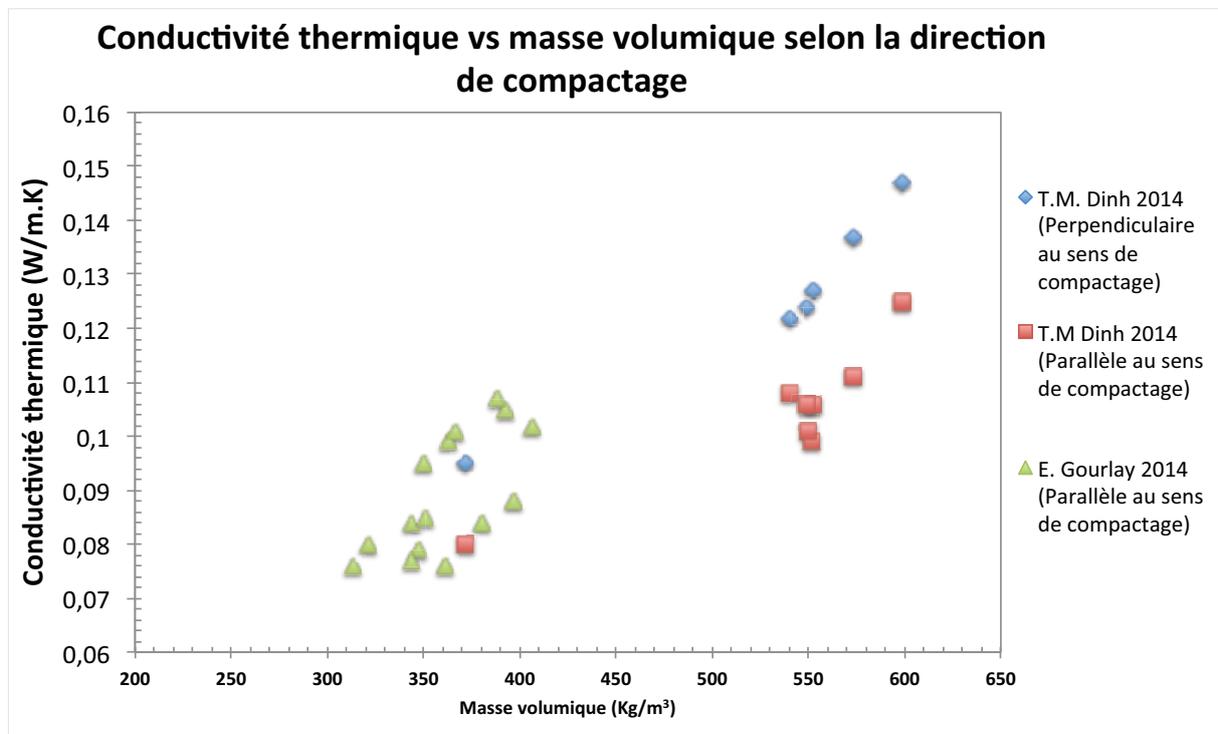


Figure 1-19: Conductivité thermique vs masse volumique du béton de chanvre en fonction de la direction de compactage [37,38]

Il serait ainsi intéressant d'utiliser dans le cas du mur par exemple, les bétons compactés dans la direction horizontale (par projection), pour obtenir une meilleure isolation thermique. Le comportement anisotrope observé est d'après les différents auteurs, lié à l'orientation des particules de chanvre au sein du matériau et cette orientation dépend fortement de la direction de compactage. Les travaux réalisés par Cérezo [33] ont aussi permis d'identifier un autre paramètre influant sur la conductivité thermique du béton de chanvre : il s'agit de l'humidité relative du matériau au moment de l'essai. Dans son étude, les échantillons de béton de chanvre ont été soumis à des hygrométries de 50% et 75%, figure 1-20, ces hygrométries représentent de gain de masse variant de 5 à 15% induisant des augmentations de la conductivité thermique. Cette augmentation est par ailleurs amplifiée car l'eau est conductrice de la chaleur. Ces résultats montrent que l'impact de l'humidité relative ambiante est non négligeable car la conductivité sèche du matériau augmente de 0,2 W/m.K en moyenne pour l'humidité relative comprise entre HR=0% et HR=75%.

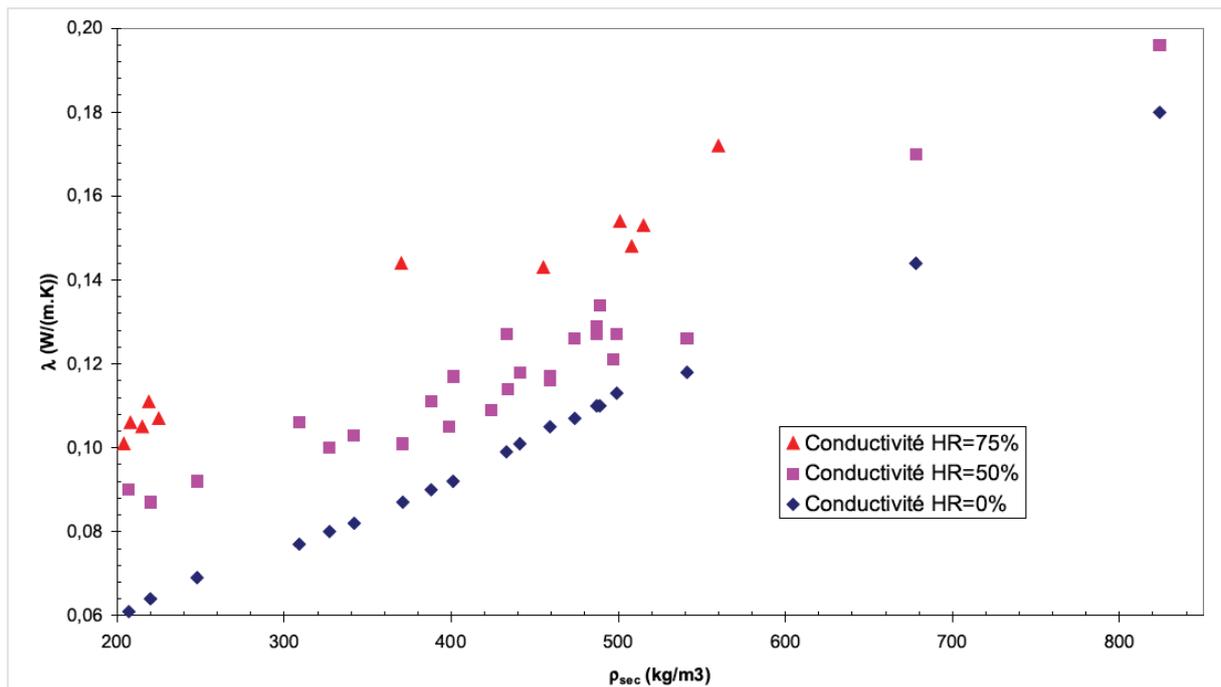


Figure 1-20: Influence de l'humidité relative sur la conductivité thermique du béton de chanvre soumis à HR= 50% et HR=75% [33].

Ces résultats ont été confirmés par les travaux de différents auteurs [30,34,41,79–81], qui ont étudié la variation de la conductivité thermiques en fonction de l'humidité relative dans l'intervalle de HR=15% à HR=95%. Ils sont tous arrivés à conclure que la conductivité thermique pour divers degrés d'HR est bien supérieure à la conductivité thermique à l'état sec. Samri [34] attribue cette augmentation à la quantité d'eau que contiennent les matériaux à différents niveaux d'humidité relative. En effet, la conductivité thermique de l'eau $\lambda_{eau} = 0,6\text{W/m.K}$ est environ 20 fois supérieure à celle de l'air sec $\lambda_{air} = 0,026\text{ W/m.K}$. Cependant l'influence de chaque niveau d'humidité relative sur la conductivité thermique est différente. Les variations de la conductivité thermique sont de l'ordre de 1,32 à 1,74 fois pour les valeurs d'humidité relative de 75% à 95%. Alors que ces variations sont relativement faibles pour les valeurs d'humidité relative comprises entre 15% et 65%, elles sont de l'ordre de 1,01 à 1,16 fois par rapport à l'état sec.

1.5 Mesure des propriétés du béton de chanvre

Deux modes de chargement sont possibles pour les essais de compression simple : chargement cyclique et chargement monotone. Ces modes de chargement semblent ne pas avoir d'influence significative sur les valeurs de la contrainte maximale. La figure 1-21 montre la reproductibilité des courbes pour les deux modes de chargement. Quant au module d'Young, les méthodes utilisées pour le calculer, sont probablement à l'origine des grandes variabilités constatées dans les résultats de la littérature.

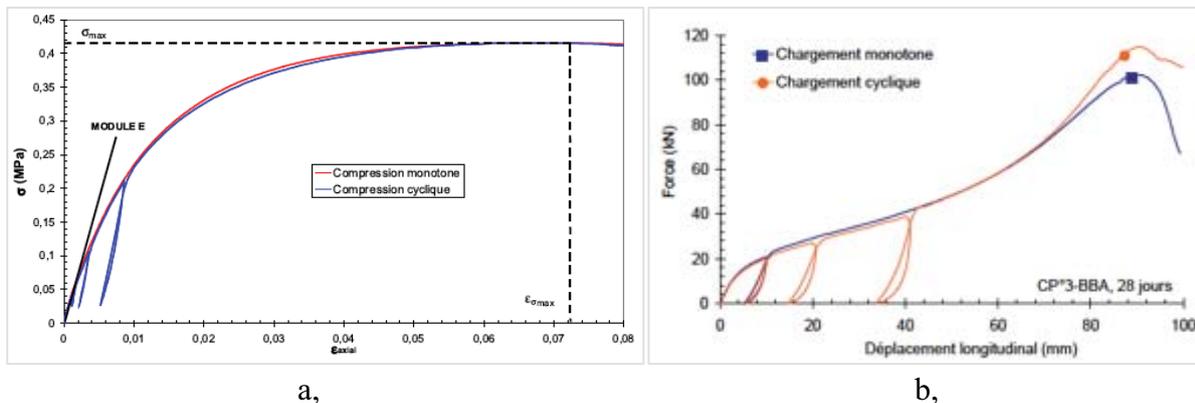


Figure 1-21: Reproductibilité de l'essai de compression par le chargement monotone et cyclique, (a) Cérezo [33] ; (b) Nguyen [19].

1.5.1 Essais sur éprouvettes de béton de chanvre

1.5.1.1 Types d'éprouvettes

Les éprouvettes de béton de chanvre sont de diverses formes et dimensions. On trouve par exemple, les éprouvettes cylindriques de taille 100x200 mm [19], 110x220 mm [35], et 160x320 mm [33], et les éprouvettes cubiques 150x150x150 mm [35] ou encore 150x150x50 mm [38]. Ces dernières sont souvent utilisées pour déterminer les propriétés thermiques du béton de chanvre [38]. L'utilisation des éprouvettes cubiques 150x150x150 mm est importante lorsqu'on souhaite étudier l'influence de l'orientation des particules et de la sollicitation des interfaces liant/granulat [82,83].

La fabrication d'éprouvettes peut s'effectuer selon deux modes, soit par compactage manuel ou banchage traditionnel, soit par compactage automatique à la presse. Le premier mode a été utilisé dans [33], [58,84] à raison de 3 à 5 couches de tassage manuel. Arnaud et Gourlay [32] l'ont aussi utilisé mais avec une contrainte de compactage finale imposée. Nozahic [35] a lui aussi utilisé la même méthode avec un remplissage de 3 couches. Le second mode a été utilisé par Nguyen [19]. Le premier mode est moins précis mais plus accessible. Après séchage, les éprouvettes sont soumises aux différents essais thermiques ou mécaniques. Il est possible que la taille et la forme de l'éprouvette entraînent la variabilité des propriétés étudiées. Dans le cadre de notre étude, nous utilisons le mode de compactage manuel. En terme de taille et de forme, une analyse sera effectuée sur les éprouvettes cylindriques et cubiques avec l'objectif de mettre en évidence l'existence ou non de l'effet de forme et d'échelle.

1.5.1.2 Essais de compression simple

Lors de l'essai de compression simple, la force doit être appliquée perpendiculairement à la surface de contact de l'éprouvette. Par conséquent, les faces inférieure et supérieure de l'éprouvette doivent être parfaitement planes et parallèles. Cependant, lors du démoulage, les éprouvettes peuvent présenter des irrégularités sur les deux faces malgré les précautions prises au moment de leur fabrication. C'est pour quoi une opération de surfaçage est nécessaire pour corriger ces irrégularités. Plusieurs techniques de surfaçage sont possibles (figure 1-22); on peut citer le surfaçage par la laine de chanvre, le surfaçage par sciage [33], et le surfaçage à l'aide d'une rectifieuse [19].

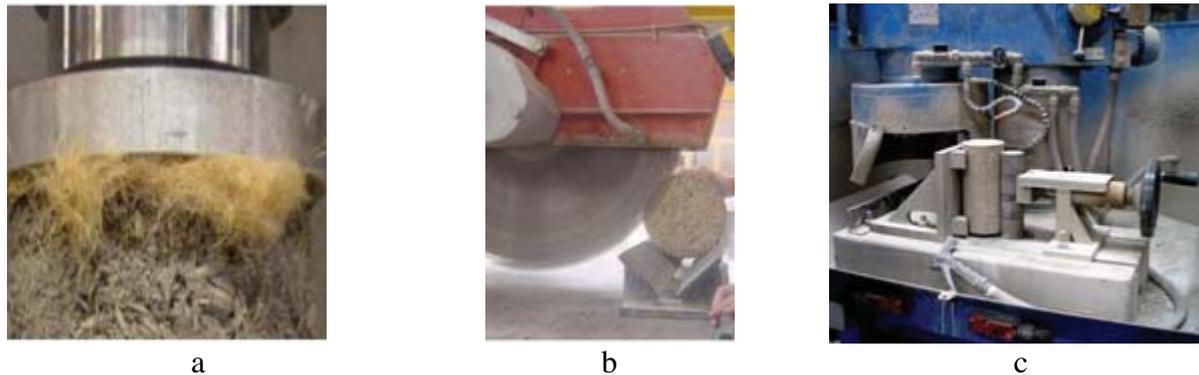


Figure 1-22: Surfaçage d'éprouvette par la laine de chanvre a; le sciage b, et à l'aide d'une rectifieuse c,[19,33]

Après leur préparation, les éprouvettes peuvent alors être testées en compression simple. Les protocoles de compression utilisés par différents auteurs sont synthétisés dans le tableau 1-6.

Référence	Type de chargement	Mode de pilotage	Vitesse de chargement	Niveau de déformation	Type de presse
[33]	Cyclique	En déplacement	5 mm/min	NC	NC
	Monotone	NC	NC		
[30]	NC	En déplacement	5 mm/min	NC	Hounsfield H50KS
[19]	Monotone	En déplacement	0,1mm/sec	NC	Zwick HB 250
	Cyclique	En déplacement (phase de chargement) En force (phase de déchargement)	0, 2 kN/s	NC	
[35]	Cyclique	7,5mm/min (les cubes) et 11mm/min (les cylindres)	NC	1, 2 et 3% et 5 et 10%	Zwick de 200kN
[37]	NC	En déplacement	5 mm/min	NC	Hounsfield H50KS
[73]	Cyclique	En déplacement	Chargement : 5mm/s Et Déchargement : 10 mm/s	NC	INSTRON modèle 5588S de 400 kN,
[38]	Monotone	En déplacement	5 mm/min	NC	NC
[85]	NC	En déplacement	(0,1*d ¹¹) mm/min	NC	H 10 KS Hounsfield

Tableau 1-6: Récapitulatif des protocoles pour l'essai de compression simple

¹¹ L'épaisseur de l'éprouvette

1.5.2 Détermination du module

1.5.2.1 Introduction

A ce jour et à notre connaissance, il n'existe aucune méthode conventionnée pour déterminer le module du béton de chanvre. Or, cette caractéristique est essentielle pour une bonne maîtrise du comportement mécanique de ce matériau. L'absence de méthode commune laisse le choix arbitraire aux auteurs pour déterminer le module. Il en résulte alors de grandes variabilités, liées à la méthode de calcul du module. Dans cette partie, nous décrivons l'état de l'art actuel sur les méthodes utilisées. Dans le contexte de cette thèse, une étude approfondie de l'impact des méthodes utilisées sera menée sur la base des résultats de notre étude, afin de proposer la méthode à utiliser.

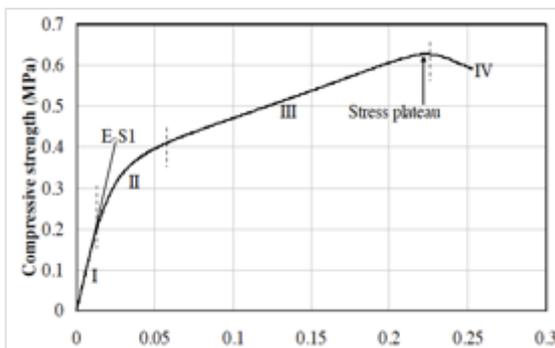
D'une manière générale, la méthode utilisée est liée au type de chargement utilisé lors de l'essai ; pour rappel, on rencontre souvent deux types de chargement : monotone et cyclique, (figure 1-21). D'après les résultats de la littérature, nous distinguons trois types de module :

- module tangent ;
- module flottant ;
- module cyclique.

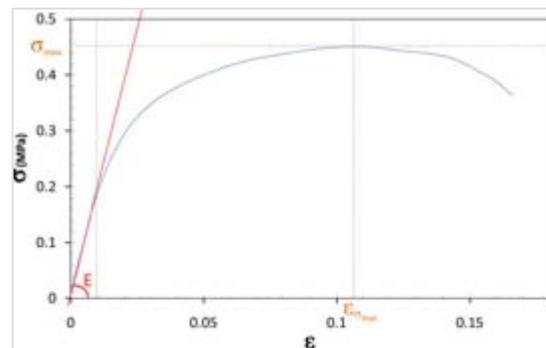
A ses méthodes, s'ajoutent des stratégies pour déterminer le module d'écroutissement et le module élastique.

1.5.2.2 Chargement monotone

Dans ce type de chargement, il est possible de calculer le module élastique soit en début de chargement, i.e. module initial (figure 1-23), soit pour un niveau de déformation donné (figure 1-24), i.e module tangent.

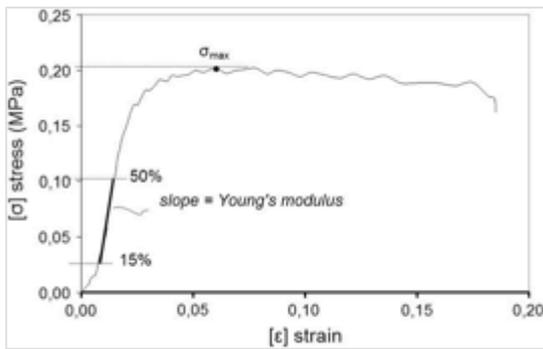


[37]

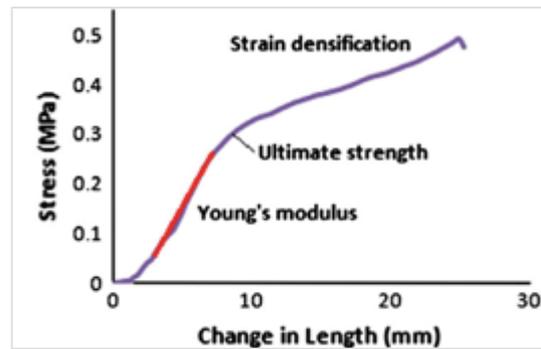


[32]

Figure 1-23: Calcul du module d'Young en phase initiale



[58]

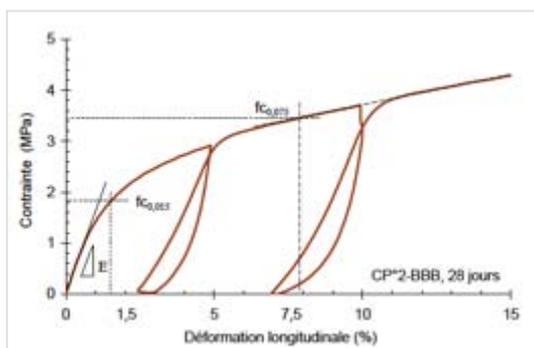


[74]

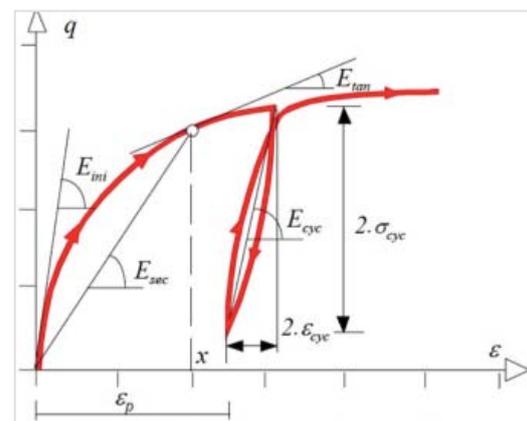
Figure 1-24: Calcul du module d'Young pour un niveau de déformation donné

1.5.2.3 Chargement cyclique

L'exploitation de la courbe contrainte-déformation pour un chargement cyclique peut se faire de différentes manières lorsqu'il s'agit de déterminer le module. Comme pour le chargement monotone, il est possible de calculer le module élastique en début de la 1^{ère} phase de chargement [19], [86] (figure 1-25).



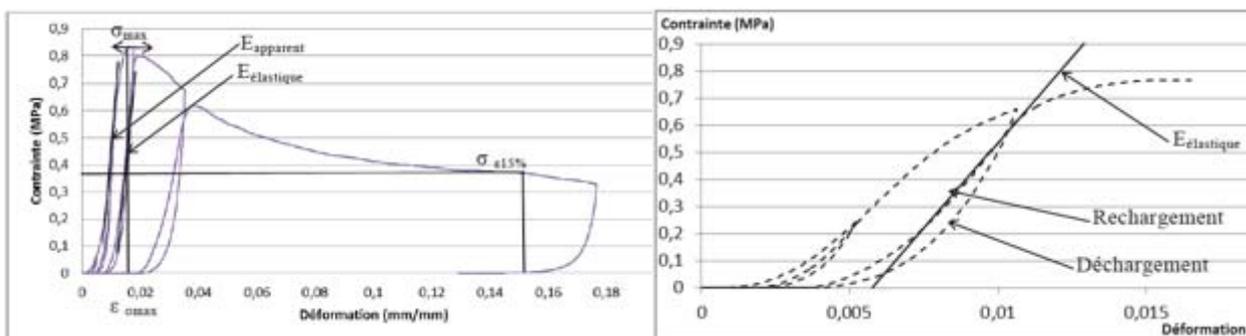
a



b

Figure 1-25: Illustration des différents types de modules dans un essai cyclique [19], [86].

Ce même module calculé en phase 1 de chargement, Chamoin [73] l'a appelé « module apparent » et « le module élastique » est celui calculé en 2^{ème} phase de chargement (figure 1-26).



a

b

Figure 1-26: Illustration du module apparent et élastique sur la courbe contrainte déformation [73]

Par ailleurs, on trouve d'autres types de modules comme le module sécant et le module cyclique, figure 1-25 b [86]. De plus, il est proposé différentes stratégies pour déterminer le module d'écrouissage et le module élastique [87].

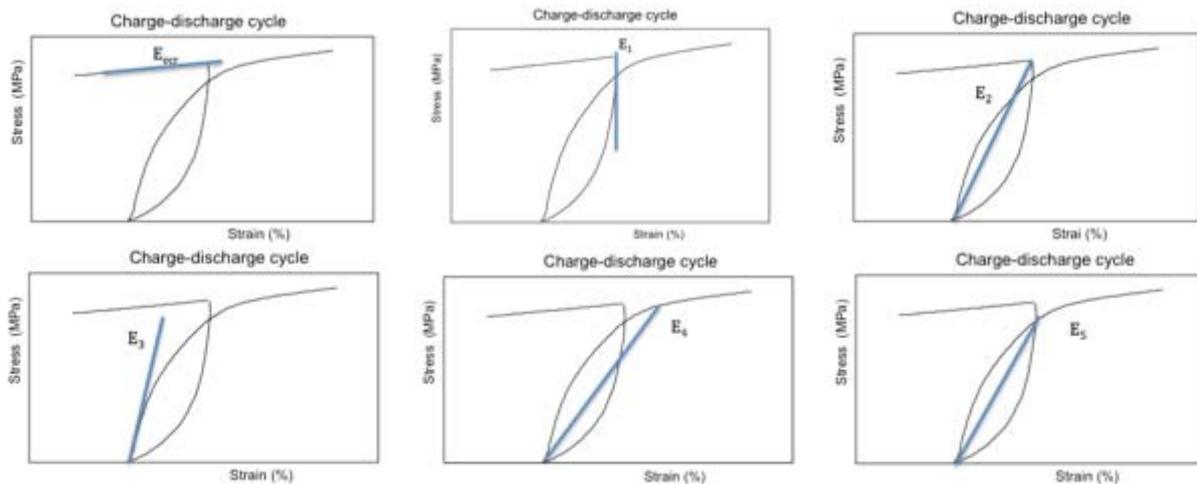


Figure 1-27: Différentes stratégies pour déterminer le module d'écrouissage et le module élastique [87]

Pour le matériau béton de chanvre, la synthèse du tableau 1-7 montre que la plupart des méthodes sont basées sur l'exploitation de la courbe contrainte déformation en utilisant la loi de Hooke, avec des particularités liées au niveau de contrainte considéré. Il convient également de signaler que d'autres méthodes existent comme la méthode non destructive utilisant les ultrasons.

Etude bibliographique

N°	Type de chargement	Forme et taille de l'éprouvette	Méthode de calcul	Références
1,			Non destructive utilisant les ultrasons.	D. Sedan et al. [88]
2,	monotone	cube : 50x50x50 mm ³	Maximum de la pente sur la courbe contrainte-déformation.	S. Elfordy et al. [75]
3,	monotone	cylindre: 150x300 mm ²	Calculé avec la loi de Hooke dans l'intervalle de 15-50% de la contrainte maximale.	P.B de Bruijn et al. [58]
4,	monotone	cylindre: 160x320 mm ²	Calculé dans la phase linéaire de la courbe contrainte-déformation.	L. Arnaud and E. Gourlay [32]
5,	monotone	cylindre : 10,2x16,6 mm ² (après séchage)	Calculé dans la phase linéaire de la courbe contrainte-déformation.	S. Benfratello et al, papier [89]
6,	monotone	cube : 15x15x15 cm ³	Calculé avec la loi de Hooke dans l'intervalle de 15-50% de la contrainte maximale.	A.T Le et al. [90]
7,	monotone	cube : 10x10x10 cm ³	Calculé dans la phase linéaire de la courbe contrainte-déformation.	R. Walker et al. [74]
8,	monotone et cyclique	cylindre : 16x32 cm	Calculé en début de la phase linéaire de la courbe contrainte-déformation.	V. Cérezo [33]
9,	monotone et cyclique	cylindre	Maximum de la pente Calculée en début de la phase linéaire de la courbe contrainte-déformation.	T.T. Nguyen [19]
10,	cyclique	cube : 14x14x7cm ³	1. Le module apparent calculé dans les phases principales de chargement ; 2. Module élastique correspondant au module réversible dans le cycle décharge-recharge.	J. Chamoin [73]
11,	monotone	cylindre	Calculé dans la phase linéaire de la courbe contrainte déformation en utilisant la loi de Hooke.	T.M. Dinh [37]

Tableau 1-7: Synthèses de la littérature sur les méthodes de calcul du module

Dans le cadre de notre travail, nous nous limitons à des méthodes basées sur l'exploitation de la courbe contrainte-déformation sous chargement cyclique. Il est à rappeler que la courbe issue du chargement monotone est superposable à celle du chargement cyclique [19,33] comme illustré sur la figure 1-21. Ce choix permet de comparer les différentes méthodes et modules (élastique, apparent, écrouissage,...). Le chapitre 4 est dédié à l'étude comparative des différentes méthodes de calcul du module.

1.6 Facteurs influant sur les performances du béton de chanvre

A cause de sa grande porosité, le béton de chanvre est un matériau sensible à divers paramètres, qui peuvent être classés dans trois catégories :

- le mode de fabrication ou de mise en œuvre ;
- les méthodes et techniques de mesure des propriétés du béton de chanvre ;
- la nature et la quantité des constituants.

Dans cette partie, nous nous intéressons à des éléments de la littérature susceptibles d'influer ou d'entraîner la variabilité dans les propriétés du béton de chanvre. Etant donné l'objectif de ce travail de thèse que nous rappelons « étude de la variabilité des performances du béton de chanvre en fonction de la chènevotte produite en Auvergne » et au regard des trois catégories ci-haut citées, nous nous intéressons particulièrement à la nature et à la quantité des constituants.

La bibliographie montre que les performances mécaniques du béton de chanvre sont relativement faibles et ont besoin d'être améliorés. En conséquence, nous allons détailler les paramètres d'influence sur les propriétés mécaniques.

1.6.1 Mode de fabrication ou de mise en œuvre

Concernant le mode de fabrication et de mise en œuvre, trois paramètres essentiels sont à prendre en compte. Il s'agit de la contrainte de compactage, le mode de mise en œuvre (par banchage ou par projection) et les conditions de séchage. Une étude expérimentale [33] a permis de mettre en évidence l'effet de la contrainte de compactage. Son augmentation modifie la morphologie du matériau en diminuant sa porosité par réarrangement du squelette granulaire, ce qui résulte en une augmentation de la masse volumique du matériau, (figure 1-28). D'après cette étude, il est possible de multiplier par deux la résistance du matériau.

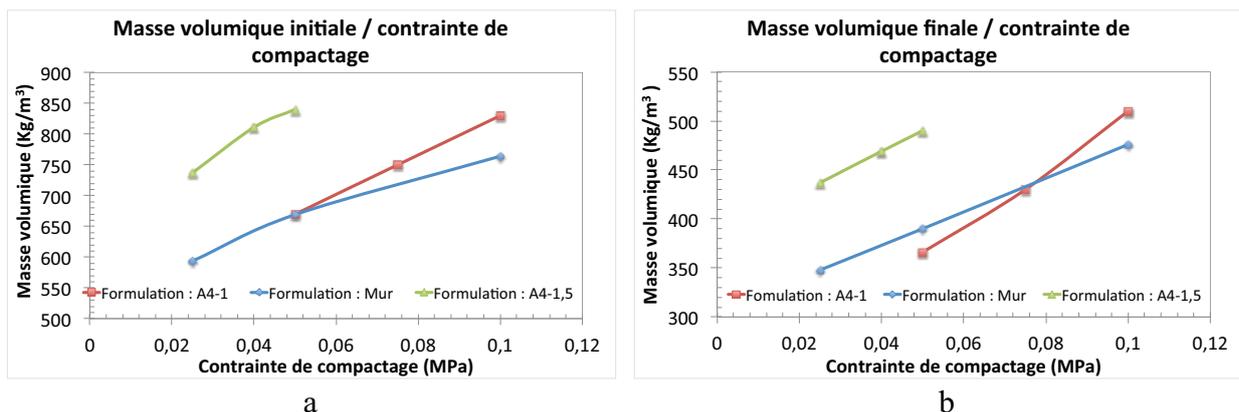


Figure 1-28: Variation de la masse volumique, initiale: a, et finale: b, en fonction de la contrainte de compactage [33].

Toutefois, l'augmentation de la contrainte de compactage n'est pas sans inconvénient car elle diminue le pouvoir isolant du matériau. Il est important d'optimiser cette contrainte de façon à garder un compromis raisonnable entre les performances mécaniques et thermiques.

Le mode de mise en œuvre a aussi un impact sur les propriétés mécaniques et thermiques du béton de chanvre [19,35]. En effet, l'orientation des particules dans le matériau dépend fortement du mode utilisé. Les impacts liés à ce phénomène ont été expliqués dans la section 1.4.2 dans le cas des propriétés thermiques.

Les conditions de séchage ont par ailleurs, une part d'influence sur les caractéristiques du matériau. Les études réalisées par Magniont en 2010 [30], puis par Arnaud et al. en 2012 [32], ont permis de mettre en évidence l'influence des conditions de séchage sur les propriétés mécaniques du béton de chanvre. Dans l'étude de Magniont [30], les échantillons séchés à une humidité relative $HR > 95\%$ ont été comparés aux échantillons séchés en ambiance extérieure. Ces derniers donnent de meilleurs résultats sur toute la durée de séchage jusqu'à 9 mois (figure 1-29 a).

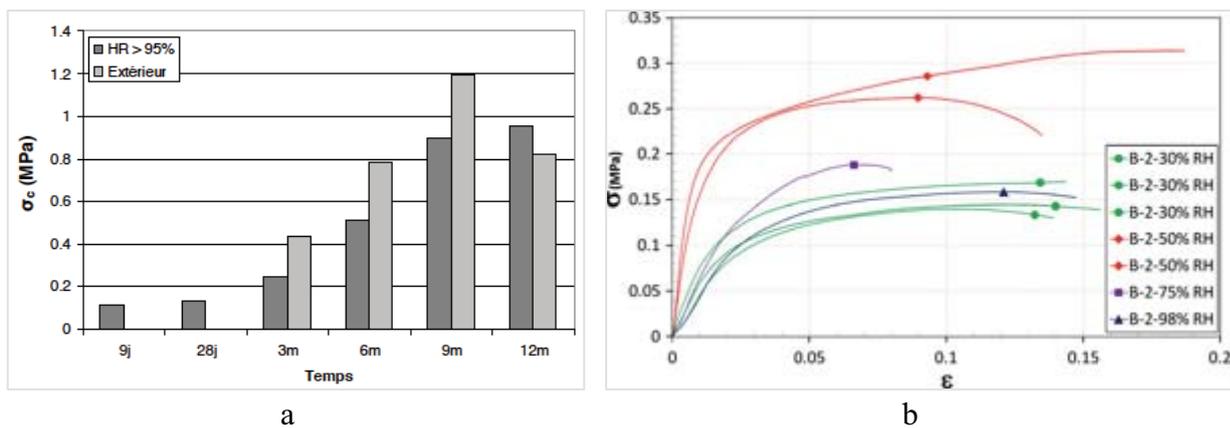


Figure 1-29 : Résistance à la compression en fonction des conditions de séchages, a [30] et b [32].

L'auteur attribue ces résultats à plusieurs facteurs, notamment la carbonatation des éprouvettes qui pourrait avoir une influence positive sur les performances mécaniques. Ou encore la migration des produits d'hydratation dans les pores de la chènevotte qui pourrait être favorisée du fait des variations de l'humidité relative à l'extérieur. D'après l'auteur, les particules de chènevotte pourraient être affectées par leur teneur en eau lors de l'essai. Contrairement aux résultats à 9 mois, la diminution de la résistance à la compression observée entre 9 et 12 mois n'est pas clairement justifiée. Selon l'auteur, il est possible que cette diminution soit liée à la dispersion expérimentale ou à une teneur en eau importante ou encore à des mécanismes de dégradation à long terme pour une exposition en ambiance extérieure.

Dans l'étude d'Arnaud et Gourlay [32], les échantillons ont été séchés dans leurs moules sous différentes valeurs d'humidité relative. Les éprouvettes sont démoulées avant l'essai à 20°C. Les échantillons séchés à HR50% ont une contrainte de compression bien supérieure à ceux séchés à 30%, 75% et 98% simultanément (figure 1-29 b). Ce résultat est justifié par le fait que dans les mélanges à HR élevée, la diffusion du CO₂ responsable de la prise et durcissement du liant est freinée. Cependant, les faibles valeurs de résistance à la compression obtenues sont étonnantes. Il est possible que les interactions physico-chimiques pour une humidité relative élevée, perturbent l'évolution des caractéristiques mécaniques du béton de chanvre.

1.6.2 Nature et quantité des constituants

Le béton de chanvre est un matériau composite, composé essentiellement de la chènevotte et du liant, mélangés avec l'eau, auxquels on ajoute éventuellement les adjuvants. Les proportions de ses constituants et leurs qualités font partie des paramètres essentiels qui gouvernent les propriétés de ce matériau. Dans cette partie, nous allons voir l'influence de la qualité et de la quantité des constituants du béton de chanvre sur ses propriétés.

1.6.2.1 Influence de la formulation

Une étude de la formulation du béton de chanvre basée sur la teneur en liant a permis de mettre en évidence son impact [33]. Pour une concentration volumique faible en liant, de l'ordre de 10%, le béton de chanvre se comporte comme un empilement de particules reliées entre elles par des « ponts » rigides de liant. A cette teneur en liant, correspond une faible résistance mécanique du matériau, de l'ordre de 0,25 MPa pour la contrainte maximale et 4 MPa pour le module d'Young, (tableau 1-8).

Etude bibliographique

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

Tableau 1-8: Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre selon le dosage en liant [33]

Pour le dosage intermédiaire, les particules de chènevotte sont considérées comme entourées par une coquille de liant qui durcit au fur du temps, ce qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques. Pour les forts dosages en liant, les particules de chanvres sont complètement noyées dans la matrice de liant. C'est essentiellement cette matrice qui joue le rôle mécanique, ainsi le comportement du matériau se rapproche de celui du liant pur. Ces résultats montrent la forte influence de la formulation, puisque en variant le dosage en liant de 10 à 40% on multiplie par 40 fois la valeur du module d'Young.

L'aspect formulation a aussi été étudié sous une autre forme, en terme de rapports Liant/Granulat (L/G) et Eau/Liant (E/L). Les résultats sur le rapport liant/granulat illustrés en figure 1-30 ne sont pas compréhensibles, on a l'impression que c'est plutôt l'inverse. Un rapport L/G élevé, correspond à une grande quantité en liant. Or, un fort dosage en liant comme nous l'avons vu précédemment (tableau 1-8), améliore la résistance à la compression. Il nous semble que l'auteur se soit trompé dans la légende du graphique sur la figure 1-30.

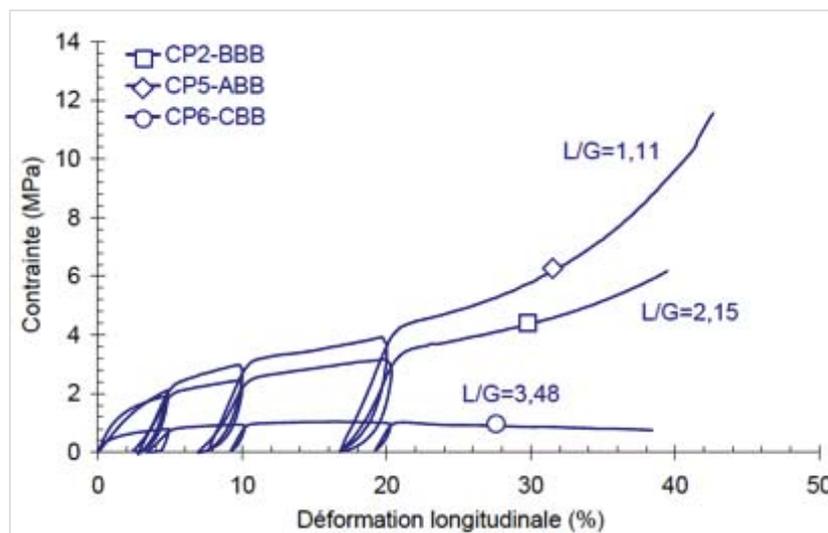


Figure 1-30: Effet du rapport L/G sur le comportement en compression de trois bétons de chanvre de même configuration, [19].

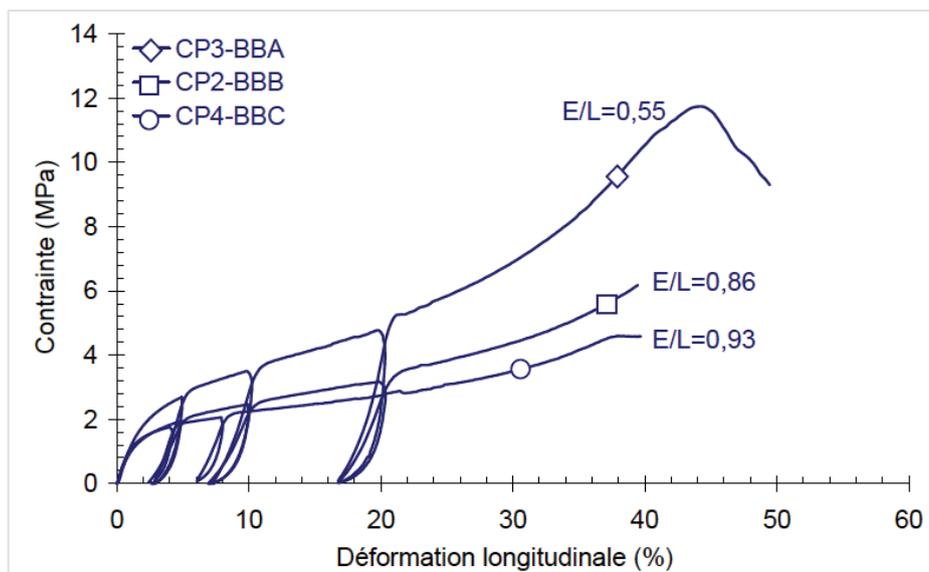


Figure 1-31: Effet du rapport E/L sur le comportement en compression à 28 jours de trois bétons de chanvre de même configuration, [19].

Du fait de la concurrence pour l'eau de gâchage, entre la chènevotte et le liant, il s'avère assez complexe d'analyser l'influence du rapport E/L sur les propriétés du béton de chanvre. Malgré cette complexité, Nguyen [19] a proposé deux raisons responsables de l'amélioration de la résistance à la compression lorsque le rapport E/L diminue (figure 1-31):

- En effet, d'après l'auteur, la diminution du rapport E/L implique une augmentation du dosage en granulats. Cette raison n'est pas assez claire pour nous et est en désaccord avec les résultats obtenus par Cérezo [33] sur l'influence du dosage en liant sur la résistance à la compression du béton de chanvre. Au contraire, la diminution du rapport E/L entraîne une augmentation du dosage en liant, d'où l'amélioration de la résistance à la compression.
- Une autre raison pour laquelle nous sommes d'accord, est que l'augmentation du rapport E/L correspond à une augmentation de l'eau de gâchage. Lors du séchage, cette quantité d'eau s'évapore laissant derrière elle les vides, résultant en une plus grande porosité. Par conséquent, le matériau présente une faible résistance à la compression.

En ce qui concerne l'influence du rapport L/G et E/L, les résultats obtenus par l'auteur n'ont pas révélé des impacts significatifs sur la conductivité thermique du béton de chanvre.

Dans cette partie, nous avons mis en évidence l'influence de la formulation sur les propriétés du béton de chanvre, notamment sa teneur en liant. Jusqu'ici, il s'agit de la quantité du liant dans le mélange qui est étudiée. Il a aussi été démontré que non seulement la quantité du liant influe sur les propriétés du béton de chanvre, mais aussi sa nature et sa qualité comme nous les verrons dans le paragraphe suivant.

1.6.2.2 Influence de la nature du liant

L'influence du liant peut être considérée de deux manières, soit selon la quantité dans la composition du mélange, soit selon la nature elle-même du liant. Dans le premier cas, le dosage en liant a été analysé dans le paragraphe précédent sur l'influence de la formulation. Les résultats de la littérature synthétisés dans le tableau 1-9 sont aussi en accord avec ce que

nous avons vu dans la partie relative à la formulation.

Références	Teneur en liant (%)	σ (MPa)	E (MPa)	ϵ max (%)	Echéance
[58]	22-33	0,15-0,83	12,65-49,40	-	126 jours
[75]	34	0,18-0,85	4-35	-	30 jours
[37]	43	0,77-1,14	46,79-71,69	4-30,0	28 jours
[38]	29,5-39,6	0,06-0,59	0,8-28	-	28 à 90 jours
[91]	25-57,1	0,10-0,40	3-25	-	28 jours
[32]	24,6-47,7	0,19-1,18	7-160	3,2-13,2	28 jours
[33]	24,6-47,7	0,28-0,98	4-160	2,9-14,0	90 Jours
[19]	35,4-49,7	1,92-3,60	39-147	-	28jours

Tableau 1-9: Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre en fonction de la teneur en liant

Cependant, les résultats étant issus de divers auteurs, d'autres paramètres autre que la quantité ou la nature du liant influent sur les résultats, comme par exemple la mise en œuvre par projection (distance de projection à laquelle se trouve l'opérateur) [75], les échéances d'essais [38, 33, 58, 91] et la contrainte de compactage des éprouvettes [19].

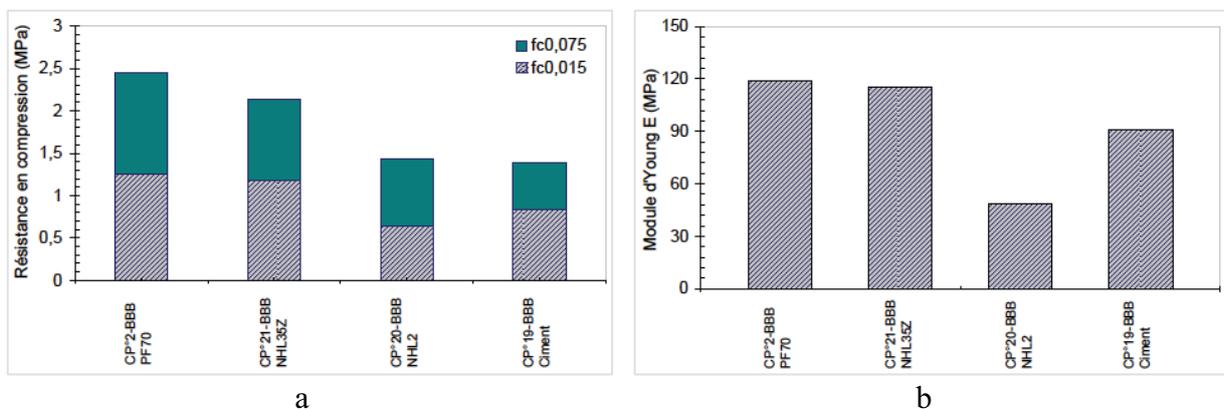


Figure 1-32: Résistance à la compression (a) et module d'Young (b) du béton de chanvre à 28 jours selon la nature du liant [19],

L'influence de la nature du liant a été particulièrement étudiée par Nguyen [19], sur quatre types différents de liant. Les résultats à 28 jours (figure 1-32), ont montré de meilleures résistances mécaniques pour les mélanges contenant la chaux hydraulique ou plus des pouzzolanes, respectivement le Tradical PF70 et HNL 3,5Z.

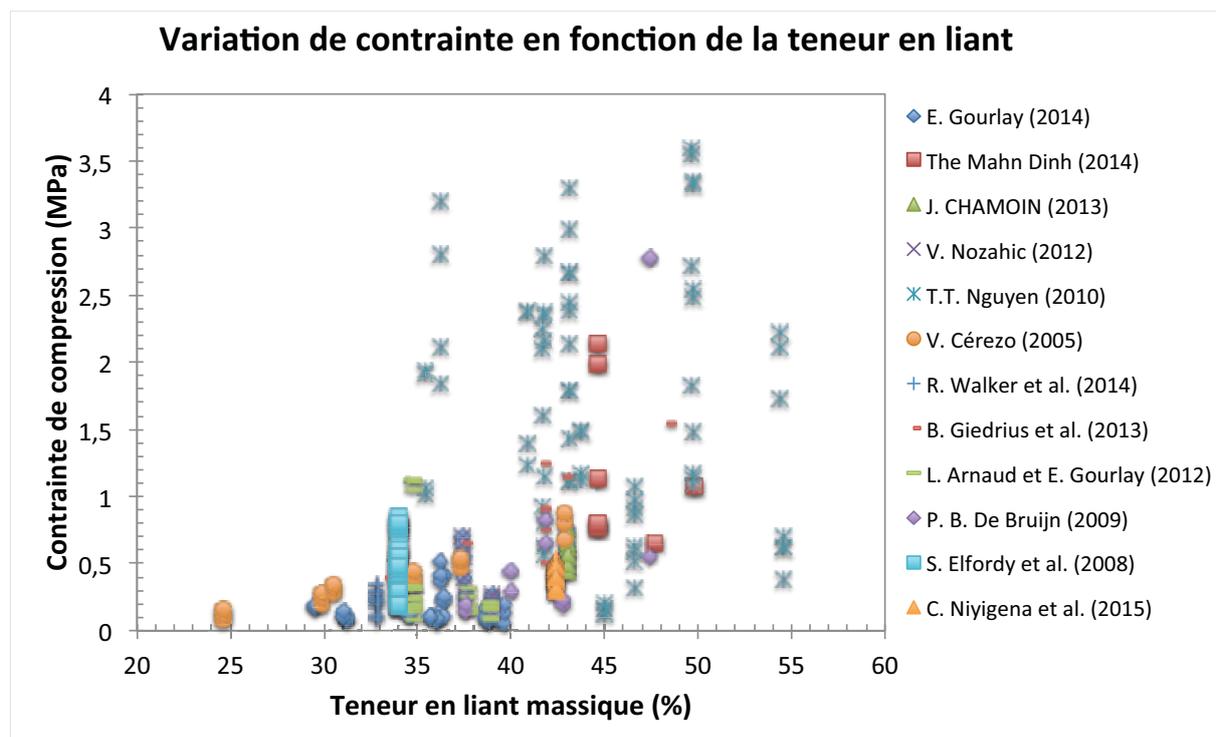


Figure 1-33: Variation de contrainte du béton de chanvre en fonction de la teneur en liant massique, [19,32,33,35,37,38,58,73–76,85].

En revanche, les éprouvettes fabriquées à base du ciment présentent de faibles valeurs de résistance à la compression et de module d'Young. L'auteur justifie ces résultats par une mauvaise hydratation, perturbée par l'absorption d'eau par la chènevotte. D'après lui, à déformations importantes, le comportement fragile de la pâte de ciment peut conduire à de faibles résistances et à une mauvaise accroche sur des granulats déformables. Les résultats de la littérature synthésisés sur la figure 1-33 montrent bien une augmentation de la contrainte de compression proportionnellement à la teneur en liant. Comme pour le cas du module d'Young, la dispersion constatée est le fruit des différents paramètres adoptés par les auteurs.

1.6.2.3 Influence du chanvre

Certaines propriétés de la chènevotte ont été identifiées comme étant à l'origine des désordres constatés lors de la prise et du durcissement du béton de chanvre. Ces désordres empêchent les bonnes liaisons liant/chènevotte, conduisant à de faibles performances mécaniques du matériau. Ces propriétés sont souvent liées à la morphologie de la chènevotte (taille des particules) à sa composition, notamment sa teneur en fibres et ou en poussières ainsi qu'à sa composition chimique. Dans cette partie, nous avons recensé les éléments de la littérature avec l'objectif de montrer dans quelle mesure la nature du chanvre peut affecter les propriétés du béton de chanvre.

1.6.2.3.1 Morphologie

L'influence morphologique de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre, a fait l'objet d'une étude menée par Arnaud et Gourlay [32]. Trois types de chanvre à épaisseur égale et ayant des largeurs, longueurs et masses volumiques différentes ont été utilisés, (figure 1-34). Afin d'éviter l'influence du liant, un seul liant a été utilisé, il s'agit d'un mélange de 75% de chaux aérienne, de 15% de chaux hydraulique et de 10% de pouzzolane.

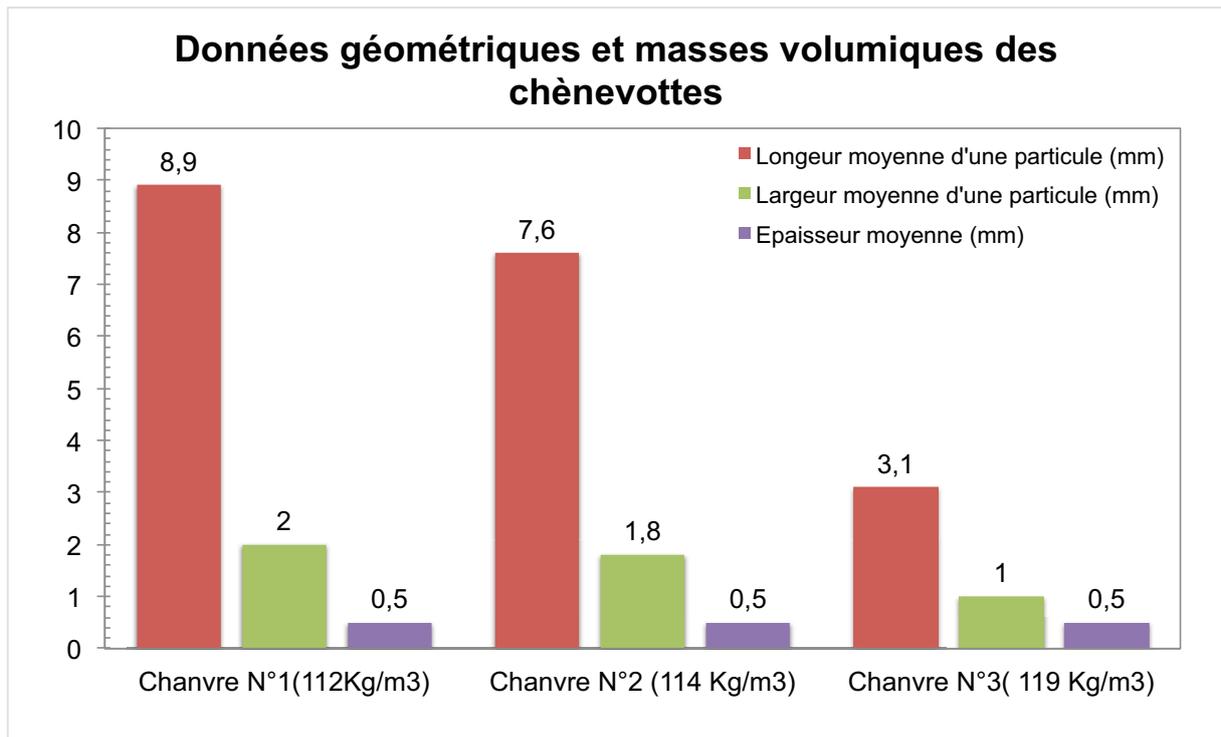


Figure 1-34: Données géométriques et masses volumiques des trois types de chènevottes [32]

Les particules du chanvre N°1 sont légèrement plus grandes que celles du chanvre N°2 par conséquent, leur masse volumique est plus petite et leur résistance mécanique est plus faible (figure 1-35). Les éprouvettes fabriquées avec la chènevotte plus fine ont une résistance faible à 28 jours, mais bien meilleure à 4 mois et augmente significativement au-delà de ce délai. D'après les auteurs, la chènevotte N°3 est moins poreuse car ses particules sont plus fines que les autres. Par conséquent, le CO₂ responsable de la prise et du durcissement est moins diffusé, ce qui ralentit la cinétique de séchage des éprouvettes et conduit à des faibles résistances mécaniques à court terme.

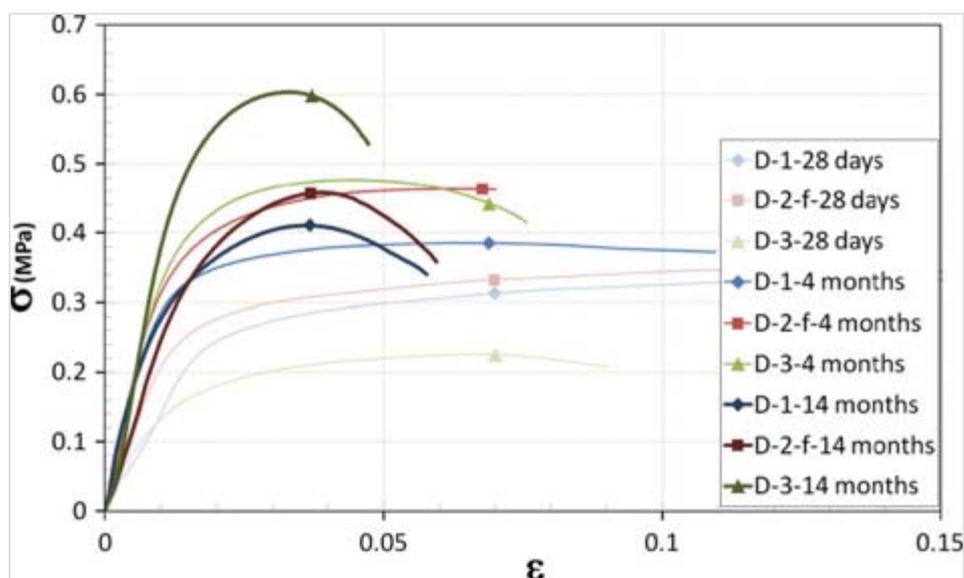


Figure 1-35: Résultats de résistance à la compression aux différents âges pour les trois types de chanvre [32]

En revanche, les particules étant fines, elles sont bien enrobées par le liant au moment de la fabrication ; ce qui explique les meilleurs comportements mécaniques observés à long terme.

En conclusion, l'utilisation de la chènevotte ayant de fines particules peut contribuer à améliorer les performances mécaniques du béton de chanvre à long terme. Cette conclusion n'est pas tout à fait en accord avec les travaux de Nguyen [19]. Comme Arnaud et Gourlay [32], lui aussi a constaté les meilleures performances mécaniques à 28 jours pour de plus grandes particules mais n'a pas constaté de différences significatives à 90 jours. Par ailleurs, les résultats de l'étude de Stevulova et al. [92] sont en accord avec les résultats d'Arnaud et Gourlay [32].

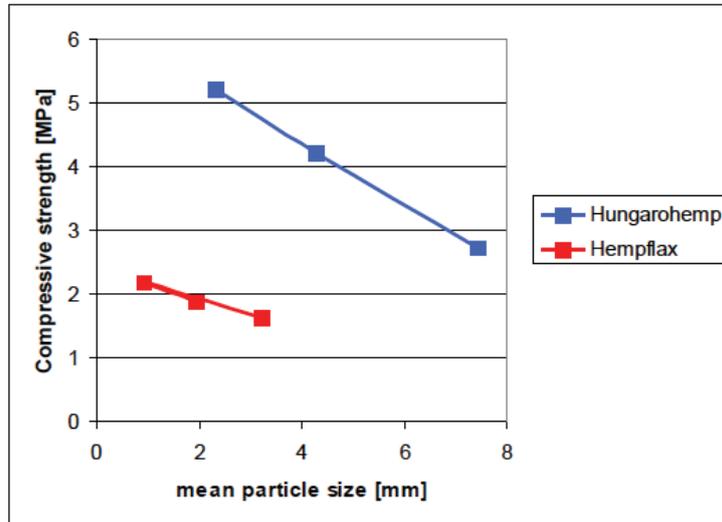


Figure 1-36: contrainte de compression en fonction de la taille des particules et de leurs origines [92]

Dans l'article [92], six chanvres ayant deux origines différentes avec des tailles différentes ont été étudiés dans les mêmes conditions (même liant, formulation, etc.). Les résultats à 28 jours ont permis de mettre en évidence l'impact de la taille des particules.

En effet, l'augmentation de la longueur moyenne d'une particule, entraîne la diminution de la résistance à la compression. En même temps, la résistance à la compression est différente selon les origines des chanvres. Sur ce dernier point, les auteurs se limitent à dire que l'origine du chanvre peut impacter le comportement mécanique du béton de chanvre mais ne donnent pas de justifications. L'origine en soi n'est pas un paramètre à considérer, mais son impact sur l'irrégularité du chanvre peut être étudié en se basant sur d'autres caractéristiques, comme par exemple, la composition chimique, la porosité et l'absorption d'eau. Pour cette raison, d'autres caractéristiques seront prises en compte dans notre étude comme le détaille le chapitre 2.

1.6.2.3.2 Teneur en fibres

En plus de la taille des particules de la chènevotte, la teneur en fibres peut aussi influencer sur les caractéristiques finales du béton de chanvre. De nombreuses études à ce sujet ont été réalisées et nous présentons ici une synthèse des résultats. Chamoin [73] a étudié deux types de chènevottes: une contenant les fibres et l'autre sans fibre, notées formulation F1 (sans fibre) et la formulation F2 (avec fibres) du tableau 1-10. Les conditions de fabrication sont exactement les mêmes, notamment, la nature du liant, la proportion liant/chanvre et le mode de mise en œuvre. La seule différence concernait la quantité d'eau utilisée, étant donné que le chanvre fibré nécessite plus d'eau de gâchage. Les résultats obtenus ont permis de tirer quelques conclusions sur l'effet des fibres.

	ρ (Kg/m ³)	E_{apparent} (MPa)	$E_{\text{élastique}}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_{max} (mm/mm)	$\sigma_{\epsilon 15\%}$ (MPa)
F1	427,27	88,43	134,92	0,73	2	0,21
F2	469,17	34,48	66,58	0,44	2	0,15

Tableau 1-10: Résultats expérimentaux du chanvre sans fibres F1 et chanvre avec fibres F2 [73]

Le chanvre sans fibre possède de meilleures performances mécaniques, et donc l'utilisation du chanvre fibré affecte la prise du liant. En effet, l'importante quantité d'eau de gâchage induite par le chanvre fibré entraîne une dilution du liant et conduit à sa faible résistance à l'état durci. Finalement, l'utilisation du chanvre fibré augmente la masse volumique apparente du béton de chanvre (tableau 1-10), mais diminue sensiblement ses performances en compression.

Dans une étude antérieure [19] les fibres permettaient de maintenir la structure des éprouvettes et empêchaient ces dernières de s'effondrer. Ceci laisse penser a priori à une amélioration des performances mécaniques. Toutefois, d'après l'analyse des résultats ce n'est pas le cas : les éprouvettes fabriquées avec du chanvre fibré ont finalement des valeurs faibles de résistance à la compression et de module d'Young.



a,



b,

Figure 1-37: Mécanisme de rupture en compression pour l'éprouvette fabriquée avec du chanvre pur (a) et du chanvre fibré (b) [19]

L'auteur explique ces résultats par une porosité inter-granulaire plus importante pour le béton de chanvre fabriqué à base de la chènevotte fibré. De plus, il est possible que l'adhésion entre les fibres et le liant soit mauvaise que celle entre la chènevotte et le liant, ce qui dégrade davantage les performances mécaniques.

Par ailleurs, De Bruijn [58] n'observe aucune différence en termes de comportement mécanique, entre l'utilisation de la chènevotte contenant des fibres et celle de la chènevotte pure. Afin d'apporter des éclaircissements à ce sujet une étude sur l'effet de la teneur en fibre était prévue dans ce travail de thèse ; pour des raisons techniques expliquées en 5.1.2.1 et 5.1.2.2, nous n' avons pas pu mener cette étude.

1.6.2.3.3 Composition chimique

De récentes études ont été menées [93,94] pour mettre en évidence l'effet des composés chimiques de la chènevotte sur les caractéristiques du béton de chanvre. Trois types de chènevotte ont été étudiés, dont les compositions chimiques sont détaillées dans le tableau 1-11.

Composés (% masse sèche)	CA	CB	CC
Cellulose	47,3	45,6	49,2
Hémicellulose	18,3	17,8	21,0
Lignine Klason	21,8	23,3	21,9
Extractibles Soxhlet	6,0	5,1	6,2
Autres	6,6	8,1	1,6
Taux de cendres	3,7	2,6	3,5

Tableau 1-11: Composition chimique des trois différentes chènevottes, CA; CB; CC, [93,94]

Lorsque la chènevotte est mise dans l'eau, les molécules faiblement liées à ses parois se dissolvent, ces composés extractibles à l'eau sont des « lixiviats ». Lors de la fabrication du béton de chanvre, ils se mélangent à l'eau de gâchage et par conséquent à l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment, ce qui peut affecter sa prise et son durcissement. De ce fait, la connaissance de la nature de ces lixiviats est nécessaire.

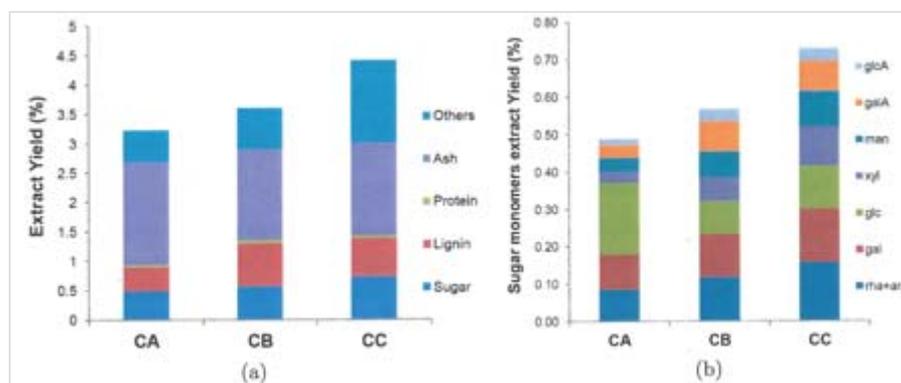


Figure 1-38: Composition chimique (a) et répartition des monomères de sucres (b) des lixiviats pour trois différents chènevottes, CA; CB et CC, [93,94].

Lors de cette étude, les résultats montrent que ces lixiviats sont principalement constitués de cendres, de lignine, de sucres, de protéines ainsi que d'autres composés non encore identifiés, (figure 1-38). Les cendres peuvent provenir des minéraux constituant la plante ou encore des poussières qui n'ont pas été complètement éliminées lors du défibrage [95]. Les trois types de chènevotte contiennent de la lignine en quantité plus ou moins variées, or la lignine a une incidence significative sur le temps de la prise du ciment [96]. C'est probablement cette teneur en lignine qui est à l'origine du phénomène de « **fausse prise** » constatée lors de cette étude. Par ailleurs, il a été démontré que le saccharose ralentit l'hydratation du ciment [97,98]. Or, les lixiviats contiennent du sucre, ce qui justifie le retard de prise également constaté.

En conclusion, la nature des extractibles à l'eau dépend du type de chènevotte. Ils réagissent comme de super-retardateur de prise, d'où leur impact néfaste sur les performances du béton de chanvre.

1.7 Variabilités des matériaux

1.7.1 Introduction

Le choix des matériaux est une étape cruciale dans la mesure où la qualité finale de l'ouvrage en dépend profondément. De fait, il est nécessaire d'avoir une bonne maîtrise des propriétés des matériaux constitutifs. Cependant, les sources d'incertitudes qui y sont associées sont nombreuses (intrinsèques, instruments de mesure, etc.). D'une manière générale, le caractère aléatoire que nous pouvons avoir d'un paramètre peut avoir deux origines : la variabilité, conséquence intrinsèque du phénomène étudié, et l'incertitude, résultat d'une information insuffisante vis-à-vis de ce paramètre. Le plus contraignant est celui lié aux variabilités intrinsèques du matériau étudié. Ces variabilités peuvent alors être principalement de deux origines distinctes :

- naturelles selon qu'elles résultent d'un processus de croissance, par exemple le bois dont les propriétés dépendent des essences ;
- artificielles selon qu'elles résultent d'un processus de fabrication, par exemple la non homogénéité du béton suite à une mauvaise vibration.

Il est alors primordial, bien que pas forcément aisé, de distinguer les deux sources : variabilité et incertitude.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la problématique associée à la variabilité des propriétés des matériaux et en particulier ceux utilisés en construction. L'objectif étant de faire le point sur la façon dont cette problématique est traitée dans la littérature.

1.7.2 De la prise en compte des propriétés des composants à la variabilité des caractéristiques d'un matériau

Beaucoup de matériaux du génie civil sont obtenus en mélangeant d'autres matériaux de base dits composants. Par exemple le béton classique s'obtient par un mélange de granulats, de liants, d'eau et d'adjuvants. Ces composants eux mêmes étant des matériaux, ils sont caractérisés par des propriétés ayant certaines variabilités. En conséquence, le béton qui en est fabriqué a forcément des propriétés variables. Nous distinguons alors les propriétés des éléments d'entrée de celles des éléments de sortie.

Aït-Mokhtar et al. [99] se sont intéressés à la variabilité des propriétés de durabilité du béton. Pour un béton classique fabriqué avec des procédés industriels, ils ont identifié et pris en compte les différentes sources de variabilité. Ces sources sont relatives à la nature des constituants du béton, aux erreurs de pesé de ces mêmes constituants, à la qualité de vibration et de compactage, et à la température initiale du béton ainsi qu'aux conditions atmosphériques. Les échantillons de deux catégories à base de ciment CEM I et CEM III pour le béton de classe C50/60 et C40/50 ont été fabriqués, respectivement. Les éprouvettes de 113 mm de diamètre et de 226 mm de hauteur ont été fabriquées dans les mêmes conditions que l'ouvrage afin d'avoir les mêmes propriétés. Cependant, les contraintes du site peuvent entraîner des variabilités entre les matériaux réels et les échantillons. Parmi ces contraintes, nous pouvons citer : la présence d'armatures, les dimensions réelles différentes de celles de l'échantillon (effet d'échelle), la hauteur de chute, etc.

Dans ces conditions, les auteurs ont obtenu des variabilités des propriétés caractérisées par des coefficients de variation de l'ordre de 7,3 à 12 %, de 9,3 à 13,3% et de 5,4 à 8,2% pour la contrainte de compression, la résistance à la traction et le module d'Young, respectivement. L'étendue de la classe des coefficients de variation obtenus est similaire à celle obtenue dans les études antérieures de Mirza et al. [100] et Chmielewski et Konokpa [101], alors que dans

ces dernières études, le béton avait été réalisé avec beaucoup de soin. Malgré ces précautions et la similarité des coefficients de variation, leur résistance était faible par rapport aux résultats de l'étude d'Aït Mokhtar et al. [99]. Pour des bétons à haute performance avec des valeurs de contrainte de compression similaires à l'étude d'Aït Mokhtar et al. [99], les coefficients de variation obtenus par Torrenti [102] et Cussigh et al. [103] sont environ deux fois plus petits que ceux de l'étude d'Aït Mokhtar et al. [99]. Ces différences significatives constatées sur les coefficients de variation de ces matériaux mettent en évidence la sensibilité de la variabilité des propriétés des matériaux vis-à-vis de leur nature et des paramètres pris en compte en entrée.

L'aboutissement de l'étude d'Ait Mokhtar et al. [99] était de prédire la durée de vie du béton par une étude de simulation basée sur les approches fiabilistes. De ce fait, il devient important de caractériser la variabilité des paramètres du modèle en proposant des lois de probabilité qui s'ajustent au mieux aux résultats statistiques observés. Il existe plusieurs méthodes pour tester l'ajustement d'une loi de probabilité à une distribution statistique comme par exemple l'estimateur du maximum de vraisemblance ou encore le test non-paramétrique de Kolmogorov-Smirnov. En utilisant la méthode de l'estimateur du maximum de vraisemblance, Aït Mokhtar et al. [99] ont testé 12 lois de probabilité différentes, dans la perspective de pouvoir proposer des lois facilement utilisables dans le processus de calcul. Ils ont proposé l'utilisation des lois de probabilité classiques dont les paramètres sont faciles à obtenir, à savoir les lois, normale, log-normale et gamma.

Dans une autre étude [104], les variabilités des propriétés mécaniques du béton auto-plaçant ont été étudiées. Les paramètres comme la taille maximale des granulats, la pâte liante et la teneur en granulat ont été considérés. Les propriétés comme la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young sont analysés à la sortie. L'utilisation des méthodes statistiques a fait l'objet de plusieurs études antérieures. Dans le cas de cette étude [104], les auteurs rappellent les erreurs souvent commises lors de l'utilisation de ces méthodes. Il s'agit principalement du choix de méthodes inadéquates par le rapport au type de données que l'on a à analyser, ou encore l'insuffisance des données. Dans ce dernier cas, afin d'avoir de valeur de moyenne et d'écart-type avec des erreurs limitées, il est important d'utiliser des échantillons statistiquement significatifs. Ainsi, les auteurs ont utilisé 10 à 24 échantillons pour chaque type de formulation étudiée.

Le béton auto-plaçant fabriqué était composé essentiellement de ciment CEM I 42,5R, les deux sables utilisés ont des diamètres compris entre 0-2mm et 0-5mm et les graviers sont de diamètres 5-12mm et 12-18mm. L'adjuvant utilisé est un superplastifiant : polycarboxylate. Les éprouvettes utilisées sont des cylindres 150x300mm.

Les résultats montrent des coefficients de variation de 3,6%, 5,7% et 14,4% pour le module, la contrainte de compression et de traction, respectivement. Ces variabilités observées sont inférieures à celle du béton classique [105]. Ceci est probablement dû d'une part à un nombre limité d'éprouvettes, puisque il est connu que la variabilité diminue avec le nombre d'éprouvettes et par la bonne homogénéité du béton auto-plaçant, car dans la mesure où il n'y a pas de compactage, on limite le compactage hétérogène dans l'échantillon lors de sa fabrication. Au-delà du calcul de la moyenne et du coefficient de variation, les résultats expérimentaux ont été ajustés à la distribution normale. Cette distribution est couramment utilisée pour un bon contrôle de qualité de la contrainte de compression [105].

Non seulement la variabilité n'a pas été étudiée pour les matériaux utilisés dans les ouvrages neufs mais aussi dans la rénovation. Ainsi, une étude réalisée par [106] s'est intéressée à la considération de la variabilité des polymères renforcés par des fibres, FRP (Fiber Reinforced Polymer), dans l'analyse fiabiliste de la résistance d'un tablier d'un pont.

Dans la mesure où le FRP sont utilisés dans la rénovation avec des conditions variables (les intempéries, moyen de mise en œuvre) il est possible que ces conditions entraînent la

variabilité des propriétés de ce matériau. De plus, d'après les auteurs de l'étude, il existe plusieurs sources de variabilité dans les propriétés du matériau FRP. On peut citer la variabilité intrinsèque liée au matériau lui-même ; les méthodes de fabrication et de mise en œuvre qui s'amplifie spécialement lorsqu'il s'agit de la mise en œuvre manuel sur place (peu de moyens de contrôle de qualité). Par ailleurs, d'autres sources comme la géométrie de la structure, ainsi que le modèle utilisé pour leur conception sont aussi susceptibles d'engendrer des variabilités dans les propriétés des matériaux.

Dans le but d'évaluer la variabilité du matériau induite par les causes citées ci-dessus, les auteurs ont décidé d'analyser en sortie, l'épaisseur, le module d'Young ainsi que la résistance, c'est grâce à des données statistiques et de leur distribution qu'ils mettent en évidence l'impact de la fabrication in situ (manuelle) sur la variabilité des propriétés.

En parallèle avec la réhabilitation d'un tablier d'un pont, les échantillons ont été fabriqués sur place dans les mêmes conditions que le pont réhabilité, afin d'analyser la variabilité de ces matériaux. Les éprouvettes (panneaux) de 45,7cm de longueur et 15,2cm de largeur ont été fabriquées avec trois épaisseurs différentes de 1, 2 et 3 couches respectivement. Un minimum de trois panneaux par épaisseur a été fabriqué dans les mêmes conditions que celles de réhabilitation du tablier. Après séchage, les panneaux ont été découpés pour obtenir les éprouvettes de 25,4mm de largeur et 254mm de longueur à tester en traction.

Dans ces conditions d'essais, et dans le cas de la résistance, il a été démontré que l'augmentation du nombre de couches entraîne une augmentation du coefficient de variation. L'augmentation des couches entraîne davantage l'utilisation des résines ce qui peut occasionner une mauvaise mise en œuvre entraînant ainsi la mauvaise qualité (forte variabilité) du matériau. Ainsi, ils ont obtenu les résultats synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Nombre de couche	Valeurs du coefficient de variation (%)		
	Résistance à la traction	Module de traction	épaisseur
1.	12,1	13,4	0,044
2.	12,2	8,4	0,032
3.	13,6	9,5	0,045

Tableau 1-12: Valeurs des coefficients de variation des différentes propriétés [104]

Pour mieux comprendre la variabilité des données, il est nécessaire d'ajuster les résultats expérimentaux aux distributions statistiques. Dans l'étude [104], les auteurs ont fait le choix d'utiliser quatre lois, à savoir la distribution normale, log-normale, Weibull et Gamma. D'après eux, elles sont couramment utilisées dans l'analyse fiabiliste des structures de génie civil ou encore dans les FRP composites. Pour le test d'ajustement, ils ont utilisé le test Khi2 de Pearson. Sous ces conditions, la distribution de Weibull s'ajuste mieux à la résistance et la distribution log-normale pour le module. Pour l'épaisseur, la meilleure distribution est celle de Weibull suivie de la loi normale et log-normale.

Au delà du béton (classique, auto-plaçant, etc.) d'autres matériaux présentent également des variabilités et ont d'ailleurs été étudiés dans la littérature. Nous pouvons citer notamment le bois et le sol. Ainsi, la synthèse des résultats de la bibliographie faite par Breysse [107] sur les ordres de grandeur estimés de la variabilité pour les propriétés usuelles des principaux matériaux de constructions sont donnés dans le tableau 1-13.

Etude bibliographique

Matériau	propriété	coefficient de variation	référence
Béton	résistance en compression	4 à 10 % (laboratoire) 17% 8 à 11% (BHP sur chantier) 5 à 7% (BHP laboratoire)	Indelicato, 1993 Torroja, 1950 Clément, 2001
	résistance en compression	9 à 25% (béton de fibres, selon résistance moyenne)	Breysse et Attar, 1996
Bois	module d'élasticité longitudinal	23% (bois sain, épicéa)	Rouger et al., 1993
	résistance en traction longitudinale	33% (bois sain, épicéa)	Rouger et al., 1993
	résistance en flexion	24 à 41% (bois de charpente, selon qualité du bois)	Renaudin, 1997
Sols	poids volumique	5 à 10%	JCSS, 2006
	cohésion non drainée	23% (sol fin compacté) 10 à 40% (argiles)	Kouassi, 1998 Phoon et al., 1996
	coefficient de perméabilité	68 à 90% (argile saturée)	Duncan, 2000

Tableau 1-13: ordre de grandeur de la variabilité des propriétés mécaniques des matériaux de construction [107]

Pour le béton, les essais au laboratoire ont de faibles variabilités par rapport aux essais sur chantier. La cause principale réside dans les conditions de mise en œuvre sur chantier qui sont difficiles à contrôler, malgré leur forte influence sur les propriétés du béton.

1.7.3 Conclusion

Dans cette partie, nous avons fait le point sur la problématique associée à la variabilité des propriétés des matériaux de construction. Les résultats présentés sont essentiellement ceux des bétons à l'exception des bétons à base des particules végétales. Comme nous l'avons vu tout au long de la partie bibliographique, dans le cas du béton de chanvre, plusieurs études ont été menées pour caractériser les constituants ou encore le matériau lui-même. Cependant, la problématique associée à la variabilité n'a pas été abordée ni pour les propriétés des constituants ni pour le béton de chanvre lui-même. En conséquence, cette étude s'avère nécessaire. En s'inspirant des démarches utilisées dans les travaux synthésés en 1.7.2, une étude sur la variabilité des propriétés du béton de chanvre prenant en compte les caractéristiques de ses composants est proposée dans ce manuscrit de thèse.

1.8 Conclusions et démarche de l'étude

1.8.1 Conclusions

Nous avons vu que les résultats de la littérature sur les propriétés du béton de chanvre montrent une grande dispersion. Les paramètres qui influent sur ces résultats ont été étudiés et analysés dans différentes études, même s'il nous semble difficile, voire même impossible, d'isoler l'influence de chaque paramètre. En effet, ces études prenaient en compte plusieurs paramètres à la fois. Même dans le cas où un paramètre est isolé, l'étude est faite de manière partielle. Or si on veut mieux comprendre et améliorer les performances du béton de chanvre, une étude approfondie de chaque paramètre est nécessaire.

Compte tenu des objectifs de la thèse, nous proposons d'étudier de manière approfondie l'influence de la nature du chanvre en termes de comportement mécanique et thermique. Les recherches antérieures [32,33,58] ayant montré que ces performances constituent des points faibles et forts simultanément pour le béton de chanvre ; il nous paraît très utile de mieux les maîtriser.

Notre étude s'intéresse à l'ensemble des chanvres disponibles sur le marché et en particulier en Auvergne, en balayant les différentes qualités de chanvre.

1.8.2 Démarche ou stratégie de l'étude

Dans l'analyse faite sur la variabilité des matériaux, nous avons fait la distinction entre les propriétés des composants du matériau et celles du matériau lui-même. Il s'agit des éléments d'entrée et de sortie, respectivement. Il existe par ailleurs d'autres sources de variabilité comme par exemple, les conditions de stockage des composants et de fabrication du matériau, les méthodes utilisées pour mesurer ou caractériser les propriétés (des composants et du matériau), etc. Pour désigner ces différentes sources de variabilités, nous adoptons les définitions suivantes :

1. **L'entrée** : qui représente l'ensemble des composants ou matières premières nécessaires pour la confection ou la fabrication du béton de chanvre, à titre d'exemple nous pouvons citer la chènevotte, l'eau, le liant, etc.
2. **Le modèle** : qui désigne l'ensemble des hypothèses, des paramètres et choix effectués pour traiter les entrées dans le processus d'obtention du produit final désigné par la sortie. A titre d'exemple, nous pouvons citer la formulation, le mode de fabrication par projection ou par banchage, etc.
3. **La sortie** : qui désigne tout simplement l'ensemble des propriétés du matériau béton de chanvre après toutes les étapes nécessaires à sa fabrication. Il s'agit des caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques à l'état fini. Nous pouvons citer par exemple la résistance à la compression, le module d'Young, etc.

Il convient de souligner que les méthodes et techniques utilisées pour la caractérisation des composants et du matériau sont considérées comme le **modèle**. Alors que les résultats de ces caractéristiques sous forme de valeurs quantifiables qui permettent leur appréciation, sont considérés comme **entrée** et **sortie**, respectivement.

L'analyse de la littérature nous a permis d'identifier les paramètres à considérer dans le cadre de cette thèse. Par conséquent notre travail de thèse est subdivisé en 5 chapitres comme illustré sur la figure 1-39.

Etude bibliographique

Le premier chapitre déjà présenté est une analyse bibliographique faite autour des propriétés et de leurs méthodes de mesure, tant pour les éléments d'entrée, les éléments du modèle que pour les éléments de la sortie. Dans ce même chapitre, la problématique de la variabilité pour les matériaux de génie civil est présentée.

Dans le deuxième chapitre, une étude de la variabilité multi-paramètres sur les données d'entrée est présentée. Il s'agit de l'analyse des propriétés des chènevottes. Après une campagne expérimentale de caractérisation de 13 types de chanvre, une analyse des résultats à deux niveaux est réalisée. Les propriétés étudiées sont la masse volumique, la capacité d'absorption d'eau et la granulométrie. Dans un premier temps on présente les résultats de l'étude mono-caractéristique ; il s'agit de la comparaison d'une caractéristique donnée pour l'ensemble des chènevottes. Dans un second temps, on présente les résultats de l'étude multicritère. Il s'agit d'analyser l'ensemble des chènevottes en prenant en comptes différentes caractéristiques à la fois. A l'issue de ces analyses, nous arrivons alors à classer les chènevottes en trois groupes.

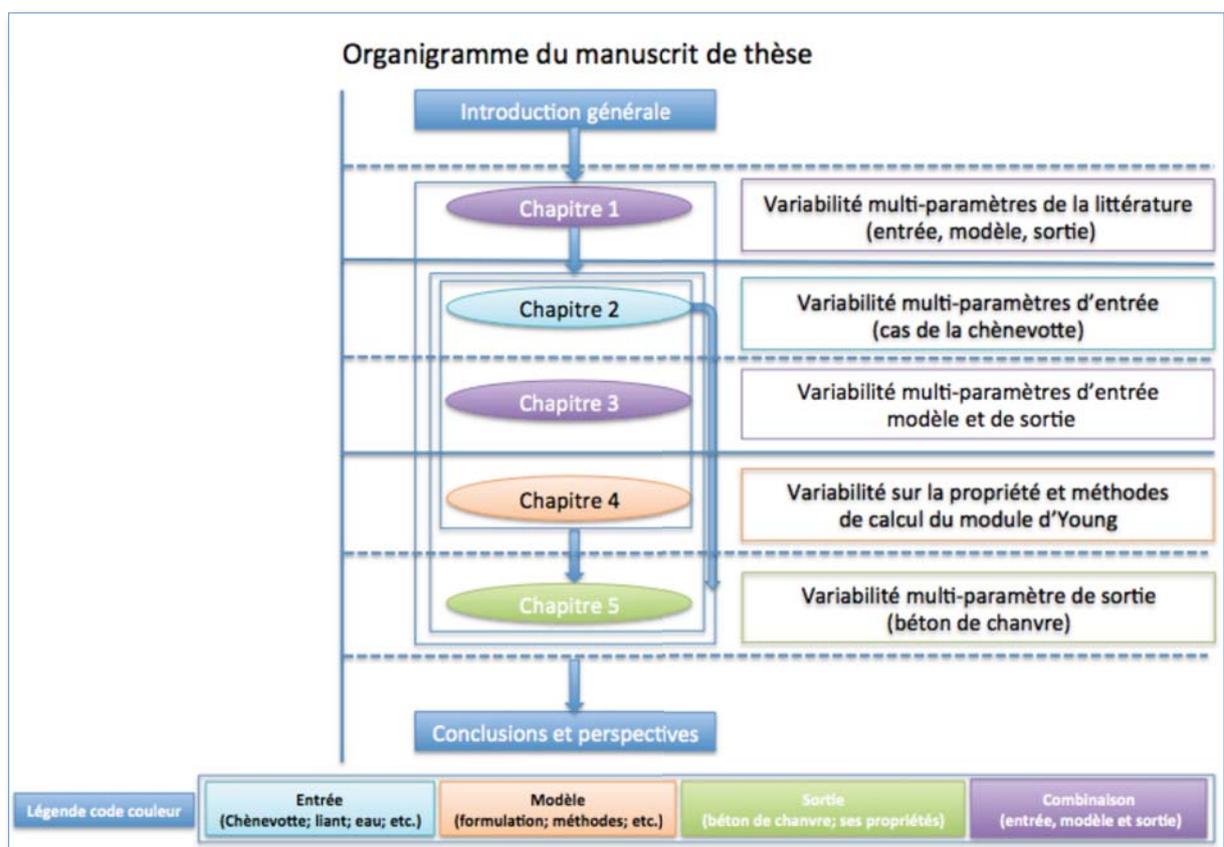


Figure 1-39: Les étapes clés du manuscrit de thèse.

Le chapitre 3 constitue une étude préliminaire prenant en compte l'ensemble des paramètres sources de variabilités, en entrée, modèle et sortie. Nous nous intéressons à la variabilité des propriétés du béton de chanvre en tenant compte des paramètres comme le laboratoire d'essai, la gâchée, la taille d'éprouvette et le type de chanvre. Les résultats obtenus montrent la nécessité d'investiguer davantage l'impact du type de la chènevotte. Par ailleurs, la dispersion considérable obtenue pour les résultats du module d'Young est vraisemblablement associée à sa méthode de calcul. Il devient alors important d'approfondir l'étude de son impact sur les valeurs du module d'Young obtenues.

Le chapitre 4 vise à répondre au problème constaté sur les méthodes de calcul du module d'Young. Dans ce chapitre, différentes méthodes de la littérature sont utilisées pour exploiter

les courbes contrainte-déformation dont les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions. Les variabilités observées sur les résultats vis-à-vis de chacune des méthodes permettent alors de mettre en évidence leur impact.

Dans le dernier chapitre, en se basant sur les résultats d'entrée du chapitre 2, nous avons mené une campagne expérimentale dans laquelle nous avons confectionné les éprouvettes de béton de chanvre. Sur la base des résultats du chapitre 4 (modèle), cas notamment du module, nous avons caractérisé et analysé la variabilité des résultats de sortie.

Grâce à cette démarche illustrée en figure 1-39, nous pouvons alors arriver à mettre en évidence l'impact de la variabilité des granulats de chanvre (chapitre 2) sur celle du matériau béton de chanvre (chapitre 5). Cette mise en évidence tient compte des aléas sur modèle comme les méthodes de calcul, le type et nombre d'éprouvettes, etc. vus dans les chapitres 3 et 4. A l'issue de cette démonstration, quelques conclusions sous forme de recommandations sont faites suivies des perspectives envisageables pour les travaux futurs.

Chapitre 2: De la caractérisation expérimentale à la sélection de la chènevotte

Introduction

L'analyse bibliographique faite précédemment nous a permis d'identifier les causes principales à l'origine de la variabilité des propriétés du béton de chanvre. Parmi ces causes, la chènevotte joue un rôle significatif. En dépit de cette constatation, nous avons mis en évidence l'insuffisance des éléments de la littérature sur ce sujet et par conséquent l'intérêt d'une étude approfondie de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre. Avant d'analyser ces propriétés et leurs variabilités, il est primordial de bien identifier la dispersion des propriétés des constituants. Dans cette étude, nous nous limitons à la chènevotte, étant donné que les autres constituants ne rentrent pas dans l'objectif de cette thèse. Le choix des chanvres utilisés s'est essentiellement basé sur la chènevotte disponible sur le marché, tant en France qu'en Europe, et en particulier les chènevottes produites en Auvergne. Ces chènevottes ne sont pas forcément commercialisées aujourd'hui pour être utilisées en construction. De ce fait, notre thèse permet d'apporter les preuves scientifiques sur la compatibilité de ces chènevottes dans l'élaboration du béton de chanvre.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à une étude comparative de treize types de chanvre, au moyen de l'exploitation des différents résultats expérimentaux. Les principales caractéristiques prises en compte sont : la masse volumique en vrac, la mesure d'absorption d'eau et l'analyse granulométrique. Une étude approfondie à deux niveaux a fait l'objet de nos analyses ; il s'agit essentiellement de la comparaison intra-caractéristique et inter-caractéristique. Les analyses faites à l'échelle intra-caractéristique révèlent des différences entre les types de chanvre, mais à ce niveau, les résultats ne sont pas assez concluants pour classer ou sélectionner les chanvres. Une étude comparative inter-caractéristique apporte de nouvelles informations. Elle permet de classer les chanvres en groupes d'appartenance suivant principalement, leurs tailles morphologiques et leurs capacités d'absorption d'eau, ainsi que leurs masses volumiques.

L'objectif principal de ce chapitre est de prédire l'impact de la chènevotte sur les performances mécaniques du béton de chanvre. D'une part, les données de la bibliographie permettent d'identifier les caractéristiques bénéfiques et néfastes vis-à-vis de ces performances. D'autre part, les résultats expérimentaux permettent la caractérisation des chènevottes au moyen d'une analyse approfondie. Sur ces bases, l'étude détaillée en 2.3.3 nous permet de prédire l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

2.1 Types de chanvre étudiés

Compte tenu de l'objectif de la thèse « étude de la variabilité du béton de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne », nous avons à la base six types de chanvre produits en Auvergne. Ces chanvres ont été mis à notre disposition par les chanvrières d'Auvergne et proviennent dans les communes de Brioude, Combrailles, etc., figure 2-1 b.



a
b
Figure 2-1 : Carte de la France, a et celle d'Auvergne, b

Les six chanvres d'Auvergne ne sont pas forcément labélisés pour être utilisés dans la construction. Afin d'enrichir notre base de données, nous avons envisagé l'utilisation d'autres types de chanvres, produits bien au delà de la région d'Auvergne, en France mais aussi en Europe. Pour le choix de chanvres produits hors Auvergne, nous avons privilégié ceux qui répondent à la réglementation en vigueur et disponibles dans le commerce. Il s'agit des chanvres TREMARGAT, LCDA, KANABAT et ISOcanna (CESA). Par ailleurs, nous avons aussi envisagé l'utilisation de chanvres produits en dehors de la France. Il s'agit des chanvres produits en Suède et en Angleterre. Ce choix permet en outre, de confronter les chanvres d'Auvergne avec ceux déjà utilisés en construction. Les informations indiquées dans le tableau 2-1 permettent d'identifier les différents types de chanvres de l'étude.

Comme nous allons le voir tout au long du présent chapitre, ces chanvres sont différents de part leurs caractéristiques comme la taille morphologique, la capacité d'absorption d'eau, etc. Pour des raisons de simplification, dans la suite de ce manuscrit de thèse, la notation des différents types de chanvre étudiés est symbolisée par C1 à C13, dont la signification est donnée dans le tableau 2-1.

N°	Types de chanvre	Nomenclature
1.	Chanvre Auvergne Fibré	C1
2.	Chanvre brut (TREMARGAT)	C2
3.	Chanvre Anglais	C3
4.	Chanvre Auvergne Brut (Standard)	C4
5.	Chanvre LCDA	C5
6.	Chanvre ISOcanna (CESA)	C6
7.	Chanvre Suedois	C7
8.	Chanvre KANABAT, Vicat (Shiv 1)	C8
9.	Chanvre KANABAT, ENTPE (Shiv 2)	C9
10.	Chanvre Standard Combraille	C10
11.	Chanvre Standard Lézoux	C11
12.	Chanvre Standard Brioude	C12
13.	Chanvre CVF	C13

Tableau 2-1: Nomenclature des différents types de chanvre

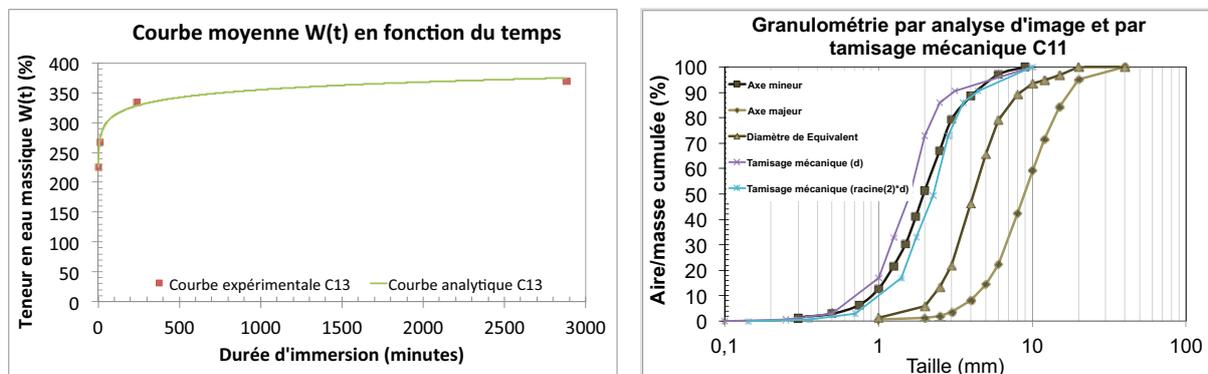
Il convient de souligner que les chanvres C8 et C9, produits en France et disponibles sur le marché, ont été fournis par les deux laboratoires partenaires à l'occasion d'une étude sur le RRT¹²3 détaillée au chapitre 3.

2.2 Etude expérimentale intra-caractéristique

Dans cette partie, nous nous limitons à l'analyse des résultats obtenus pour chacune des caractéristiques. Les propriétés prises en compte sont :

- la masse volumique,
- la capacité d'absorption d'eau,
- la granulométrie.

Pour rappel, ces propriétés ont été discutées en 1.2, et leurs méthodes de mesure ont été détaillées. Lors de l'analyse de la capacité d'absorption d'eau, on s'intéresse à la quantité d'eau absorbée au bout d'une minute d'immersion, il s'agit de la teneur en eau initiale, ainsi que celle absorbée au bout de 48 heures, il s'agit de la teneur en eau finale. Les mesures intermédiaires prises à 15 et 240 min permettent alors d'obtenir la courbe d'absorption d'eau, (figure 2-2 a).



a. courbe d'absorption d'eau C13

b. courbe granulométrique C11

Figure 2-2: Exemple des courbes d'absorption d'eau et granulométrie

Grâce aux résultats obtenus par l'analyse d'image, la granulométrie (figure 2-2 b) est étudiée en prenant en compte simultanément, la surface moyenne d'une particule, sa masse, sa longueur, sa largeur, son élongation et le diamètre équivalent.

2.2.1 Masse volumique en vrac

Les résultats de la masse volumique en vrac des différentes chènevottes présentent une forte dispersion. Nous observons une variation de l'ordre de 220% entre la valeur minimale et la valeur maximale, avec une moyenne de 120 kg/m^3 .

¹² RRT : Round Robin Test

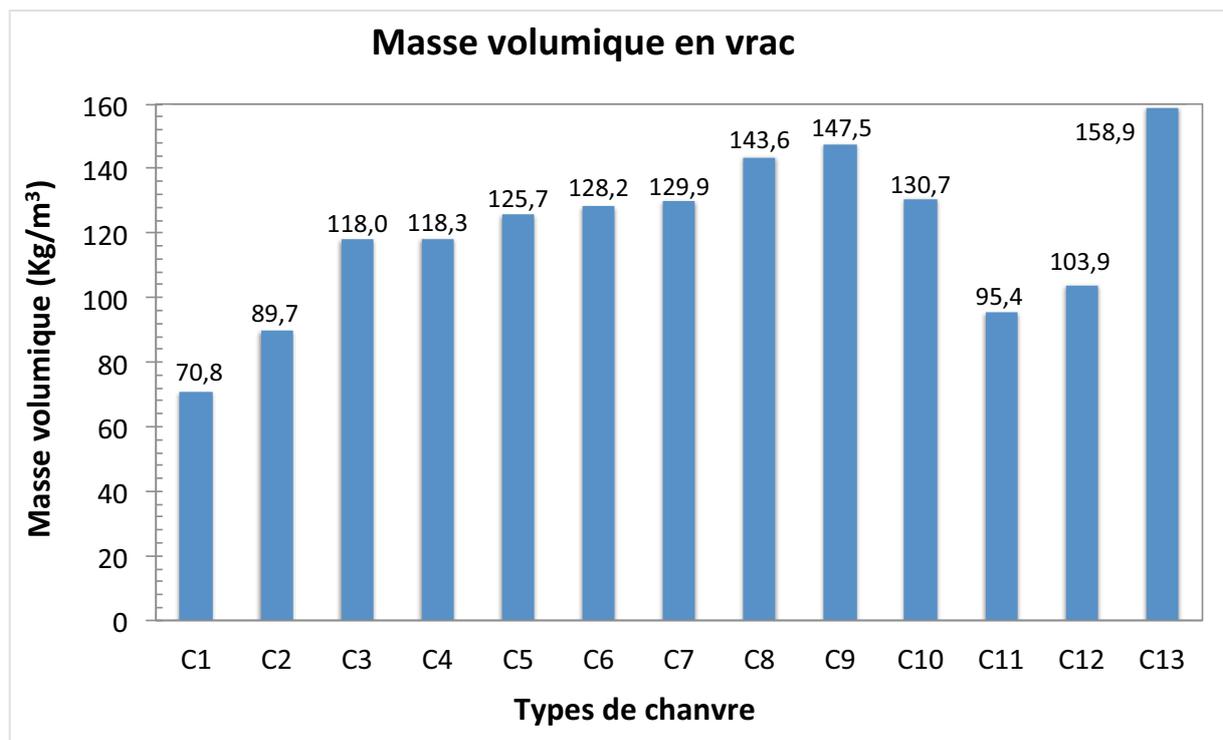


Figure 2-3: Masse volumique de treize différents types de chanvre

La chènevotte fibrée présente une faible masse volumique apparente, ceci est lié au fait que les fibres en vrac se réarrangent plus ou moins difficilement ce qui augmente les vides inter-particules (fibres) conduisant à un grand volume, et par conséquent une faible masse volumique.

Minimum	70,83 kg/m ³
Maximum	158,85 kg/m ³
Moyenne	120,04 kg/m ³
Ecart-type	24,72 kg/m ³

Tableau 2-2: Statistique descriptive sur les résultats des masses volumiques en vrac

Dans le cas des chanvres non fibrés, plus la taille d'une particule augmente, plus le réarrangement des particules devient difficile. Il y a alors de plus en plus de vides entre les particules qui résultent en un volume élevé et une faible masse volumique. A titre d'exemple, le chanvre C2 de grande taille, avec 1,04 mm et 3,4 mm de largeur et longueur, respectivement, a une masse volumique faible par rapport au chanvre C13. Ce dernier a une petite taille avec 0,52 mm et 1,11 mm de largeur et de longueur, respectivement (tableau 2-4). Nos analyses devraient prendre en compte la porosité interne d'une particule, mais l'influence de cette propriété a été négligée. Les analyses présentées plus loin dans la section 2.2.3 sur la teneur en eau et la masse volumique d'une particule justifieront notre choix.

2.2.2 Capacité d'absorption d'eau

Compte tenu de sa structure capillaire et de son caractère hydrophile, le granulat de chanvre possède une grande capacité d'absorption d'eau liquide [44]. Cette capacité est considérable par rapport aux autres granulats minéraux utilisés en construction.

Les résultats de mesure d'absorption d'eau pour l'ensemble des 13 types de chanvre, montrent de très grandes variabilités. La quantité d'eau absorbée durant la première minute d'immersion, varie de 112,2% à 242,6%.

Nomenclature	IRA ($\pm \sigma$)		K1 ($\pm \sigma$)		R ²	Wmax at 48 h ($\pm \sigma$)	
	IRA	$\pm \sigma$	K1	$\pm \sigma$		Wmax at 48 h	$\pm \sigma$
C1	159,83	11,35	38,51	0,75	0,99	295,93	13,62
C2	194,15	10,88	53,50	4,06	0,83	379,22	24,50
C3	242,59	11,73	54,90	2,65	0,97	431,32	3,12
C4	233,79	10,47	36,00	2,33	0,89	358,33	5,03
C5	153,99	19,20	57,03	5,58	0,98	351,87	8,94
C6	181,39	11,99	51,21	1,00	0,87	370,19	18,78
C7	163,59	4,30	45,77	6,56	0,97	324,25	24,93
C8	152,73	4,37	50,67	1,92	0,97	333,31	2,37
C9	211,77	1,91	49,06	1,37	0,98	389,03	3,78
C10	112,23	7,75	56,39	3,41	0,99	308,81	7,55
C11	165,85	10,80	51,66	8,51	0,98	339,96	33,03
C12	162,89	28,17	50,82	5,57	0,99	342,32	12,24
C13	226,16	14,67	43,04	0,56	0,97	369,85	13,84
Minimum	112,23	1,91	36,00	0,56	0,83	295,93	2,37
Maximum	242,59	28,17	57,03	8,51	0,99	431,32	33,03
Moyenne	181,61	11,35	49,12	3,40	0,95	353,42	13,21
Ecartype	37,97	6,82	6,56	2,50	0,05	35,86	9,64

Tableau 2-3: Résultats de mesure d'absorption d'eau pour 13 types de chanvre

Au bout d'une minute, la quantité d'eau absorbée est environ égale à 182% de la masse initiale du chanvre. Ces résultats d'absorption d'eau initiale et finale associés aux résultats du taux d'absorption d'eau d'une particule, en moyenne égal à 49,1% montrent des différences entre les divers chanvres étudiés. Ces différences sont vraisemblablement associées à la porosité d'une particule et à la porosité inter-particules ainsi qu'à leurs tailles. Pour cette propriété, à porosité égale, plus la taille augmente, plus la quantité des pores augmente.

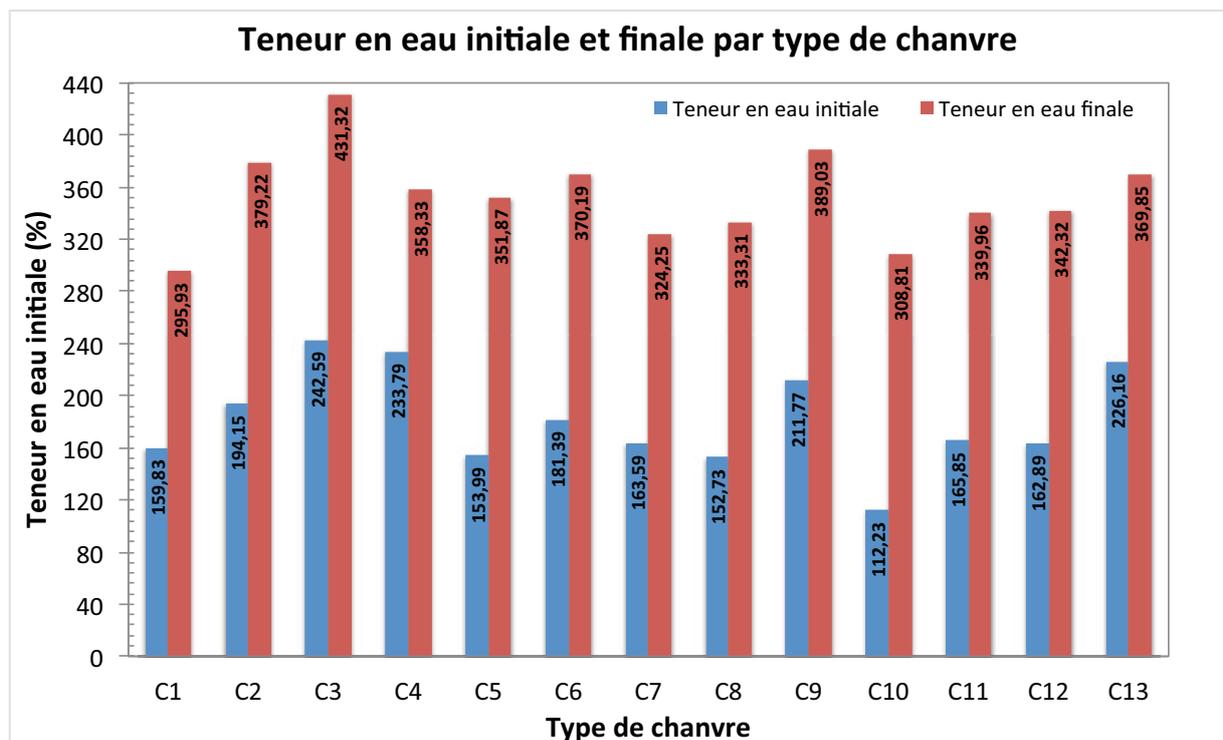


Figure 2-4: Teneur en eau initiale/finale pour 13 types d'absorption d'eau.

Le chanvre anglais présente une forte capacité d'absorption d'eau par rapport aux autres. En effet, sa masse se multiplie par plus de deux au bout d'une minute d'immersion et par quatre au bout de 48 heures.

Les résultats de la teneur en eau initiale et finale de la figure 2-4 ne révèlent pas de relation linéaire entre les deux valeurs de la teneur en eau. En effet, la cinétique d'absorption d'eau n'est pas la même pour tous les chanvres, même à l'échelle d'une particule. Dans ce dernier cas, nous avons observé une dispersion dans le taux d'absorption d'eau, K_I , de 36% à 57,3% pour les chanvres C4 et C5, respectivement. Néanmoins une étude de corrélation entre les deux valeurs de teneur en eau montre une certaine relation avec un coefficient de corrélation de 0,629 (tableau 2-5).

La masse de saturation au bout de l'essai est d'environ 3 à 4 fois la masse initiale des échantillons testés. Ce résultat est cohérent avec la littérature, compte tenu des études antérieures qui ont montré que les particules de chanvre immergées dans l'eau peuvent atteindre sous 48 heures, une masse de saturation d'environ 5 fois sa masse sèche initiale [19,35,45].

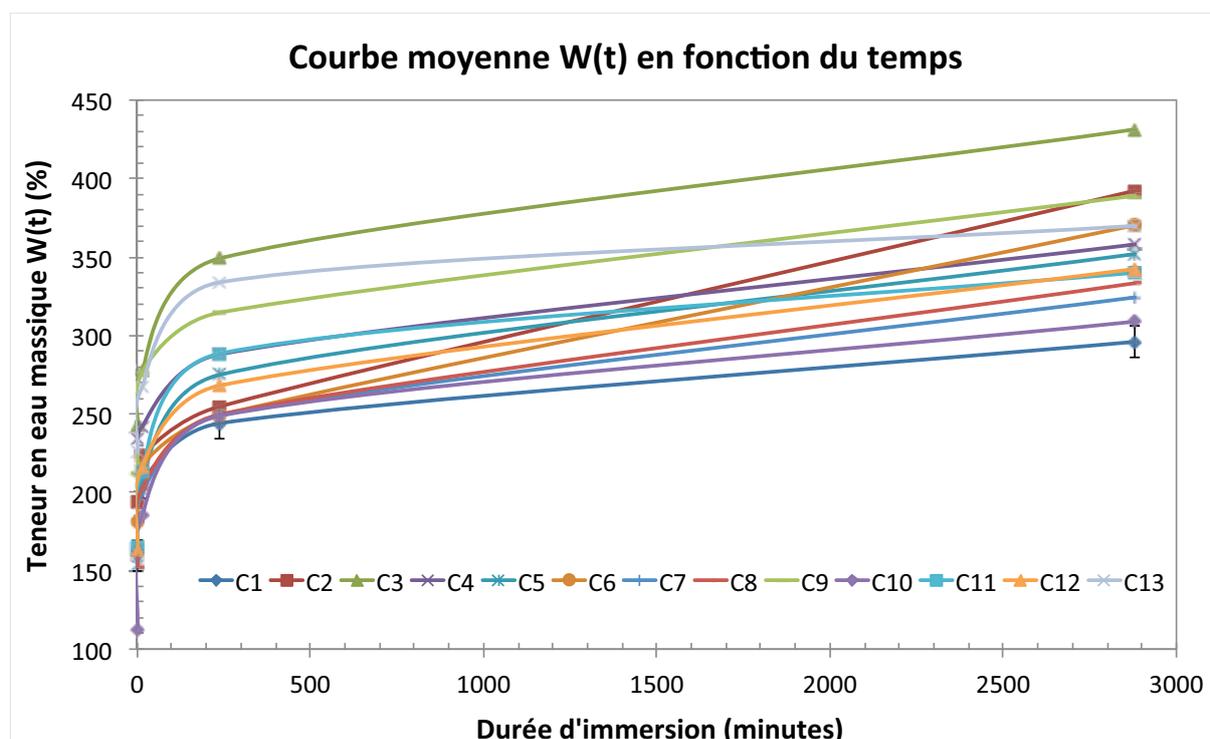


Figure 2-5: Courbes caractéristiques d'absorption d'eau pour 13 types de chanvres

Comme nous l'avons constaté lors du premier chapitre, lorsqu'un béton de chanvre est fabriqué avec un liant hydraulique, il existe une compétition entre le liant et la chènevotte sur la consommation de l'eau de gâchage. On observe alors un phénomène de « fausse prise » [47], car la forte absorption d'eau de la chènevotte perturbe l'hydratation du liant. Ce phénomène est moins grave, pour les liants aériens [48] ou la chaux aérienne [49]. En conséquence, la mesure d'absorption d'eau est un critère à prendre en compte quand on veut étudier l'impact du chanvre sur les performances du béton.

Jusqu'ici les analyses faites sur cette mesure ont montré une certaine variabilité sur la nature des chanvres étudiés. Toutefois, les informations recueillies en analysant les résultats de masse volumique et d'absorption d'eau nous semblent insuffisantes pour pouvoir concrètement évaluer l'effet de la chènevotte. Il est donc nécessaire de tenir compte des autres critères, tels que la granulométrie (taille des particules, surface spécifique, etc.).

2.2.3 Granulométrie

Bien que la particule de chanvre soit géométriquement un objet réellement à trois dimensions, les essais par analyse d'image quand-à-eux, sont faits en deux dimensions. De ce fait, il est évident que la méthode ne prenne pas en compte la troisième dimension de la particule. En effet, la variation de son épaisseur est négligée par rapport aux autres dimensions. Afin d'être plus ou moins réaliste dans l'analyse des résultats, nous considérons par hypothèse que les particules ont la même épaisseur. Ceci a été aussi le cas dans une étude sur les paramètres influant sur les performances mécaniques du béton de chanvre [32], l'épaisseur des particules étant considérée uniforme et égale à 0,5 mm pour toutes les particules.

A épaisseur égale, l'élongation, le diamètre équivalent et la surface spécifique sont des éléments qui peuvent nous renseigner sur le volume d'une particule. L'élongation est ici

définie comme le rapport entre la longueur et la largeur tandis que le diamètre équivalent correspond au diamètre d'un cercle qui aurait la même surface que la particule.

Etant donné que la masse volumique est définie par le rapport entre la masse et le volume, nous pouvons alors formuler cette hypothèse : à volume égal (même ordre de grandeur) on doit par hypothèse avoir une masse égale (i.e. du même ordre de grandeur), à condition que la structure interne de la particule ou sa porosité soit la même. Autrement dit, les particules auront la même masse volumique.

La masse d'une particule dont les résultats sont donnés dans le tableau 2-4 a été calculée sur la base des résultats de la granulométrie par analyse d'image. Connaissant la masse de l'échantillon testé, trois grammes dans le cas de notre étude, et connaissant le nombre de particules de l'échantillon, nous avons calculé la masse d'une particule au moyen de la formule suivante :

$$M_p = \frac{M_{ec}}{N_p} \quad \text{éq. 2-1}$$

avec : M_p : la masse d'une particule de chanvre exprimée en mg ; M_{ec} : la masse de l'échantillon testé, elle est prise égale à 3g dans notre étude ; N_p : le nombre de particules contenues dans l'échantillon testé.

Nomenclature	Surface spécifique (mm ² /3g)	Surface moyenne particules (mm ²)	Nombre des particules	Masse particules (mg)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Elongation	Diamètre de Féret (mm)	Teneur en poussière (g)
C1	15117	0,91	16585	0,18	0,64	0,19	2,62	0,32	1,08
C2	17353	4,89	3551	0,84	3,40	1,04	3,47	1,79	3,54
C3	16822	1,57	10728	0,28	1,11	0,32	2,63	0,58	2,20
C4	16533	1,94	8577	0,35	1,45	0,44	2,60	0,76	1,49
C5	13699	8,10	1691	1,77	5,88	1,40	4,97	2,78	3,53
C6	14021	5,31	2643	1,14	4,20	1,27	3,95	2,23	3,37
C7	12316	3,25	3788	0,79	1,93	0,42	3,19	0,84	0,78
C8	13187	6,96	1983	1,51	5,59	1,23	5,52	2,53	3,47
C9	13913	6,95	2002	1,50	5,11	1,38	4,47	2,58	3,54
C10	16403	0,82	20079	0,15	0,77	0,25	2,28	0,41	3,55
C11	22038	1,72	12804	0,23	1,46	0,34	3,32	0,66	3,84
C12	19303	1,18	16397	0,18	1,02	0,28	2,77	0,50	5,18
C13	18822	1,36	13862	0,22	1,11	0,52	2,27	0,80	0,27
Minimum	12316	0,82	1691	0,15	0,64	0,19	2,27	0,32	0,27
Maximum	22038	8,10	20079	1,77	5,88	1,40	5,52	2,78	5,18
Moyenne	16117	3,46	8822	0,70	2,59	0,70	3,39	1,29	2,76
Ecartype	2798	2,64	6613	0,60	1,96	0,48	1,05	0,94	1,45

Tableau 2-4: Résultats d'analyses granulométriques pour les 13 types de chanvres

Les résultats de l'élongation et du diamètre équivalent présentés dans le tableau 2-4 Tableau 2-4 varient de 2,27 mm à 5,52 mm et de 0,32 mm à 2,78 mm, respectivement. Sous l'hypothèse d'une épaisseur constante pour chaque type de chanvre, il est évident que le volume des particules varie. Par ailleurs, la masse d'une particule varie de 0,15 mg à 1,77 mg. Si la variation de la masse d'une particule entraîne sa variation en volume, nous pouvons alors s'attendre à ce que les particules aient la même masse volumique et par conséquent la

même porosité. Cette condition est dans certains cas vérifiée, comme par exemple pour C8 et C9 avec des masses de 1,51 mg et 1,50 mg et un diamètre équivalent de 2,53 mm et 2,58 mm, respectivement. Néanmoins, dans d'autres cas, cette condition n'est pas vérifiée, comme par exemple C6 et C10 qui ont des masses de 1,14 mg et 1,15 mg et un diamètre équivalent de 2,23 mm et 0,41 mm, respectivement. Ces résultats montrent des variabilités sur la porosité des chanvres. Néanmoins, l'étude de corrélation (figure 2-6) entre la masse des particules et leur surface moyenne nous amène à une conclusion différente. Il existe une forte corrélation entre les deux paramètres de 0,985 (tableau 2-5) : les chanvres ont la même masse volumique d'une particule. Pourvu que les hypothèses retenues jusqu'ici soient toujours valables, notamment celle de l'égalité d'épaisseur des particules, nous pouvons conclure que la variabilité de l'absorption d'eau observée dans les résultats, ne dépend pas de la structure interne (porosité d'une particule), mais essentiellement de la taille des particules, et de leur arrangement c'est-à-dire de leur porosité inter-particulaire.

Dans l'étude menée par Arnaud et Gourlay [32], trois types de chanvre ayant différentes largeurs, longueurs et masses volumiques en vrac ont été analysés figure 1-34. Afin d'éviter l'influence du liant, un seul liant a été utilisé, il s'agit d'un mélange de 75% de chaux aérienne, 15% de chaux hydraulique et 10% de pouzzolane. Les particules du chanvre N°1 sont légèrement plus grandes que celles du chanvre N°2, et par conséquent, leur masse volumique en vrac est petite. Cette différence conduit à une résistance mécanique plus faible pour le chanvre N°1 (figure 1-34). Les éprouvettes fabriquées avec la chènevotte plus fine ont une résistance faible à 28 jours mais une résistance bien meilleure à 4 mois, qui augmente significativement au-delà de ce délai. D'après les auteurs, la chènevotte N°3 est moins poreuse car ses particules sont plus fines que les autres. Par conséquent le CO₂ responsable de la prise et le durcissement est moins diffusés ce qui ralentit la cinétique de séchage des éprouvettes et conduit à de faibles résistances mécaniques à court terme.

En revanche, les particules étant fines, elles sont bien enrobées par le liant au moment de la fabrication et c'est ce qui explique les meilleurs comportements mécaniques observés à long terme. En conclusion, l'utilisation de la chènevotte ayant des particules fines peut contribuer à améliorer les performances mécaniques du béton de chanvre à long terme. Cette conclusion n'est pas tout à fait en accord avec les travaux de Nguyen [19] qui a constaté de meilleures performances mécaniques à 28 jours pour les particules plus grandes mais aucune différence significative à 90 jours.

D'après la bibliographie, la taille des particules a une influence sur les propriétés mécaniques, mais avec quelques contradictions. En conséquence, il est nécessaire de conduire une étude complémentaire pour mieux comprendre l'impact de la taille des particules. Mais avant de mener cette étude, une fois de plus, on ne sait pas toujours comment sélectionner un chanvre et prédire ses effets sur les performances du béton de chanvre qui en est fabriqué. Faut-il se baser sur sa capacité d'absorption d'eau, sa géométrie (longueur, largeur, etc.) ou sa masse volumique en vrac ? Une étude de corrélation entre ces différentes caractéristiques, peut nous aider à apporter la réponse à cette question. Par la suite, il est nécessaire de la compléter par une analyse qui prend en compte plusieurs critères à la fois afin de classer et de sélectionner les chanvres.

2.3 Comparaison multicritère

Les analyses faites jusqu'ici montrent dans quelle mesure la masse volumique, la capacité d'absorption d'eau ainsi que la taille des particules peuvent avoir de grande dispersion. Or, ces analyses ont été faites pour les critères pris indépendamment. Cependant, la prise en

compte des différents paramètres peut permettre de mieux classer les chanvres les uns par rapport aux autres. En conséquence, notre objectif dans ce qui suit, est d'analyser les résultats de caractérisation du chanvre en comparant les propriétés entre elles. Dans un premier temps, nous faisons une étude de corrélation des paramètres deux-à-deux ; par la suite par une comparaison multicritère prenant en compte plusieurs paramètres à la fois. L'intérêt final de cette démarche est de pouvoir prédire quel type de chanvre donnerait tel ou tel type de performances mécaniques du béton de chanvre.

2.3.1 Corrélation entre les paramètres

Cette étude de corrélation considère les mêmes caractéristiques que dans l'étude intracaractéristique. Cependant, la granulométrie est plus détaillée dans le cas présent, tableau 2-5. L'étude de corrélation est un moyen permettant d'hierarchiser ou de classer l'ensemble des paramètres.

	MV	TEI	TEF	SS	SMP	MP	Lo	La	EI	DE
MV	1									
TEI	0,03	1								
TEF	0,06	0,629	1							
SS	0,11	0,025	0,02	1						
SMP	0,124	0,004	0,046	0,37	1					
MP	0,153	0,01	0,027	0,463	0,985	1				
Lo	0,14	0,008	0,042	0,33	0,986	0,967	1			
La	0,16	0,0009	0,104	0,271	0,928	0,886	0,941	1		
EI	0,07	0,04	0,004	0,278	0,879	0,876	0,912	0,751	1	
DE	0,16	0,0006	0,072	0,302	0,969	0,939	0,983	0,985	0,839	1

Tableau 2-5: Matrice de corrélation entre différentes caractéristiques

Les abréviations utilisées dans le tableau 2-5 désignent :

- **MV** : Masse Volumique en vrac (kg/m^3) ;
- **TEI** : Teneur en Eau Initiale (%) ;
- **TEF** : Teneur en Eau Finale (%) ;
- **SS** : Surface spécifique (mm^2) pour un échantillon de 3g ;
- **SMP** : Surface Moyenne d'une Particule (mm^2) ;
- **MP** : Masse d'une particule (mg);
- **Lo** : Longueur (mm);
- **La** : Largeur (mm);
- **EI** : Elongation ;
- **DE** : Diamètre Equivalent (mm).

D'après les résultats du tableau 2-5, les propriétés comme la masse volumique en vrac ou la teneur en eau initiale et finale présentent de faibles corrélations. On obtient au plus un coefficient égal à 0,16 entre la masse volumique en vrac et la longueur ou encore le diamètre équivalent, à l'exception de la teneur en eau finale et initiale dont le coefficient est égal à 0,629.

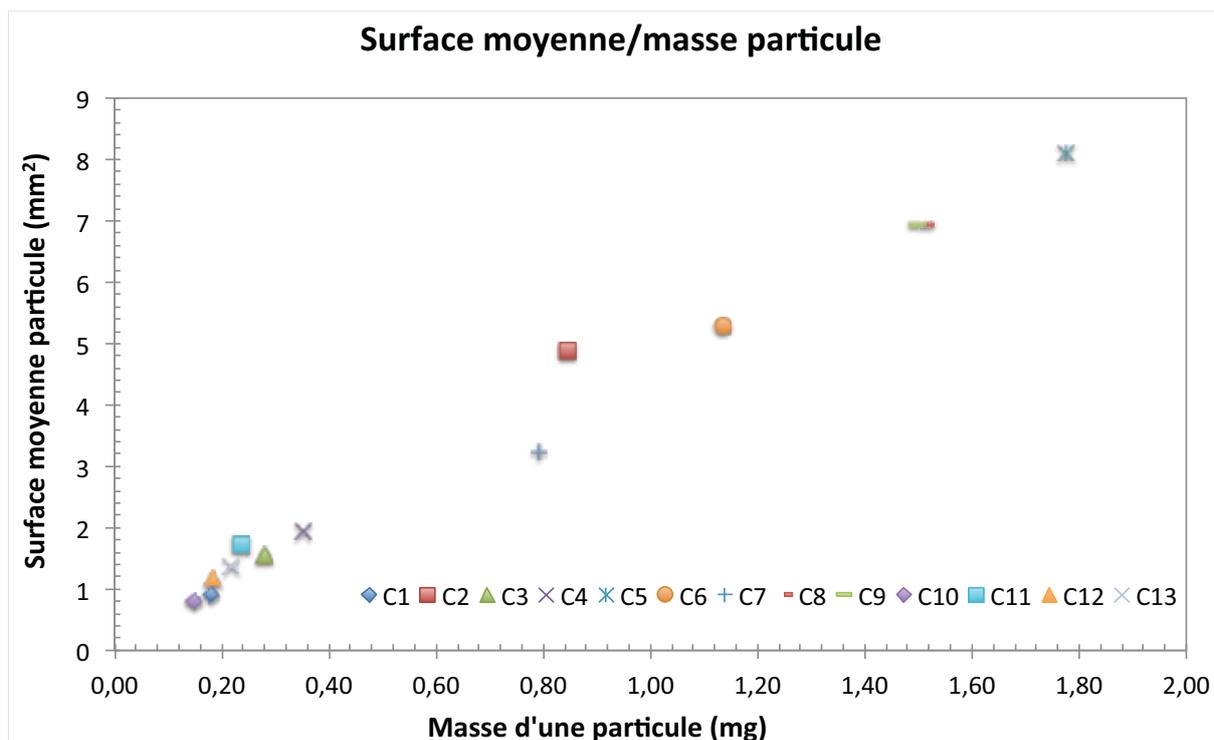


Figure 2-6: Corrélation entre la surface moyenne d'une particule et sa masse pour 13 types de chènevottes

La prise en compte de la surface spécifique (pour l'échantillon de 3g) ne révèle pas de bonne corrélation avec les caractéristiques géométriques d'une particule. En revanche les résultats granulométriques pour une particule montrent de bonnes corrélations entre les paramètres. Par exemple, on observe un coefficient égal à 0,985 entre la surface moyenne d'une particule et sa masse. Malgré ces fortes corrélations, ces résultats nous semblent insuffisants dans la mesure où c'est la granulométrie qui est seulement considérée pour les bonnes corrélations observées. Il est nécessaire de prendre en compte également d'autres caractéristiques (teneur en eau, etc.).

En conclusion, cette piste sur l'étude de corrélation n'a pas pu fournir des informations exploitables sur les relations entre les propriétés de la chènevotte. Pour remédier à cette difficulté, nous proposons de mener l'étude au moyen de la comparaison sur la même échelle de l'ensemble des critères pour les 13 différents types de chanvre. C'est l'objectif de la partie suivante.

2.3.2 Présentation des critères sur une échelle de comparaison

L'analyse des résultats de la bibliographie nous a permis d'identifier les caractéristiques du chanvre susceptibles d'influer sur les performances du béton de chanvre. Par ailleurs, l'étude comparative de chacune des caractéristiques nous a permis de mettre en évidence la dispersion des résultats pour l'ensemble des treize types de chanvre. Nous avons abouti à la nécessité de mener l'étude comparative en tenant compte de l'ensemble des caractéristiques pour permettre le classement des différents types de chanvre. Cette étude nous permettra ensuite de pouvoir sélectionner le type de chanvre en ayant des informations de leurs influences sur le béton de chanvre.

Pour l'ensemble des caractéristiques, une représentation à l'échelle de 1 à 10 a été choisie. Cette échelle sans unité est proposée dans le but de pouvoir représenter l'ensemble des caractéristiques sur un seul diagramme, permettant une vue d'ensemble des résultats.

2.3.2.1 Principe de l'échelle

Pour une caractéristique donnée, la valeur maximale observée parmi les 13 types de chanvres, correspond à la note 10. Les valeurs des autres chanvres sont alors ramenées à cette échelle par simple interpolation linéaire en utilisant la relation de l'équation 2-2:

$$N = \frac{C_i}{C_{\max}} \times 10 \quad \text{éq. 2-2}$$

avec N la note sur l'échelle de 10, C_i la caractéristique considérée (par exemple la masse volumique, etc.) et C_{\max} la caractéristique maximale. Sur cette échelle, il convient de retenir ce qui suit :

- l'échelle de 1 à 10 est choisie et considérée pour une caractéristique donnée et pour l'ensemble des treize types de chanvre ;
- aucune comparaison ne peut pas être faite entre les caractéristiques ; néanmoins la représentation sur le même graphe peut permettre d'observer la corrélation entre les différentes caractéristiques étudiées.

2.3.2.2 Limites de l'échelle

Il convient également de garder à l'esprit que cette représentation, même si elle a pour avantage d'observer l'ensemble des caractéristiques pour tous les chanvres, elle a aussi ses limites. Cette échelle donne le même poids à l'ensemble des caractéristiques étudiées. Elles sont considérées comme si elles auraient la même influence sur les performances du béton de chanvre, ce qui n'est pas le cas.

Non seulement l'échelle de représentation nous fait défaut sur le poids à attribuer à chacune des caractéristiques, mais aussi la bibliographie. A ce jour, et à notre connaissance, il n'existe aucun moyen permettant de prédire de manière quantitative, l'impact d'une caractéristique donnée sur les performances du béton de chanvre. En conclusion, même si l'échelle de comparaison choisie permettait d'attribuer un poids à chacune des caractéristiques, et c'est possible d'ailleurs, on n'aurait pas pu le faire par manque d'informations à ce sujet. Un des objectifs de notre étude visera à apporter des éléments de réponse à cette question.

2.3.3 De la classification à la sélection des chanvres

Les caractéristiques prises en compte sont essentiellement associées à la masse volumique en vrac, à l'absorption d'eau ainsi qu'à l'analyse granulométrique. La représentation graphique sur une même échelle de comparaison illustrée en figure 2-7, montre que les chanvres occupent la quasi-totalité du diagramme radar. Cette observation montre l'étendue de la couverture de l'espace offerte par les 13 types de chanvre considérés, permettant ainsi de crédibiliser les résultats de l'étude. Les courbes qui se situent vers le centre du diagramme correspondent tout naturellement à des chanvres ayant de faibles valeurs pour les caractéristiques considérées, et vice-versa. Pour plus de lisibilité, il nous paraît plus pertinent de représenter séparément les courbes, en distinguant celles occupant le centre, le milieu et l'extérieur.

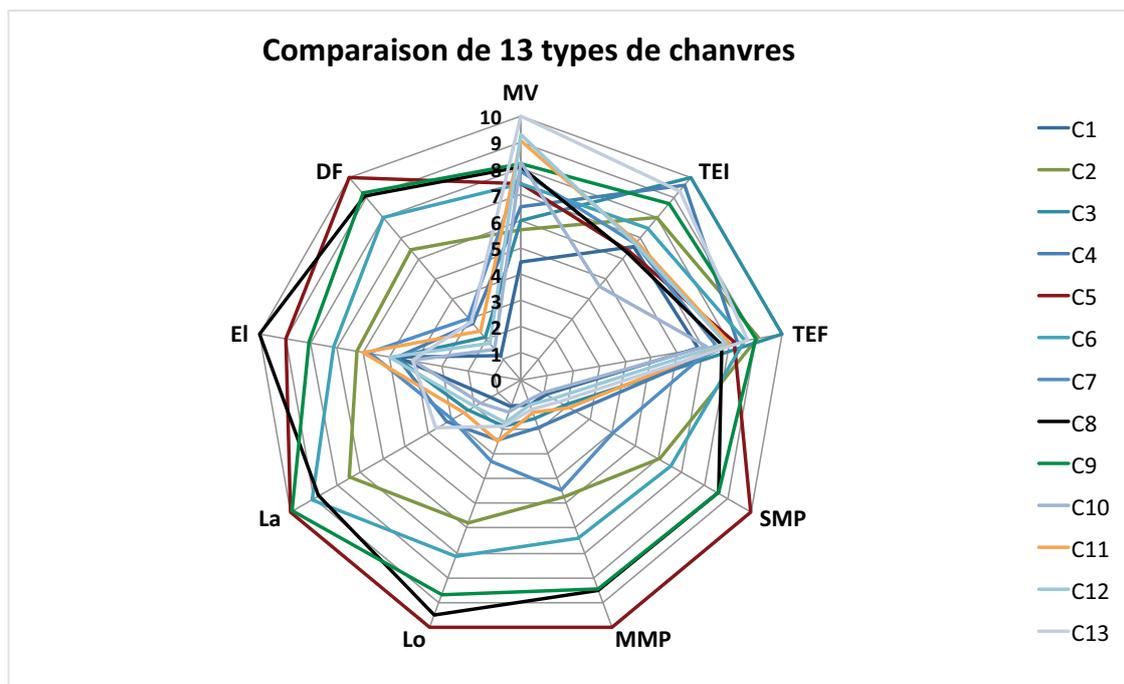


Figure 2-7 : Comparaison des différentes caractéristiques pour l'ensemble des chènevottes

En plus de cette représentation, des analyses plus poussées sont nécessaires afin d'expliquer en quoi ces types de chanvre occupant différentes zones de la courbe sont différents. Par ailleurs, sur la base de résultats de la littérature, il est important de prédire en quoi ou dans quelles mesures, ces chanvres peuvent influencer sur les bétons de chanvres qui en sont fabriqués. Une analyse et une représentation séparée nous a permis alors de classer les chanvres en trois groupes.

Groupes	Types de chanvre
1	C1 ; C10 ; C12 ; C13
2	C2 ; C3 ; C4 ; C7 ; C11
3	C5 ; C6 ; C8 ; C9

Tableau 2-6: Différentes catégories des chanvres

Les études antérieures [32,47,48] ont montré l'impact néfaste de la capacité d'absorption d'eau et de la taille des particules de chanvre sur les performances mécaniques du béton de chanvre. Dans cette étude, nous avons montré que la masse volumique en vrac augmente lorsque la taille des particules diminue. Puisque la faible masse volumique en vrac correspond à un volume élevé et par conséquent à une grande porosité inter-particulaire, nous pouvons nous attendre à ce que la quantité d'eau absorbée soit élevée. Or les résultats montrent que ce n'est pas forcément le cas. La méthode d'essorage en [51], utilisée pour la mesure d'absorption d'eau permet en effet d'éliminer une grande quantité d'eau inter-particulaire. Ainsi, il est clair que la masse volumique en vrac n'est pas forcément proportionnelle à la quantité d'eau absorbée. Par conséquent c'est une caractéristique dont on a l'avantage qu'elle soit grande dans la mesure où son augmentation correspond à la faible taille d'une particule. Dans les critères de sélection, elle est donc à maximiser. En revanche, la taille des particules et la capacité d'absorption d'eau, sont d'après les analyses précédentes, deux caractéristiques qui doivent être faibles, elles sont donc à minimiser. La question qui se pose est : dans quelles limites doit-on maximiser ou minimiser ces caractéristiques? Pour l'ensemble de ces caractéristiques, la plupart d'entre-elles sont dérivées ou obtenues de

manière indirecte à partir des mesures effectuées. La seule caractéristique sur laquelle nous pouvons jouer est la taille des particules. Pour cette caractéristique, il est donc nécessaire de déterminer les valeurs seuils.

2.3.3.1 Chanvres de catégorie 1

Dans cette catégorie, les caractéristiques identifiées comme néfastes, notamment la capacité d'absorption d'eau (teneur en eau finale et initiale) et la taille de particule (longueur, largeur; etc.) sont faibles (à l'exception du chanvre C13), tandis que celle identifiée comme bénéfique sont plus ou moins élevée. Ces chanvres ont donc une faible taille de particule et une forte masse volumique. Nous pouvons alors dire que ces chanvres de catégorie 1 donneront des performances élevées, par rapport aux autres catégories. Il convient de souligner le fait que le chanvre C1 fibré est un cas à part avec une valeur de masse volumique faible de $70,83 \text{ kg/m}^3$ dans cette catégorie. Il sera intéressant de l'utiliser dans la fabrication des éprouvettes. Pour le choix et la sélection des chanvres à utiliser, le lecteur peut se référer au paragraphe dédié en 2.3.4.

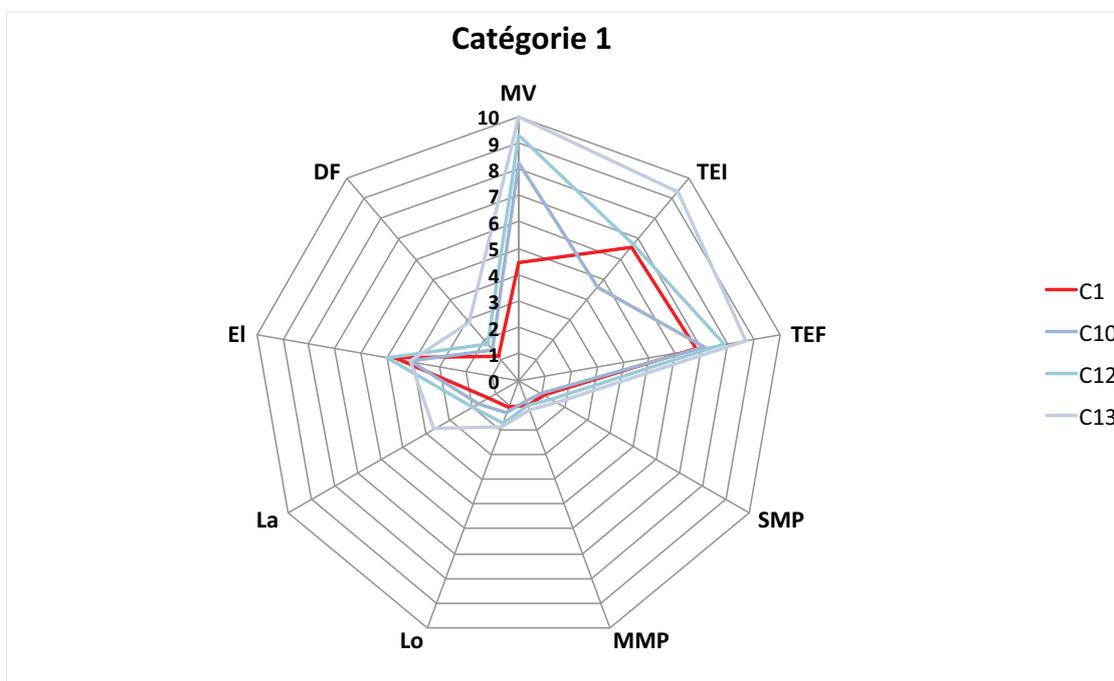


Figure 2-8 : Chènevottés classés dans la catégorie 1

2.3.3.2 Chanvres de catégorie 2

Dans cette catégorie, nous sommes en présence de chanvres dont les caractéristiques sont similaires à ceux de la catégorie 1, notamment en ce qui concerne la masse volumique. Toutefois, cette catégorie se distingue par la taille des particules et la teneur en eau. Les résultats varient de 164% à 243% et de 322% à 432% pour l'absorption d'eau initiale et finale, respectivement. La masse volumique en vrac varie de $89,74 \text{ kg/m}^3$ à $129,91 \text{ kg/m}^3$. Dans cette catégorie, la taille des particules augmente, avec des valeurs variant de 2,60 à 3,47 et de 0,58 mm à 1,79 mm d'élongation et du diamètre équivalent, respectivement. Or nous avons vu précédemment que cette caractéristique est à minimiser pour une bonne performance mécanique.

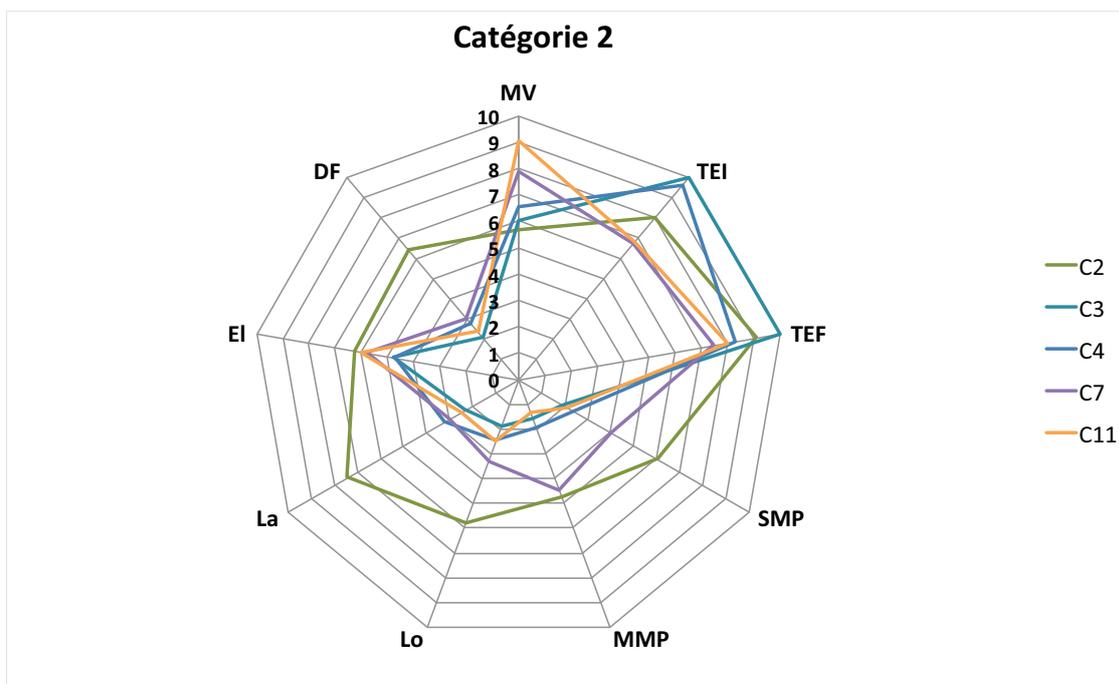


Figure 2-9 : Chènevottés classés dans la catégorie 2

L'augmentation de la taille des particules a d'après nos analyses, un effet néfaste sur les performances du béton de chanvre. De ce fait, les chanvres de cette catégorie donneront probablement, les bétons de chanvre de moins bonnes performances que les chanvres de la catégorie 1.

2.3.3.3 Chanvre de catégorie 3

Les chanvres de cette catégorie ont tendance à occuper la zone extérieure de notre échelle. Ce qui correspond à des valeurs maximales pour certaines caractéristiques comme par exemple la taille des particules. On observe les valeurs de la masse volumique de l'ordre de 135 kg/m^3 en moyenne avec un minimum de $125,56 \text{ kg/m}^3$ et un maximum de $147,5 \text{ kg/m}^3$, pour les chanvres C5 et C9, respectivement. Les analyses faites précédemment ont montré que c'est une caractéristique à maximiser.

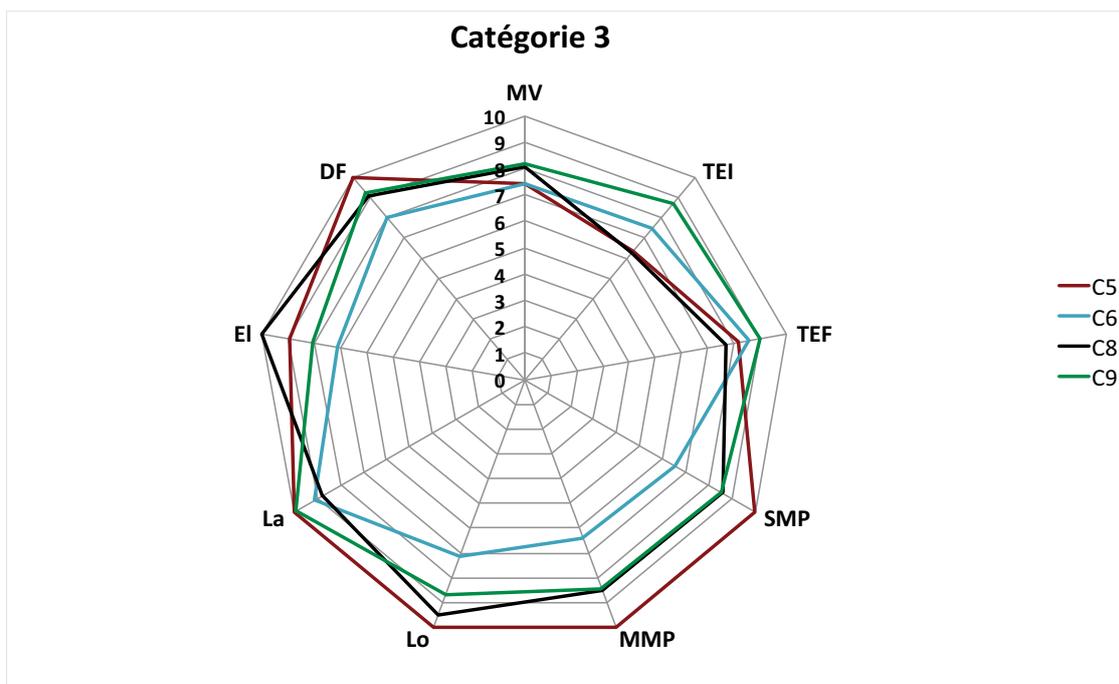


Figure 2-10 : Chènevottés classés dans la catégorie 3

Même si pour certaines propriétés, les valeurs maximales ne sont pas atteintes, on a quand-même des valeurs qui sont relativement élevées. Compte tenu des valeurs élevées pour la taille des particules et la teneur en eau, et vu leurs effets néfastes, cette catégorie donnerait des résultats de mauvaise qualité. Par hypothèse, les caractéristiques néfastes sont considérées comme dominantes par rapport à la masse volumique. En conséquence, les bétons de chanvre fabriqués à partir des chanvres de cette catégorie auront des performances plus faibles.

Par ailleurs, la forte corrélation entre les caractéristiques pour ce groupe, (figure 2-10) peut conférer à ces chanvres un comportement particulier donnant lieu à des résultats non escomptés. En effet, contrairement aux autres cas, il existe dans cette catégorie, un compromis induisant la bonne corrélation entre les caractéristiques bénéfiques et néfastes. C'est pourquoi une étude pour investiguer les propriétés du béton de chanvre fabriqué à partir de chanvres caractérisés lors de cette étude est nécessaire. Elle permettra ainsi de valider nos résultats et hypothèses. Mais avant de faire cette étude, les résultats du RRT3 (chapitre 3) dans lequel les chanvres C8 et C9 sont utilisés peuvent nous servir pour mener une analyse préliminaire.

2.3.3.4 Un regard sur les résultats du RRT3

Une étude réalisée lors de la thèse « RRT3 », sur l'analyse statistique de la variabilité des propriétés mécaniques du béton de chanvre a été conduite en utilisant les deux types de chanvre que nous avons par ailleurs caractérisés. Pour avoir un peu de recul sur notre échelle de comparaison, nous avons confronté dans un premier temps, les résultats de cette étude et l'échelle de comparaison.

Compte tenu du principe et la logique de notre échelle, les chanvres C8 et C9 ont été classés dans la même catégorie. De ce fait, nous ne sommes pas tout à fait dans la configuration idéale pour évaluer notre échelle.

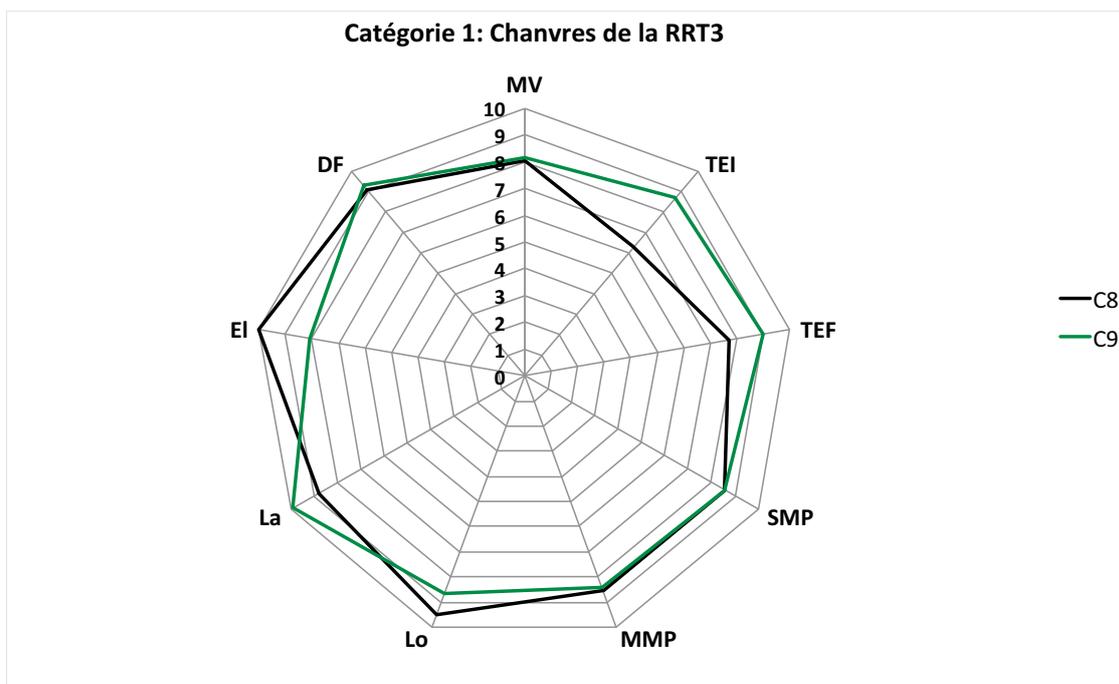


Figure 2-11: Chanvre de catégorie 3 utilisés lors de la RRT3 (papier en cours)

Malgré cet inconvénient, il est toujours possible de comparer les chanvres d'une même catégorie. Selon la même logique, plus on va vers l'extérieur du diagramme, plus on aura des performances faibles. Les résultats laissent le doute quant aux valeurs de la taille des particules. Il est à noter que la longueur et la largeur sont élevées pour les chanvres C8 et C9 respectivement et par conséquent l'élongation dans le cas du chanvre C8. Quand on observe la surface moyenne ainsi que le diamètre équivalent, on arrive à la conclusion que les deux chanvres ont une géométrie plus ou moins similaire.

Chanvre	MASSE VOLUMIQUE (kg/m^3)				CONTRAINTE MAXIMALE DE COMPRESSION (MPa)				MODULE D'YOUNG (MPa)			
	MV	ET	CV	Vk	MV	ET	CV	Vk	MV	ET	CV	Vk
C8 (11x22cm)	488,88	23,11	4,73	450,97	0,46	0,05	10,38	0,38	43,45	6,72	15,47	32,43
C9 (11x22cm)	451,61	19,17	4,25	420,16	0,44	0,05	10,79	0,37	31,86	3,14	9,87	26,71
C8 (16x32cm)	469,78	27,08	5,76	425,38	0,43	0,05	10,58	0,36	32,77	2,95	9,02	27,93
C9 (16x32cm)	422,10	2,51	0,60	417,98	0,32	0,01	4,00	0,30	30,97	2,28	7,35	27,24

Tableau 2-7: Résultats des performances des chanvres C8 et C9 (RRT3)

Pour simplifier la notation dans la suite, les abréviations suivantes sont utilisées dans le tableau 2-7 et dans la suite de ce manuscrit :

- MV : Masse Volumique ;
- ET : Ecart-Type ;
- CV : Coefficient de variation ;
- Vk : Valeur caractéristique.

On observe une différence significative entre les mesures d'absorption d'eau initiales et finales avec 152,73% et 333,31% pour le C8 et 211,17% à 389,03% pour le C9, respectivement. Cela nous permet de conclure que le chanvre C9 est celui qui a de faibles performances, étant donné que la capacité d'absorption d'eau a été identifiée comme néfaste.

Les résultats du tableau 2-7 sont en accord avec les attentes. En effet, que ce soit pour la masse volumique, la contrainte maximale de compression ou le module d'Young, nous avons dans tous les cas des valeurs élevées pour le chanvre C8.

Alors que ces résultats sont concordants, ils ne sont pas suffisants dans la mesure où la vérification est faite seulement sur deux types de chanvres qui sont classés dans la même catégorie. Il est alors nécessaire de poursuivre les analyses en se basant sur les chanvres des autres catégories et en faisant d'autres vérifications au sein de chacune d'elles. Puisque l'objectif n'est pas de tester tous les chanvres qui sont à notre disposition mais plutôt de comprendre leurs impacts sur le béton de chanvre quelle que soit leur catégorie d'appartenance, il est alors nécessaire de faire une sélection.

2.3.4 Choix et sélection des chanvres

Etant donné que nous ne pouvons pas réaliser les essais sur tous les types de chanvre, notre objectif est de sélectionner les types de chanvre les plus représentatifs de l'ensemble des chènevottes à notre disposition. Les catégories étant déjà identifiées, la démarche la plus simple consiste à choisir, un ou deux types de chanvre par catégorie.

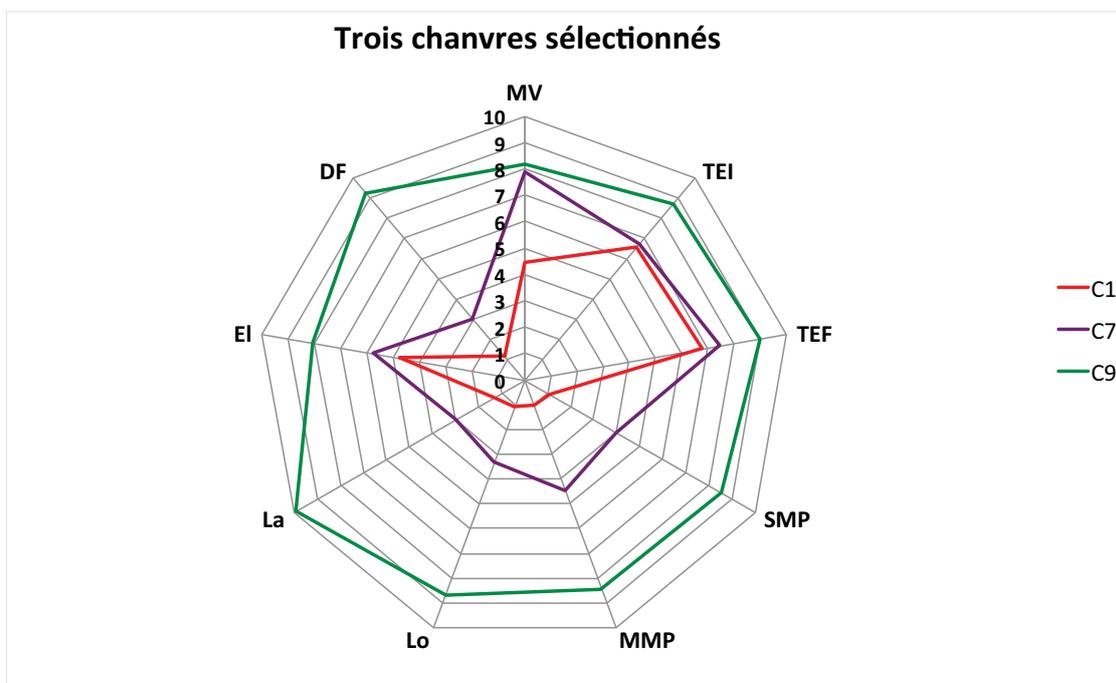


Figure 2-12 : Trois types de chanvres sélectionnés

La figure 2-12 montre à titre d'exemple, trois types de chanvre (C1 ; C7 ; C9) dont un par catégorie. D'autres triplets auraient pu être choisis comme par exemple (C10 ; C2 ; C5) ; (C12 ; C3 ; C6) et (C13 ; C4 ; C8) ; l'ordre des chanvres dans chaque triple est donné pour la catégorie (1 à 3) respectivement. Il est à noter que le chanvre C11 de catégorie 2, peut être aussi sélectionné au même titre que C2 ; C3 ; C4 et C7. Les triplets proposés ne sont pas exhaustifs, il est également possible d'inter-changer les chanvres d'un triplet à l'autre pourvu que leurs rangs soient gardés.

2.4 Conclusion

Dans cette étude, trois caractéristiques ont été analysées : la masse volumique en vrac, la capacité d'absorption d'eau, et la taille des particules. Dans un premier temps, nous avons étudié l'ensemble des chanvres par rapport à une caractéristique donnée. Les résultats à ce niveau ont révélé des variabilités considérables pour chacune des caractéristiques, avec une masse volumique en vrac allant de 70,8 kg/m³ à 158,8 kg/m³, une capacité d'absorption d'eau entre 112,2% et 242,5% à 1 min et entre 293,1% et 432,5% à 48 heures. Quant à la taille des particules, nous avons une variation de 2,27 à 5,52 pour l'élongation et de 0,32mm à 2,78mm pour le diamètre équivalent. Toutefois, les analyses à ce niveau n'ont pas permis de classer les chanvres. Ainsi, une analyse multicritère prenant en compte l'ensemble des caractéristiques a été conduite. En se basant sur les éléments de la bibliographie, cette étude a permis de proposer une échelle de comparaison. Cette démarche a abouti à une classification des chanvres en trois catégories.

Classement des chanvres	Performances mécaniques attendues
Catégorie 1	Bonnes
Catégorie 2	Moyennes
Catégorie 3	Faibles

Tableau 2-8: Niveau de performances mécaniques selon la catégorie de chanvres.

Sur la même échelle de comparaison et en considérant les résultats des performances mécaniques attendues; ces chanvres donneraient les bétons de chanvre dont les performances sont classées en trois catégories : faible, moyenne et bonne, (tableau 2-8).

Ainsi, il est possible de choisir et de sélectionner un type de chanvre, en ayant une idée sur son influence sur les performances du béton de chanvre. Il est à noter que les résultats du RRT3 pour les chanvres C8 et C9 sont en totale cohérence avec notre analyse.

Toutefois, l'objectif qui consiste à analyser la variabilité de la chènevotte sur la variabilité des performances du béton de chanvres n'est pas encore atteint. Dans le but de répondre à cet objectif, les essais de fabrication des éprouvettes du béton de chanvre sont proposés. Il sera alors possible de faire les tests pour les propriétés mécaniques et thermiques. Nous pourrions alors évaluer l'impact de la chènevotte sur ces dernières. Ces tests font l'objet du chapitre 5 et la proposition faite sur les différents essais à conduire est donnée en début de ce même chapitre.

Il est par ailleurs important de rappeler que le caractère bénéfique ou néfaste lors de nos analyses a été identifié sur la base des éléments de la littérature, avec quelques contradictions notamment pour la taille des particules. Or, comme nous le verrons au dernier chapitre, l'effet du type de chènevotte ne dépend pas seulement de ses caractéristiques mais aussi du type de liant utilisé. Il devient alors possible que les caractéristiques considérées comme néfastes soient bénéfiques et vice-versa.

Chapitre 3: Variabilité des propriétés des bétons de chanvre

Introduction

Les matériaux bio-sourcés sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la construction, soit en rénovation, soit en construction de bâti neuf. Leurs composants d'origine végétale sont nombreux, comme par exemple, les granulats de tournesol ou encore les granulats de chanvre [41,52,83]. Contrairement aux granulats d'origine minérale, les granulats végétaux sont renouvelables avec un bilan carbone neutre pour le cas du béton de chanvre. Par ailleurs, ils possèdent d'autres avantages comme leurs bonnes isolations acoustique et thermique. Cependant, un des inconvénients majeurs réside dans ses mauvaises performances mécaniques [58,75,108]. Dans ce chapitre, nous nous intéressons en particulier au matériau béton de chanvre fabriqué à base de chènevotte.

Dans la littérature, différentes études ont été conduites pour caractériser les matériaux béton de chanvre. A titre d'exemple, P. Mounanga et al. [82] ont étudié l'influence de la composition et de la méthode de fabrication sur l'évolution des propriétés mécaniques. Les résultats de la littérature montrent que les valeurs des propriétés du béton de chanvre sont d'une grande variabilité et sont sensibles à différents facteurs. Certains sont liés aux constituants du matériau comme la taille de particule, la nature du liant, et les autres au procédé de fabrication comme l'énergie de compactage et la méthode de moulage [19,33]. La littérature montre aussi un manque de prise en compte de la précision des instruments de mesure dans l'analyse de la variabilité des résultats expérimentaux. Par ailleurs, dans une analyse de la variabilité des propriétés du béton auto-plaçant, les auteurs soulignent la variabilité liée au nombre d'échantillons utilisés [104]. Dans leur étude, pour limiter les erreurs engendrées par l'insuffisance des données statistiquement significatives, ils ont utilisées entre 10 et 24 éprouvettes pour chacune des formulations étudiées. Or, ces différents paramètres (instruments de mesure, nombre et taille d'éprouvettes, etc.) peuvent être des sources de variabilité des propriétés des matériaux et doivent donc être pris en compte.

Ce chapitre présente l'analyse d'une campagne expérimentale réalisée dans le cadre du comité technique TC-236 bio-based building materials. Deux Round Robin Test (RRT1 et RRT2) ont déjà été conduits, en s'intéressant à l'étude comparative des différents protocoles de caractérisations de la chènevotte [43,51,55].

L'objectif principal du RRT3, est d'étudier la variabilité des propriétés du béton de chanvre par rapport aux différents facteurs, tels que le laboratoire ayant réalisé les essais (instruments de mesure), le type de chanvre utilisé, la gâchée et la taille des éprouvettes. Les principales propriétés étudiées sont la masse volumique apparente, la résistance à la compression et le module d'Young.

3.1 Matériels et méthodes utilisées

3.1.1 Caractérisation de la chènevotte

La chènevotte utilisée dans cette étude est issue de la même chanvrière mais celle-ci a été stockée dans deux endroits différents. Une partie au laboratoire de l'ENTPE et l'autre au laboratoire de Vicat avec des références du fabricant, 13 0173 KANABAT et 13 0174

KANABAT, respectivement. Des échantillons d'environ 1 kg pour chacune des parties a été prélevé et les essais de caractérisation ont été menés à la plateforme MSGC à Polytech Clermont-Ferrand (Institut Pascal). Les résultats de caractérisation montrent des différences entre ces chènevottes. Ils sont donnés dans le chapitre précédent, et sont symbolisés par C8 et C9 pour les parties de Vicat et de l'ENTPE, respectivement.

3.1.2 Fabrication des éprouvettes

3.1.2.1 Formule testée

Le béton de chanvre peut être utilisé dans plusieurs applications pour l'isolation au niveau du sol, remplissage de mur, etc. A chacune des applications, correspond un certain nombre de critères à satisfaire vis-à-vis des valeurs de contrainte de compression et du module d'Young tel que préconisé dans les règles professionnelles [70]. Pour répondre à ces exigences, des formulations appropriées sont nécessaires pour chaque application. Dans le cadre de cette étude, la formulation mur est utilisée. L'objectif principal n'étant pas l'étude de la formulation elle-même, et par conséquent toute autre formulation aurait pu être utilisée. Le dosage des composants utilisés est détaillé dans le tableau 3-1.

Chènevotte (kg)	Liant CNP ¹³ (kg)	Adjuvant Acide Citrique (kg)	Eau (kg)	Ratio Eau/Liant	Ratio Chènevotte/Liant
10	25	0,075	24	0,96	0,4

Tableau 3-1: la formulation utilisée (application mur)

3.1.2.2 Protocole de préparation du mortier

Nous commençons par peser chaque constituant dans un seau. Ensuite, dans le seau contenant le Ciment Nature Prompt, nous ajoutons de l'acide citrique et nous mélangeons. Il faut ensuite introduire la chènevotte dans le malaxeur, puis introduire le CNP déjà mélangé à l'acide citrique. Ensuite, nous mélangeons (vitesse malaxeur 40%) pendant quelques minutes et ajoutons de l'eau en conservant le malaxage. Nous augmentons la vitesse du malaxage à 50% puis mélangeons jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. A l'issue de ces étapes, nous pouvons vider le malaxeur dans une brouette pour l'utilisation du mélange.

3.1.2.3 Confection des éprouvettes

La confection des éprouvettes est réalisée en six étapes :

- remplir le moule en 5 ou 6 couches successives ;
- entre chaque couche, tasser à l'aider d'un outil adapté ;
- peser l'éprouvette ;
- mettre le couvercle ;
- conserver l'éprouvette retournée pendant 72 heures au minimum, puis retirer le couvercle et le fond du moule ;
- conserver l'éprouvette à 20°C et à 55% d'humidité relative, pendant 90 jours.

Les essais sur éprouvettes ont été conduits dans 10 laboratoires disposant de différentes machines d'essais. Afin de s'assurer que les éprouvettes testées sont identiques, ces dernières

¹³ Ciment Naturel Prompt est un liant hydraulique produit par le groupe Vicat

Variabilité des propriétés des bétons de chanvre

ont été fabriquées dans un même laboratoire (Vicat) le même jour et ont été séchées pendant 90 jours dans les mêmes conditions, toujours chez Vicat. Après séchage, elles ont été transportées dans divers laboratoires pour les essais de compression. Un Protocole de séchage sous étuve à 60°C pendant 48 heures a été respecté par l'ensemble des laboratoires. Le tableau 3-2 synthétise le nombre d'éprouvettes testées par catégorie (types de gâchée, taille d'éprouvettes, etc.).

Taille d'éprouvette		Eprouvette 11cmX22cm				Eprouvette 16cmX32cm				Total par laboratoire
Type de gâchée		I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Nom du laboratoire	Institut Pascal (A)		3		3		3			9
	Belfast (B)		2	2						4
	Trinity (C)	2			2					4
	LMDC Toulouse (D)	2		2						4
	Bath univ (E)		3		3					6
	LGCGM Rennes (F)		3		3				3	9
	Vicat (G)	3	1	6				3		13
	IFSSTAR (H)		3		4					7
	LiMATB Lorient (I)	3		3		3				9
	Lhoist (J)	2		2						4
Total par gâchée		12	15	15	15	3	3	3	3	69
Total par taille d'éprouvette		57				12				

Tableau 3-2: Synthèses des données des éprouvettes testées

D'après la nomenclature adoptée, les 10 laboratoires sont symbolisées par les lettres A à J. Les 4 gâchées dont 2 par types de chanvre sont symbolisées par les lettres I à II pour le chanvre C8 et III à IV et pour le chanvre C9. Nous avons fait deux gâchées par type de chanvre car la capacité du malaxeur ne permettait pas de malaxer en une seule fois. Les deux tailles d'éprouvettes sont symbolisées par 11 et 16 pour les 11x22cm et 16x32cm, respectivement. Et les éprouvettes sont numérotées de 1 à n. A titre d'exemple, la notation « II-11-3 » représente l'éprouvette n°3 de taille 11x22cm fabriquée à partir de la gâchée II du chanvre C8.

3.1.3 Protocole d'essai de compression

Comme les essais de compression ont été réalisés dans dix laboratoires différents, nous avons adopté un protocole commun, afin de garantir les mêmes conditions. Délibérément, pour certaines éprouvettes, nous avons réalisé un chargement monotone, c'est le cas notamment pour les éprouvettes testées chez le laboratoire Trinity college : I-11-7, I-11-8, IV-11-11, IV-11-12, et le laboratoire LiMATB Lorient : I-11-2, III-11-11, I-16-1. Les étapes à suivre pour les essais de compression sont les suivantes :

1. peser l'éprouvette avec le moule ;
2. enlever le moule en utilisant un outil adapté ;
3. marquer l'éprouvette avec la même référence que sur le moule ;
4. peser l'éprouvette sans le moule ;
5. mettre les éprouvettes à l'étuve à 60°C jusqu'à la stabilisation de son poids ; le poids est considéré stable pour une variation équivalent à $\pm 2\%$ entre deux pesées dans un intervalle de 24 heures ;

6. laisser les éprouvettes dans les sacs hermétiques ;
7. prendre les mesures géométriques de l'éprouvette : trois diamètres (en bas, au milieu et en haut), puis la hauteur tous les 120 degrés ;
8. ne pas faire de surfaçage d'éprouvettes mais s'assurer que les plateaux de compression sont parfaitement parallèles avant le début de l'essai ;
9. l'essai est piloté en déplacement sous une vitesse de 3mm/min pendant la phase de chargement ; la phase de déchargement est pilotée à 6mm/min ou libre s'il n'est pas possible de la contrôler ;
10. la fréquence d'acquisition des données est de 10 points par seconde ;
11. trois cycles sont appliqués :
 - cycle 1** : chargement de 0 à 1% de déformation relative puis déchargement jusqu'à une charge nulle si possible ou déplacement nul ;
 - cycle 2** : même procédure que dans le cycle 1 mais avec un chargement jusqu'à 2% de déformation relative ;
 - cycle 3** : même procédure que dans le cycle 1 mais avec un chargement jusqu'à 3% de déformation relative ;
 - chargement final** : chargement jusqu'à la rupture de l'éprouvette (maximum de 20% de déformation relative) puis déchargement jusqu'à une charge nulle si possible ou déplacement nul ;
12. sauvegarder le fichier de résultats ;
13. envoyez le fichier au format .xls avec les détails ci dessous :
 - référence de l'éprouvette, masse volumique avant l'essai de compression, dimensions géométriques moyennes (diamètre, hauteur), temps, force, déplacement, contrainte et déformation ;
14. avant d'envoyer les fichiers, tracer les courbes : force/déplacement et contrainte/déformation.

3.1.4 Grandeurs évaluées

3.1.4.1 Valeur moyenne et écart-type

D'après [109] la moyenne arithmétique d'une série statistique $\{x_i; i = 1, \dots, n\}$ se définit comme étant égale à la somme des observations divisée par l'effectif n de la série ; elle est notée \bar{x} . Comme une somme de nombres ne dépend pas de l'ordre dans lequel ils se présentent, on peut aussi définir \bar{x} à partir de la série ordonnée $\{x_{(i)}; i = 1, \dots, n\}$. Formellement, on peut définir \bar{x} comme suit :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{ou} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{(i)} \quad \text{éq. 3-1}$$

L'écart-type d'une série statistique est égal à la racine carrée de la variance s^2 et est désigné, tout naturellement, par la lettre s . Ainsi dans le cas d'une série $\{x_i\}$, on a :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{éq. 3-2}$$

3.1.4.2 Valeur caractéristique

La valeur caractéristique d'une quantité mesurée expérimentalement correspond à la valeur représentative pouvant être utilisée dans le dimensionnement, lors de la conception, la maintenance, la réhabilitation ou tout autre processus de décision. Par exemple, la contrainte maximale de compression du béton est définie comme la résistance caractéristique en dessous de laquelle, il existe seulement 5% des résultats [110]. Cela signifie qu'il y a une probabilité de 5% d'avoir une résistance inférieure à la valeur caractéristique. Il est aussi possible de considérer d'autres niveaux de probabilité comme 10% ou 20% selon la sécurité désirée vis-à-vis de la conception. Sous l'hypothèse de normalité, il est proposé de calculer la valeur caractéristique de la résistance à la compression du béton de la manière suivante :

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64\sigma_{fc} \quad \text{éq. 3-3}$$

où f_{ck} est la valeur caractéristique de la résistance du béton, f_{cm} est la moyenne de résistance des résultats expérimentaux et σ_{fc} est l'écart-type de la résistance.

Il est important de rappeler que -1,64 est le quantile à 5% de la distribution normale centrée réduite. Cette expression est valable sous l'hypothèse que les résultats suivent une distribution normale.

3.1.4.3 Coefficient de variation (CV)

Le coefficient de variation correspond à la dispersion des résultats expérimentaux autour de leur valeur moyenne. Il est calculé par la relation suivante : $CV = \text{Ecart-type}/\text{moyenne}$ et est souvent exprimé en pourcentage. A titre d'exemple, le tableau 3-3 donne les valeurs limites acceptables en termes d'écart-type et de coefficient de variation pour le contrôle de qualité sur la résistance à la compression du matériau béton auto-plaçant [104].

Qualité de contrôle	Limites acceptables pour l'écart-type ($f_{ck} > 27\text{MPa}$)	Limites acceptables pour le CV (%)
A (excellent)	2,7	10
B (moyen)	4,0	15
C (faible)	5,4	20

Tableau 3-3: Limites acceptables comme qualité de contrôle sur la variabilité de la résistance à la compression du béton [104]

3.1.5 Tests statistiques

En analyse statistique, il est important d'avoir un nombre significatif d'individus dans une population ; ceci permet de pouvoir limiter les erreurs sur les estimations effectuées. La taille minimale de l'échantillon nécessaire dépend de la propriété statistique à analyser comme par exemple la moyenne ou l'écart-type mais aussi du type de test à faire (e.g. test de normalité, etc.).

L'objectif principal des tests statistiques est de pouvoir aide à la prise de décision au moyen d'informations synthétiques sur les résultats expérimentaux et la population étudiée. Ceci passe souvent par la détermination de la loi de distribution qui s'ajuste au mieux aux résultats. D'après les échantillons de notre étude, nous pouvons a priori les classer en 8 sous-

populations, figure 3-1. Quatre gâchées pour les deux types de chanvre et deux types d'éprouvettes pour chaque gâchée.

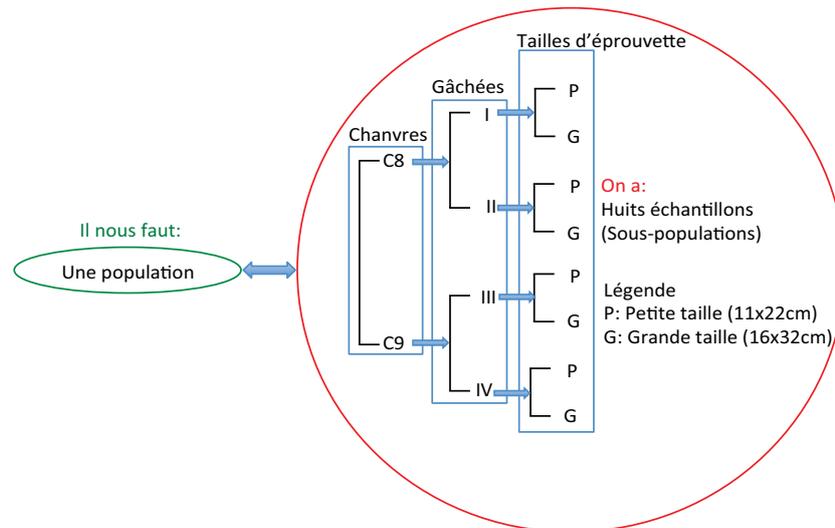


Figure 3-1: Synthèse des sous-populations de l'étude

Pour pouvoir regrouper ces sous-populations en une seule population, il est nécessaire de faire des tests d'appartenance à une population. En pratique nous savons que les deux tailles d'éprouvettes (P et G) sont issues d'une même gâchée, et que les deux gâchées sont issues d'un seul type de chanvre ; il s'agit alors de valider cette appartenance au moyen de tests statistiques. Après cette validation, il est également nécessaire de prouver statistiquement l'appartenance de deux types de chanvre à une seule population.

3.1.5.1 Test d'appartenance à une population

Ces tests appelés aussi « tests de comparaison de populations », cherchent à déterminer si K ($K \geq 2$) échantillons proviennent de la même population relativement à la variable d'intérêt. A partir des échantillons, nous pouvons alors tirer des conclusions sur la population.

Parmi ces tests, nous pouvons citer le test t de Student [111] qui est basé sur la comparaison des moyennes d'échantillons deux à deux. Il convient de noter que ce dernier est un cas particulier du test ANOVA (ANalysis Of Variance) [112] qui consiste en l'analyse des moyennes de k échantillons à la fois. On trouve par ailleurs le test de Kruskal Wallis [113] qui permet également de comparer k échantillons. Grâce à ces tests, nous pouvons alors savoir si l'ensemble des échantillons provient d'une même population ou pas. Dans le cas des tests ANOVA et de Kruskal Wallis, si le test est négatif, alors on rejette l'hypothèse nulle : H_0 . Lorsque cette hypothèse nulle qui suppose que les échantillons sont issues de la même population est rejetée, on ne peut pas a priori savoir les échantillons qui n'appartiennent pas à la même population. Il est alors nécessaire de comparer les échantillons deux à deux par le test de Student, ce qui permet d'identifier l'échantillon n'appartenant pas à la population. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons privilégié l'utilisation du test t de Student. Ces tests ont été réalisés sous un logiciel XLSTAT [114].

3.1.5.2 Test t de Student

Dans un test t de Student, deux conditions sont nécessaires. La première est que, les deux échantillons comparés doivent s’ajuster à la distribution normale ; cette condition est satisfaite dans la plus part des cas. La deuxième est que, les deux échantillons comparés doivent avoir la même variance [111].

Avant d’effectuer le test t de Student, nous avons vérifié ces deux conditions. Concernant la première condition, nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov d’ajustement à la loi normale, il s’agit du test de normalité. Dans ce cas, l’hypothèse nulle suppose que l’échantillon testé s’ajuste à la distribution normale. Pour la deuxième condition, nous avons effectué le test d’égalité de variance de Fischer. Dans ce cas, l’hypothèse nulle suppose que le rapport des variances de deux échantillons testés est égal à 1. Le niveau de signification considéré pour les deux tests est de 5%. Les résultats des tests, peuvent être soit positifs soit négatifs selon la valeur de la p-value calculée. Si cette valeur est inférieure à 5% alors le test est à rejeter (**R**), sinon il est non rejeté (**NR**).

Sous ces hypothèses, les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov (tableau 3-4) et de Fischer (tableau 3-5), montrent que les deux conditions sont satisfaites à 100%, et ce pour l’ajustement des échantillons à la distribution normale (test de normalité) et de l’égalité de leurs variances.

		Test de normalité de Kolmogorov-Smirnov		
Taille de l'éprouvette	Gâchée	Masse volumique (Kg/m³)	Contrainte maximale de compression (MPa)	Module d'Young (MPa)
11x22cm	I	(16,63%; NR)	(40,58%; NR)	(95,59%; NR)
	II	(71,41%; NR)	(82,12%; NR)	(94,38%; NR)
	III	(42,59%; NR)	(96,61%; NR)	(82,38%; NR)
	IV	(15,73%; NR)	(75,29%; NR)	(59,84%; NR)
16x32cm	I	(78,46%; NR)	(75,05%; NR)	(99,92%, NR)
	II	(67,45%; NR)	(99,92%; NR)	(99,92%, NR)
	III	(82,21%; NR)	(63,68%; NR)	(94,98%; NR)
	IV	(79,82%; NR)	(63,68%; NR)	(86,69%; NR)

Tableau 3-4: Résultats de test de Kolmogorov-Smirnov d'ajustement à la loi normale par taille d'éprouvette et par gâchée

		Test d'égalité de variance de Fischer		
Taille de l'éprouvette	Gâchée	Masse volumique (Kg/m³)	Contrainte maximale de compression (MPa)	Module d'Young (MPa)
11x22cm	I and II	(17,82%; NR)	(71,33%; NR)	(60,21%; NR)
	III and IV	(11,34%; NR)	(45,32%; NR)	(6,30%; NR)
16x32cm	I and II	(71,24%; NR)	(94,22%; NR)	(74,75%; NR)
	III and IV	(57,13%; NR)	(13,28%; NR)	(97,49%; NR)

Tableau 3-5: Résultats de test de Fischer pour l'égalité de variance entre les gâchées deux à deux par taille de l'éprouvette.

N.B : le premier chiffre entre parenthèses correspond à la valeur de la p-value donnée par le test, tandis que la lettre R ou NR signifie que le test est rejeté ou non rejeté, respectivement.

Dans la mesure où les deux conditions nécessaires sont satisfaites, nous pouvons effectuer le test t de Student dont les résultats sont donnés dans le tableau 3-6. Malgré le fait qu’en pratique les gâchées proviennent du même type de chanvre, elles n’appartiennent pas

nécessairement à la même population du point de vue statistique. En effet, les résultats du test t de Student dans le tableau 3-6 montrent que les sous-populations ne sont pas issues de la même population.

Taille d'éprouvette	Test entre gâchées	RESULTATS DU TEST		
		Masse volumique (Kg/m ³)	Contrainte de compression maximale (MPa)	Module d'Young (MPa)
11x22cm	I and II	(30,45%; NR)	(0,10%; R)	(8,85%; NR)
	III and IV	(0,26%; R)	(1,75%; R)	(1,69%; R)
16x32cm	I and II	(8,49%; NR)	(70,03%; NR)	(10,85%; NR)
	III and IV	(0,04%; R)	(0,14%; R)	(5,58%; NR)

Tableau 3-6: Les résultats du test de Student pour les gâchées deux à deux par taille de l'éprouvette

Pour conforter ce résultat, le diagramme de dominance est utilisé pour permettre de comparer visuellement les deux échantillons. Le premier échantillon est représenté sur l'axe des abscisses (gâchée I) et le second sur l'axe des ordonnées (gâchée II). En cas d'égalité, les deux échantillons sont représentés symétriquement par rapport à la première bissectrice ; dans le cas contraire l'échantillon dominant est alors plus représenté. Les points dans la partie inférieure gauche par rapport à la bissectrice représentent le premier échantillon et les points se trouvant de l'autre côté représentent le deuxième échantillon. A titre d'exemple, le diagramme de dominance en figure 3-2 montre les résultats du test t de Student sur l'égalité des moyennes entre les gâchées I et II pour la masse volumique dans le cas de petites éprouvettes. Sur ce diagramme les points représentant les deux gâchées sont quasi-symétriques par rapport à la première bissectrice, ce qui traduit l'égalité des moyennes des deux gâchées avec le risque de rejeter l'hypothèse nulle égal à 30,45% (tableau 3-6). Pour rappel, l'hypothèse nulle suppose l'égalité des moyennes des deux échantillons testés.

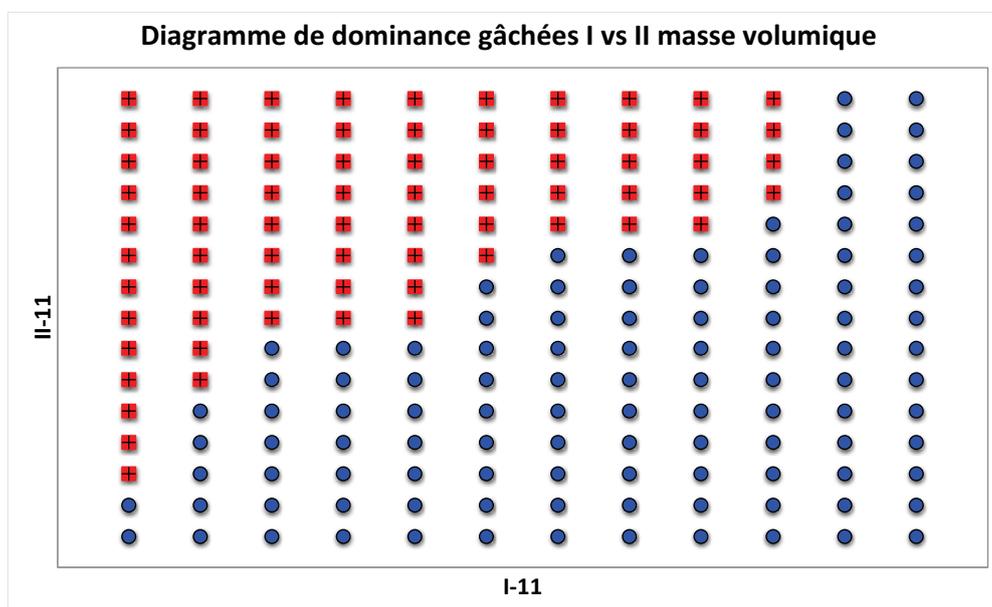


Figure 3-2: Diagramme de dominance du test d'égalité des moyennes gâchées I vs II pour la masse volumique

Le diagramme de dominance en figure 3-3 montre les résultats du test d'égalité des moyennes entre les gâchées I et II pour la contrainte de compression dans le cas de petites éprouvettes. Contrairement aux résultats de la figure 3-2, les points de la gâchée II sont plus représentés

que ceux de la gâchée I. Par conséquent, les deux moyennes sont différentes avec le risque de rejeter l'hypothèse nulle très faible, égal à 0,10% (tableau 3-6).

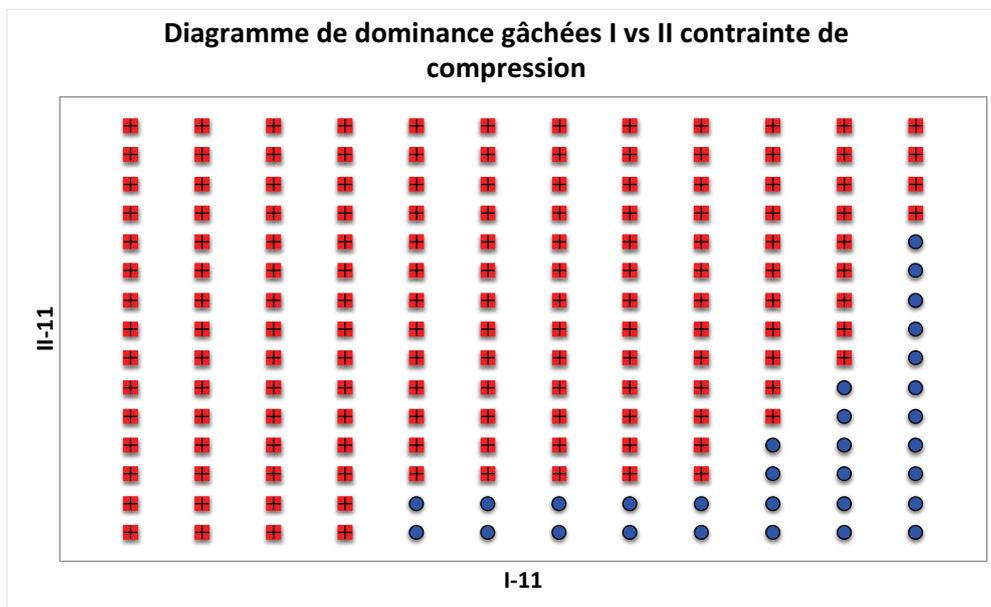


Figure 3-3 : Diagramme de dominance du test d'égalité des moyennes gâchées I vs II pour la contrainte de compression.

D'après ces résultats, nous ne pouvons pas combiner les échantillons dans une seule population statistique pour avoir une taille significative.

Dans le but d'évaluer la dispersion des données, nous proposons d'ajuster leurs moyennes autour d'une valeur de référence. Cela revient à ramener la distribution des données de telle sorte que leurs moyennes soient centrées autour d'un seul point de référence. Il convient de souligner que cet ajustement est fait pour caractériser l'écart-type de la population et sa loi de distribution et non pas pour déterminer les valeurs moyennes. Grâce à cette démarche détaillée ci-dessous, il devient possible de combiner l'ensemble des échantillons en une seule population de taille significative.

Considérons deux échantillons $X = \{x_1; x_2; \dots; x_i\}$ et $Y = \{y_1; y_2; \dots; y_i\}$; avec \bar{X} et \bar{Y} leurs moyennes respectives. Pour ajuster la moyenne \bar{Y} de l'échantillon Y à la moyenne \bar{X} de l'échantillon X, il convient de procéder au calcul de la moyenne ajustée \bar{Y}' en utilisant la formule de l'équation 3-4:

$$\bar{Y}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i + (\bar{X} - \bar{Y})] \tag{eq. 3-4}$$

En développant la formule (eq. 3-4), il vient : $\bar{Y}' = \bar{Y} + \bar{X} - \bar{Y}$ ce qui donne finalement : $\bar{Y}' = \bar{X}$, mais cette fois-ci avec les variables de $Y' = \{y'_1; y'_2; \dots; y; y'_n\}$. Cette démarche, conduit à deux échantillons ayant les mêmes valeurs moyennes. Il devient alors possible de les combiner pour une analyse de dispersion et d'ajustement à une loi de distribution. Cette procédure admet implicitement l'hypothèse d'indépendance entre la moyenne et l'écart-type des échantillons.

3.2 Résultats et analyses

Comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique, les propriétés du béton de chanvre telles que la masse volumique, la contrainte de compression et le module d'Young peuvent

varier sous diverses conditions. Parmi les paramètres pouvant influencer sur ces propriétés, nous pouvons citer pour rappel, l'énergie de compactage [19,33], la méthode de mesure [2], les conditions de séchage, le type de liants, les types de chanvre [32,33] et bien d'autres. Dans cette partie, nous nous intéressons aux paramètres qui n'ont pas été suffisamment traités dans la bibliographie ou qui n'ont pas été étudiés du tout, à savoir l'impact du laboratoire d'essai, du type de gâchée, du type de chanvre et de la taille de l'éprouvette. Nous nous intéressons à leur impact sur les propriétés du chanvre citées en début de ce paragraphe. Par souci de simplification, nous proposons une notation abrégée pour ne pas surcharger les tableaux. Pour ce faire, nous utiliserons :

- VM : Valeur Moyenne ;
- ET : Ecart-Type ;
- CV : Coefficient de Variation ;
- V_k : Valeur Caractéristique ;
- F_c: Contrainte de compression.

3.2.1 Reproductibilité des résultats selon les laboratoires d'essais

A ce jour et à notre connaissance, aucune étude regroupant autant de laboratoires n'a été réalisée pour étudier l'impact des matériels utilisés sur les performances du béton de chanvre. Cependant, il convient de noter que les études inter-laboratoires sur les granulats de chanvre ont été faites [43,51,55] par les membres du comité TC-BBM 236. Il s'agit de deux RRT précédents menés pour la caractérisation de la chènevotte. Les résultats que nous présentons ici sont regroupés dans deux tableaux 3-7 et 3-8 selon la taille d'éprouvette : 11x22cm et 16x32cm, respectivement.

Labo	Masse volumique (kg/m ³)				Contrainte de compression (MPa)				Module d'Young (MPa)			
	VM	ET	CV	V _k	VM	ET	CV	V _k	VM	ET	CV	V _k
Tous	471,2	28,3	6,0	424,8	0,45	0,05	10,69	0,37	36,86	7,08	19,22	25,24
A	496,9	31,2	6,3	445,6	0,49	0,03	5,46	0,45	33,82	4,58	13,55	26,31
B	476,9	17,6	3,7	448,0	0,48	0,04	8,45	0,41	40,72	5,01	12,29	32,51
C	471,4	29,1	6,2	423,6	0,44	0,03	6,73	0,39				
D	465,9	18,5	4,0	435,6	0,42	0,06	13,87	0,32	34,16	3,43	10,05	28,53
E	468,4	29,3	6,3	420,3	0,49	0,02	4,47	0,45	40,87	8,63	21,13	26,71
F	465,2	26,6	5,7	421,6	0,49	0,04	8,36	0,42	35,27	3,18	9,02	30,05
G	453,7	13	2,9	432,5	0,41	0,04	9,42	0,34	35,33	5,11	14,45	26,96
H	472,5	35,7	7,4	414,8	0,46	0,05	10,56	0,38	44,01	9,89	22,47	27,79
I	452,7	12,6	2,8	432,0	0,45	0,05	10,78	0,37	36,01	5,23	14,53	27,43
J	514,6	15,5	3,0	489,2	0,43	0,04	8,30	0,37	28,81	4,75	16,49	21,02

Tableau 3-7: Masse volumique, contrainte maximale de compression, module d'Young par laboratoire d'essais (éprouvette 11x22cm)

Variabilité des propriétés des bétons de chanvre

Labo	Masse volumique (kg/m ³)				Contrainte de compression (MPa)				Module d'Young (MPa)			
	VM	ET	CV	Vk	VM	ET	CV	Vk	VM	ET	CV	Vk
Tous	443,5	29,7	6,7	394,8	0,38	0,06	16,77	0,28	35,58	4,46	12,54	28,26
A	423,4	1,7	0,5	420,2	0,32	0,02	5,07	0,29	30,97	2,28	7,35	27,24
F	495,4	8,6	1,7	481,4	0,48	0,02	4,47	0,44	39,13	3,04	7,77	34,14
G	445,5	4,1	0,9	438,7	0,39	0,00	1,17	0,39	32,77	2,95	9,02	27,93
I	420,4	2,1	0,5	416,9	0,32	0,01	4,15	0,29	39,06	3,42	8,76	33,45

Tableau 3-8 : Masse volumique, contrainte maximale de compression, module d'Young par laboratoire d'essais (éprouvette 16x32cm)

3.2.1.1 Masse volumique

L'analyse des résultats de la masse volumique obtenus par différents laboratoires montre une faible variabilité pour une taille d'éprouvette donnée. On observe un CV de 6,0% et 6,7% pour l'ensemble des laboratoires dans le cas de petites et grandes éprouvettes respectivement, (tableaux 3-7 et 3-8).

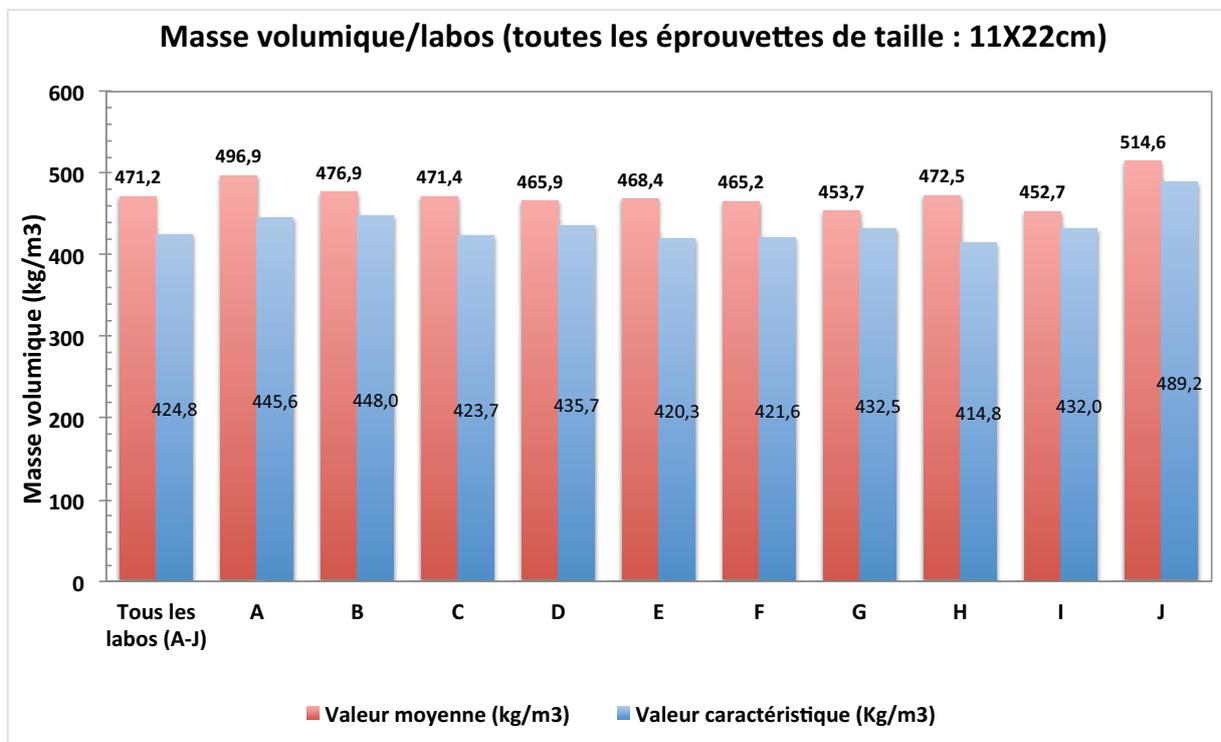


Figure 3-4: Masse volumique apparente par labo, pour les éprouvettes de petite taille

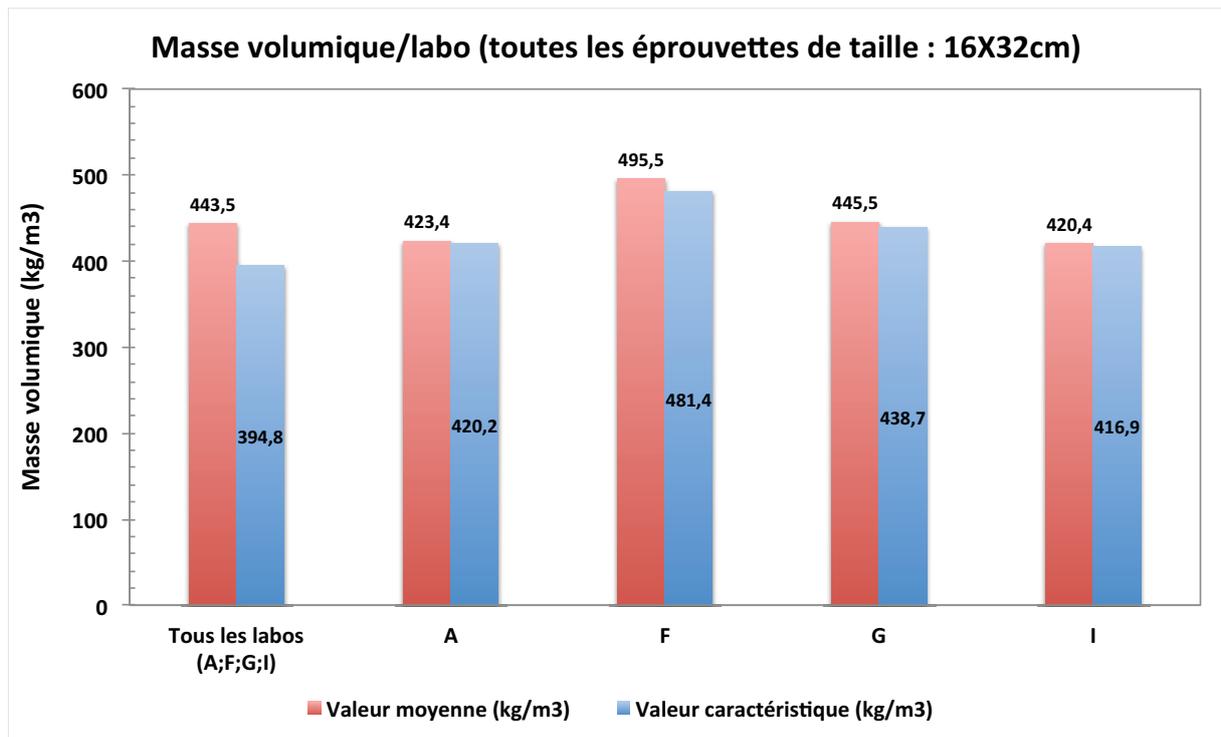


Figure 3-5: Masse volumique apparente par labo, pour toutes les éprouvettes de grande taille

D'après la littérature, cette propriété peut être sensible à certains paramètres et ainsi présenter des dispersions. Dans d'autres contextes F. collet [2] a déterminé la masse volumique par trois méthodes : pesé et mesure des dimensions, par pycnomètre et par prosimètre à mercure. En considérant deux gâchées A et B, l'essai au prosimètre à mercure a donné des résultats de l'ordre de 610 à 665 kg/m³ alors que les deux autres méthodes ont donné des résultats de l'ordre de 390 à 425 kg/m³. Les valeurs obtenues par la méthode au prosimètre à mercure sont plus élevées car, les pores ne sont pas pris en compte, on a ainsi contrairement aux autres méthodes, la masse volumique réelle ou absolue.

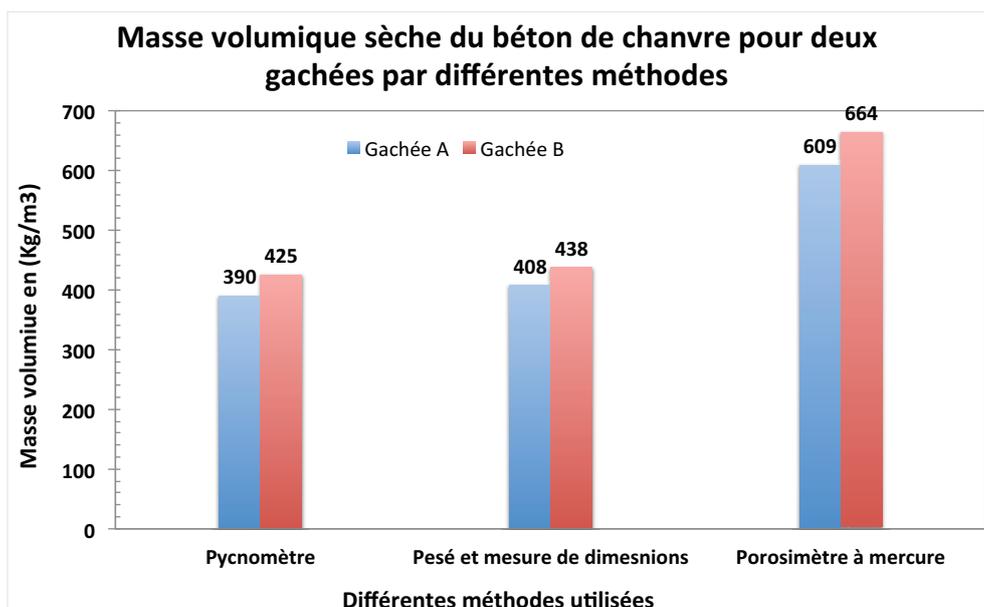


Figure 3-6: Masse volumique sèche par différentes méthodes [2].

Dans les méthodes par pycnomètre et par pesé, il semble que la masse volumique présente de faibles variabilités quelle que soit la gâchée considérée. Cependant en considérant à la fois différentes gâchées et méthodes, on observe des différences non négligeables. A titre d'exemple, on a 390 kg/m^3 et 438 kg/m^3 pour les gâchées A et B et les méthodes au pycnomètre et par pèse, respectivement.

Par ailleurs, nous observons une différence non négligeable entre les valeurs caractéristiques en considérant les deux tailles d'éprouvettes. Ces résultats seront discutés en détail dans le paragraphe, 3.2.4.1.

3.2.1.2 Contrainte de compression

Dans la littérature, l'impact sur la résistance à la compression du béton de chanvre a été étudié par rapport à la teneur en liant [33], le mode de fabrication et de mise en œuvre [75], la direction de compactage [19,35], etc. Peu ou pas de travaux dans la littérature se sont intéressés à l'impact que peut avoir les différents outils ou machines d'essai sur l'évaluation de la résistance à la compression du béton de chanvre. Vu la forte sensibilité des propriétés du béton de chanvre, il est possible que ces outils entraînent des variabilités supplémentaires. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à cette problématique.

Dans le cas des éprouvettes de petite taille, les résultats montrent des valeurs moyennes de l'ordre de 0,41 MPa à 0,49 MPa pour les laboratoires G et A, E et F, respectivement (figure 3-7).

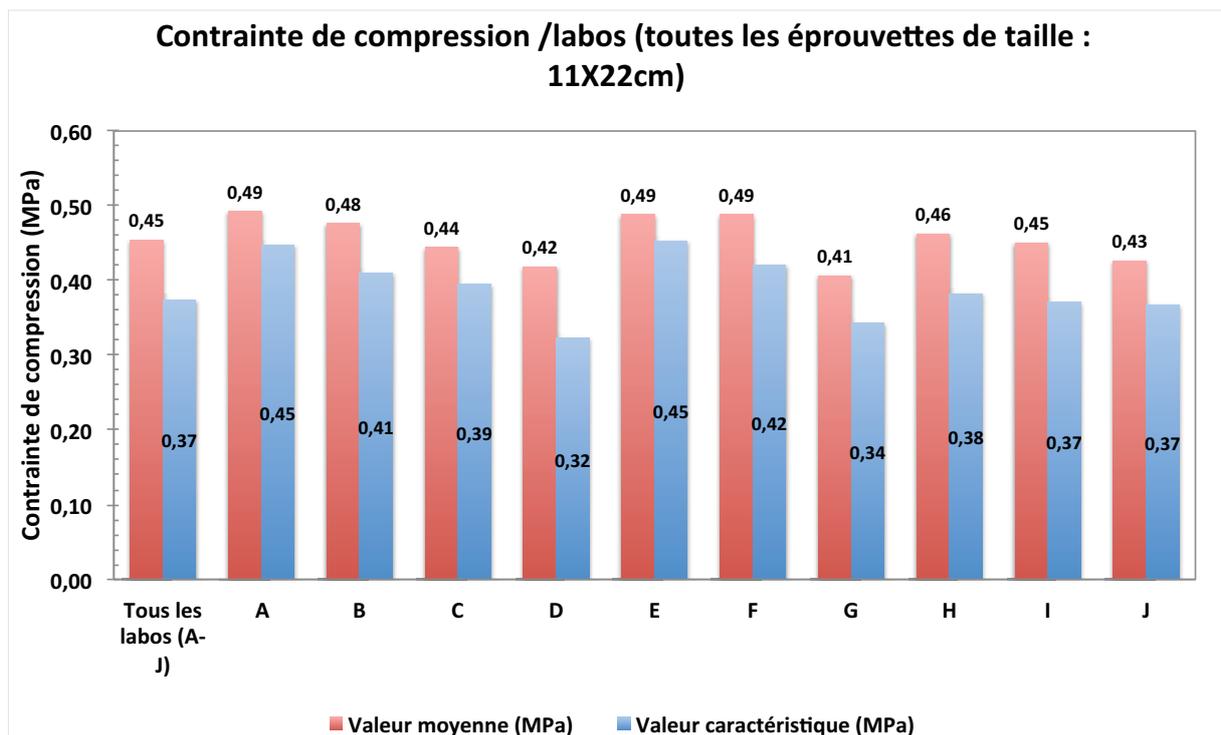


Figure 3-7: Contrainte de compression par labo et tous les labos, pour toutes éprouvettes de petite taille

Pour les éprouvettes de grande taille, les résultats ont tendance à donner des valeurs plus faibles, avec une valeur moyenne minimale égale à 0,32 MPa pour les laboratoires A et I et une valeur maximale de 0,47 MPa pour le laboratoire F (figure 3-8).

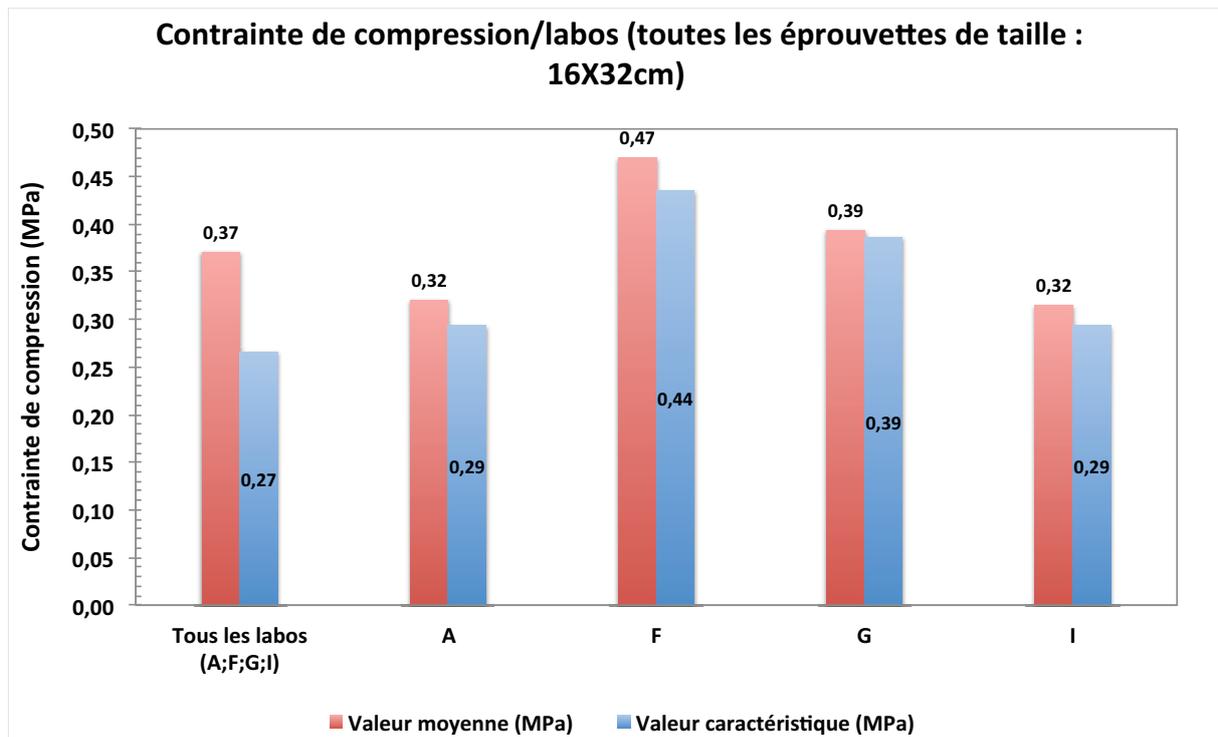


Figure 3-8: Contrainte de compression par labo et tous les labos, pour toutes éprouvettes de grande taille

L'analyse de ces résultats nous indique une faible variabilité pour le cas de petites éprouvettes avec une valeur caractéristique de 0,37 MPa et un coefficient de variation de 10,7%. Cependant, nous constatons une variabilité non négligeable pour les éprouvettes de grande taille avec une valeur caractéristique de 0,27 MPa et un coefficient de variation de 16,8%. Sur la base de ces résultats, et en se référant aux valeurs limites données dans le tableau 3-3, nous pouvons conclure que les résultats sont d'excellente qualité dans le cas de petites éprouvettes et de mauvaise qualité dans le cas de grandes éprouvettes. Par ailleurs, les différences constatées pour les valeurs obtenues avec les deux tailles d'éprouvette laissent penser à une possible existence d'effet d'échelle. Toutefois, il est important de souligner que le faible nombre d'échantillons 12 pour les grandes éprouvette contre 57 pour les petites (tableau 3-2) peut conduire à des résultats non ou peu significatifs statistiquement. L'existence possible de l'effet d'échelle sera évoquée dans la section 3.2.4.2.

3.2.1.3 Module d'Young

Les paramètres affectant la contrainte de compression sont susceptibles d'affecter également le module. Lors de cette étude, les résultats sur l'impact du laboratoire montre des valeurs moyennes qui varient de 28,8 MPa à 44,0 MPa. L'analyse montre que nous avons deux classes de valeurs, l'une variant de 33 à 38 MPa et l'autre de 40 à 45 MPa. En effet, la valeur moyenne obtenue dans le laboratoire J nous semble un cas isolé par rapport aux autres valeurs. Les résultats des éprouvettes de grande taille sont plus ou moins homogènes avec un coefficient de variation maximal égal à 9,0%. Comme nous l'avons vu précédemment, ces résultats sont à considérer avec prudence dans la mesure où le nombre d'échantillons reste relativement faible par rapport aux éprouvettes de petite taille.

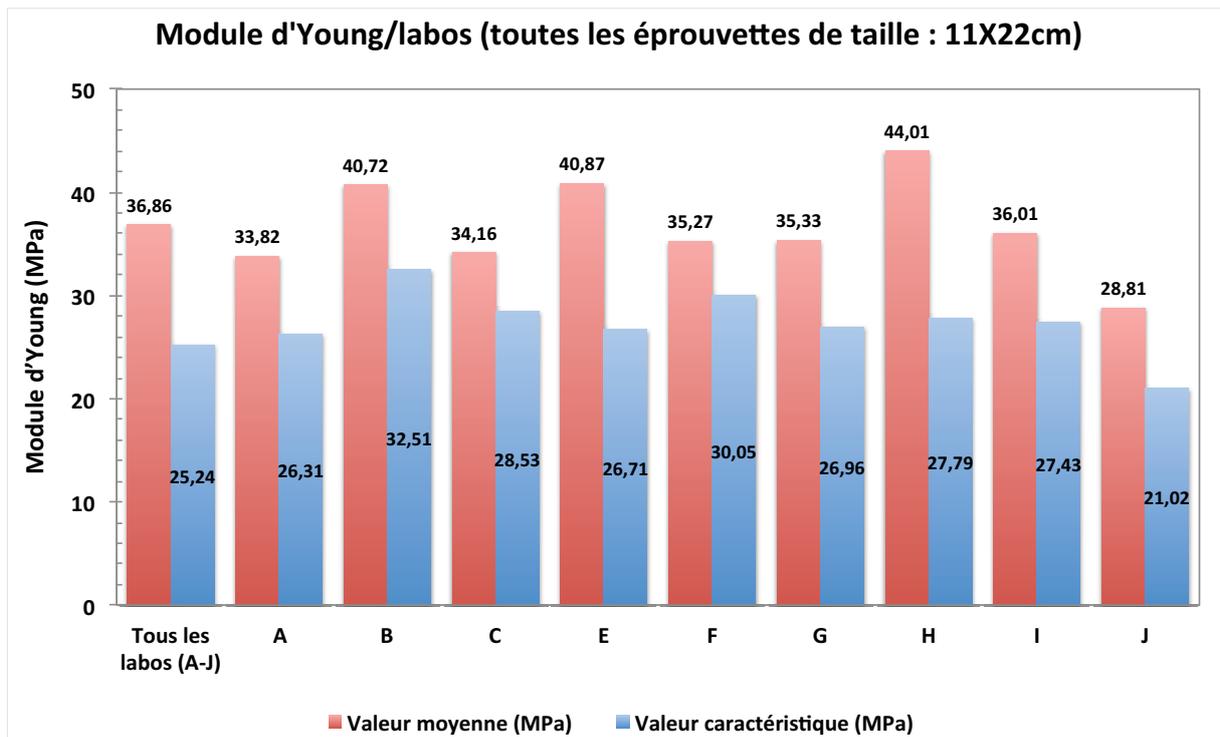


Figure 3-9: Module d'Young, par labo et tous les labos, pour toutes éprouvettes de petite taille

Nous remarquons que deux laboratoires ont les coefficients de variation les plus élevés : 22,5% et 21,1% pour les laboratoires H et E, respectivement. Ceci conduit à un fort coefficient de variation pour tous les laboratoires égal à 19,2%, (tableau 3-7). Avec un tel CV, et en se référant aux valeurs limites données dans le tableau 3-3, il en résulte une forte variabilité du module d'Young.

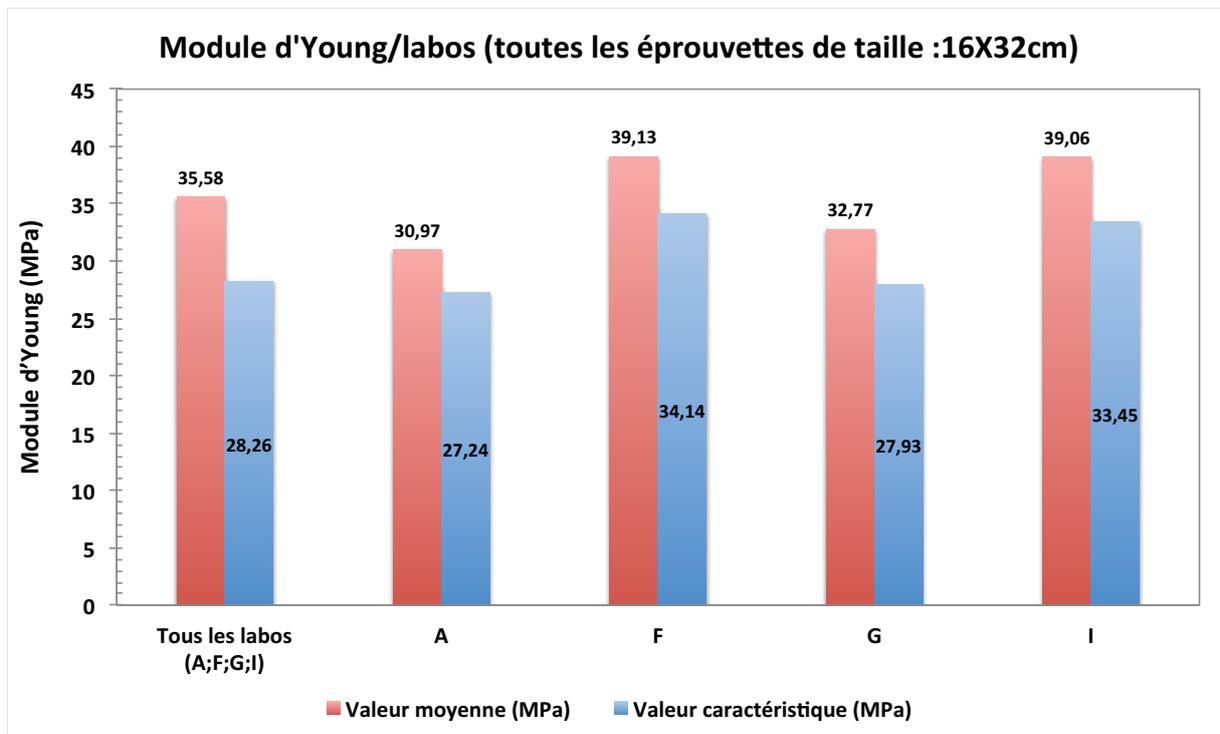


Figure 3-10: Module d'Young, par labo et tous les labos, pour toutes éprouvettes de grande taille

L'impact significatif du laboratoire sur les résultats du module d'Young n'est pas le même que pour la contrainte de compression. Ces résultats doivent être considérés attentivement, dans la mesure où nous savons qu'il existe une relation entre les deux propriétés. Les pistes envisageables pour expliquer ces différences sont :

- d'une part, le comportement non linéaire de la courbe contrainte-déformation dans laquelle la valeur de contrainte a été considérée au-delà de la phase linéaire,
- d'autre part, la méthode utilisée pour calculer le module, car ce dernier n'a pas été calculé dans la phase linéaire.

Les détails sur la corrélation entre les deux propriétés sont développés dans la section 3.2.5 afin de mieux comprendre les résultats obtenus.

3.2.2 Reproductibilité des résultats entre les gâchées

Comme nous l'avons mentionné dans la section 3.2.1, l'impact de la gâchée sur la masse volumique a été traité dans les travaux de F. Collet [2]. Cependant à ce jour et à notre connaissance, peu ou pas d'études se sont intéressées à l'impact de la gâchée sur d'autres propriétés comme la contrainte de compression et le module. D'après les résultats du tableau 3-9, il est possible que la gâchée puisse impacter ces propriétés. L'analyse de ces résultats est développée dans les paragraphes suivants.

Type de gâchée	Contrainte de compression (MPa)				Module d'Young (MPa)			
	VM	ET	CV	Vk	VM	ET	CV	Vk
I. (11x22cm)	0,41	0,04	9,78	0,35	30,46	3,81	12,52	24,21
II. (11x22cm)	0,47	0,04	8,18	0,41	33,35	3,85	11,53	27,04
III. (11x22cm)	0,44	0,05	10,93	0,36	38,04	4,54	11,94	30,59
IV. (11x22cm)	0,48	0,04	8,16	0,42	44,07	7,46	16,93	31,84
I. (16x32cm)	0,32	0,01	4,15	0,29	39,06	3,42	8,76	33,45
II. (16x32cm)	0,32	0,02	5,07	0,29	30,97	2,28	7,35	27,24
III. (16x32cm)	0,39	0,00	1,17	0,39	32,77	2,95	9,02	27,93
IV. (16x32cm)	0,47	0,02	4,51	0,44	39,13	3,04	7,77	34,14

Tableau 3-9: Contrainte maximale de compression, module d'Young par gâchées (éprouvettes 11x22cm et 16x32cm)

3.2.2.1 Contrainte maximale de compression

Les résultats de la contrainte de compression montrent des valeurs plus élevées pour la gâchée IV et ce pour les deux tailles d'éprouvettes. La même tendance est observée dans le cas du module d'Young. D'une manière générale, les gâchées issues du chanvre C9 semblent donner des valeurs plus élevées (tableau 3-9). Cette observation sera analysée dans la section 3.2.3.2 consacrée à l'impact du type de chanvre.

Dans la mesure où les gâchées sont issues du même type de chanvre, elles devraient théoriquement donner les mêmes propriétés. Or, dans la pratique, nous observons dans certains cas des différences non négligeables. A titre d'exemple, les valeurs moyennes sont égales à 0,39 MPa et 0,47 MPa pour les gâchées III et IV pour les éprouvettes de taille 16x32cm. Pour éviter les sources de variabilités supplémentaires, si les moyens les permettent

il convient de limiter la fabrication en plusieurs gâchées. Sinon, il faut veiller à ce que celles-ci soient réalisées dans des conditions quasi-identiques.

3.2.2.2 Module d'Young

Les valeurs moyennes du module augmentent de 30,5 MPa à 44,1 MPa de la gâchée I à la gâchée IV (tableau 3-9). Même si cette tendance est observée sans pour autant pouvoir l'expliquer, il est clair que les gâchées issues du même type de chanvre ont des résultats comparables.

Par ailleurs, nous remarquons que le coefficient de variation de 16,9% est le plus élevé pour la gâchée IV dans le cas des petites éprouvettes. Comme cette gâchée est la dernière à être malaxée et mise dans les moules, il est possible que les conditions aient changé du début à la fin de la fabrication. Etant donné que le compactage est manuel, il est possible que la même énergie de compactage n'ait pas été maintenue tout au long de la fabrication. Néanmoins, puisque cette tendance n'est pas la même pour les grandes éprouvettes issues de la même gâchée, cette justification n'est pas forcément vraie, mais elle ne peut pas totalement être remise en cause pour des résultats des éprouvettes de grande taille, car comme nous l'avons vu leur nombre n'est pas suffisamment significatif.

Pour les deux tailles d'éprouvette, nous avons des résultats avec une qualité de contrôle moyenne par rapport aux valeurs limites données dans le tableau 3-3. En conséquence, la gâchée n'impacte pas profondément les résultats et nous arrivons à la même conclusion que dans le cas de la contrainte maximale de compression 3.2.2.1.

3.2.3 Impact du type de chènevotte

L'impact du granulat de chanvre sur les propriétés du béton de chanvre a fait l'objet d'un bon nombre d'études dans la littérature. Afin de différencier les types de chanvres utilisés, les auteurs se sont basés sur différents critères. Par exemple, Arnaud et Gourlay [32] se sont basés sur la géométrie (taille de particule), Stévilova et al. [92] ont considéré le même critère en association avec la provenance du chanvre, et Nguyen [19] a pris en compte la teneur en fibre du chanvre. Dans ces études, les auteurs n'arrivent pas aux mêmes conclusions. Ce manque d'accord nous a poussé à nous intéresser à l'impact du chanvre sur les propriétés du béton de chanvre. Dans cette partie, nous présentons des résultats préliminaires. Une étude approfondie à ce sujet est présentée au dernier chapitre de ce manuscrit.

3.2.3.1 Masse volumique

En comparant les résultats de masse volumique obtenus pour les deux types de chanvre, nous observons de légères différences, et ce pour les deux tailles d'éprouvette.

HEM PSHIV	Masse volumique				Contrainte de compression (MPa)				Module d'Young (MPa)			
	VM	ET	CV	Vk	VM	ET	CV	Vk	VM	ET	CV	Vk
C9 (11x22cm)	488,8	23,11	4,73	450,9	0,46	0,05	10,38	0,38	43,45	6,72	15,47	32,43
C8 (11x22cm)	451,6	19,17	4,25	420,1	0,44	0,05	10,79	0,37	31,86	3,14	9,87	26,71
C9 (16x32cm)	469,7	27,08	5,76	425,3	0,43	0,05	10,58	0,36	32,77	2,95	9,02	27,93
C8 (16x32cm)	422,1	2,51	0,60	417,9	0,32	0,01	4,00	0,30	30,97	2,28	7,35	27,24

Tableau 3-10: Résultats de masse volumique, contrainte maximale de compression, module d'Young par type de chanvre ; éprouvettes 11x22cm et 16x32cm

Dans le cas de petites et grandes tailles d'éprouvettes, on obtient 420,2 et 418 kg/m³ pour C8 et 451 et 425,4 kg/m³ pour C9, respectivement (tableau 3-10). Les valeurs élevées obtenues dans le cas du chanvre C9 sont cohérentes avec les résultats de la cinétique de séchage (figure 3-11).

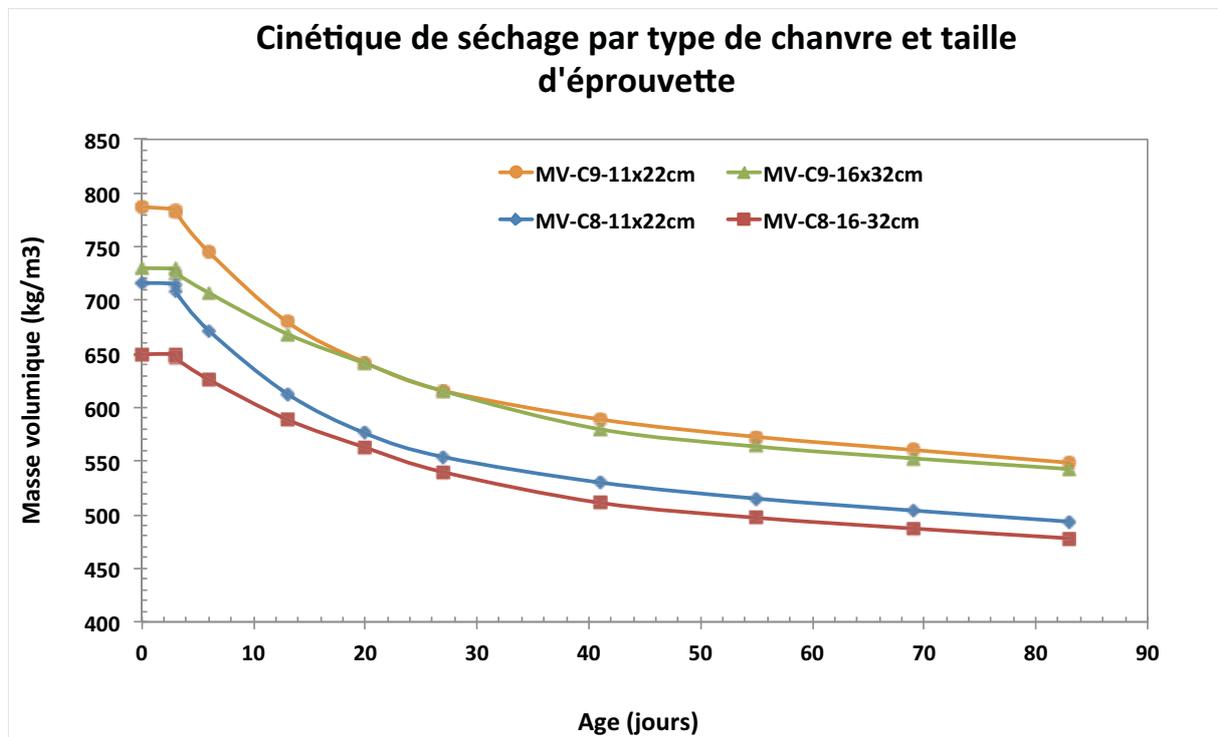


Figure 3-11: Cinétique de séchage par type de chanvre C8 et C9 et par taille d'éprouvette 11x22cm et 16x32cm

D'après les résultats de la figure 3-11, il est clair que la cinétique de séchage est affectée par la taille de l'éprouvette. Nous observons de faibles valeurs pour les grandes éprouvettes. Ceci paraît normal, puisque ces dernières ont une grande surface spécifique, et sont donc plus exposées au séchage. Nous constatons également une différence pour la masse volumique à l'état frais toujours dans les deux cas de taille d'éprouvette et de types de chanvre. Les petites éprouvettes ont une masse volumique plus élevée ; la cause peut être l'énergie de compactage. En effet, le même opérateur applique la même force mais sur des surfaces de contact différentes, ce qui résulte en une contrainte de compactage plus élevée pour les petites éprouvettes.

La masse volumique élevée pour les éprouvettes issues du chanvre C9 peut être expliquée par la teneur en eau initiale et la capacité d'absorption d'eau initiale. La teneur en eau initiale mesurée est de 10,2% et 11,1% pour C8 et C9, respectivement. La grande teneur en eau initiale peut contribuer à la réduction de la capacité d'absorption d'eau ; ceci est le cas pour le chanvre C9, de forte teneur en eau initiale et faible capacité d'absorption d'eau et vice-versa pour le chanvre C8 (tableau 2-3). Cette faible teneur en eau permet un compactage aisé qui induit une masse volumique élevée à l'état frais.

3.2.3.2 Contrainte maximale de compression

Dans les cas des chanvres C9 et C8, nous observons 0,38 MPa et 0,37 MPa pour les petites éprouvettes et 0,36 MPa et 0,30 MPa pour les grandes éprouvettes, respectivement. Dans le paragraphe suivant sur le module d'Young, la même tendance est observée. Les valeurs de la contrainte de compression sont plus élevées dans le cas du chanvre C8. Les deux propriétés

étant liées, il est possible que les mêmes causes produisent les mêmes tendances sur ces propriétés. En conséquence, nous faisons le choix d'analyser ces causes après avoir montré et analysé les résultats du module d'Young dans le paragraphe suivant.

3.2.3.3 Module d'Young

Comme annoncé préalablement, les valeurs du module d'Young sont plus élevées dans le cas du chanvre C9 et ce pour les deux tailles d'éprouvettes. La valeur la plus élevée du CV, égale à 15,5%, est probablement liée au fait que nous avons la gâchée IV pour ce type de chanvre. Or, nous avons montré précédemment la forte variabilité liée aux résultats de cette gâchée. D'autres raisons qui peuvent être valables pour les deux propriétés mécaniques sont :

- Puisque le chanvre C9 a une petite surface spécifique, 13187 mm^2 contre 13913 mm^2 pour le chanvre C8 (tableau 2-4), les particules de chanvre sont bien enrobées par le liant pendant le malaxage. Ce qui peut expliquer le bon comportement mécanique du béton issu du chanvre C9. Cette observation est similaire aux résultats obtenus par Arnaud et Gourlay [32], qui ont constaté au bout de quatre mois de meilleures performances pour les particules fines que longues.
- La capacité d'absorption d'eau du chanvre C9 est 146% contre 212% fait que C8 absorbe beaucoup d'eau de gâchage pour la prise et au durcissement du liant ; ce qui conduit à de faibles propriétés mécaniques. Pour éviter ce problème, il est possible de procéder à un prémouillage ou au traitement du chanvre avant le malaxage [35].

Dans cette partie de l'étude, nous arrivons à la conclusion que le chanvre impacte les propriétés du béton en donnant quelques pistes des causes possibles. Toutefois, notre étude ne permet pas jusqu'à présent de lever le doute lié aux désaccords des résultats de la littérature [19,32,92]. Afin d'éclairer cette question, une étude complète avec des analyses plus poussées sont proposées dans le chapitre 5 de ce manuscrit.

3.2.4 Impact de la taille d'éprouvette

Dans cette section, nous nous intéressons à l'effet de la taille d'éprouvette à partir des résultats des tableaux 3-7 et 3-8. Nous revenons sur les résultats présentés en premières lignes de ces mêmes tableaux. Il s'agit des résultats de l'ensemble de tous les laboratoires, pour les éprouvettes de petites et grandes tailles, respectivement.

3.2.4.1 Masse volumique

Comme nous pouvons constater, la masse volumique ne varie pas beaucoup, mais en comparant les valeurs caractéristiques obtenues pour les deux tailles d'éprouvettes, nous observons des différences significatives ($424,84 \text{ kg/m}^3$ et $394,18 \text{ kg/m}^3$ pour les petites et les grandes éprouvettes, respectivement). Contrairement aux autres propriétés (contrainte de compression, etc.), dans le cas de la masse volumique, nous n'avons pas de différences significatives sur les coefficients de variation. De plus, nous observons des valeurs moyennes maximales plus élevées dans le cas des petites éprouvettes. Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe 3.2.4.1, la masse volumique élevée est liée au fait que les petites éprouvettes ont une petite surface spécifique, et sont par conséquent moins exposées au séchage.

3.2.4.2 Contrainte maximale de compression

Les valeurs caractéristiques obtenues sont 0,37 MPa et 0,27 MPa pour les petites et grandes éprouvettes, respectivement. Il existe un facteur de 1,37 entre les deux valeurs. Dans la mesure où il n'y a pas de différences significatives pour les valeurs de contrainte minimale, maximale et moyenne. Il est alors évident que les différences constatées pour les valeurs caractéristiques proviennent des coefficients de variation. La question est maintenant de savoir si ces différences en CV sont liés à la taille de l'éprouvette ou pas.

3.2.4.3 Module d'Young

L'impact de la taille de l'éprouvette sur le module d'Young montre des valeurs comparables sauf dans le cas des valeurs maximales. Dans ce dernier cas, il existe un facteur de 1,32 entre les petites et grandes éprouvettes respectivement. On pourrait alors se poser la même question que dans le cas de la contrainte de compression qui consiste à savoir si ces différences proviennent réellement de la taille de l'éprouvette.

Dans la mesure où nous avons plusieurs paramètres qui se combinent indirectement et du fait que les éprouvettes de grandes tailles sont en nombre non significatif, il n'est pas évident de dire si la variabilité observée provienne de la taille de l'éprouvette ou pas.

Notre étude nous a permis de mettre en évidence l'effet de la taille de l'éprouvette sur la masse volumique du béton de chanvre. D'une part, des variabilités non négligeables ont été observées sur les valeurs caractéristiques de la contrainte de compression. D'autre part, nous avons observé des différences sur les valeurs maximales du module d'Young. Une question est jusqu'ici restée sans réponse : ces variabilités observées sont-elles dues à la taille des éprouvettes ou non ? Les difficultés associées à cette question sont liées à l'interaction de plusieurs paramètres et au nombre insuffisant d'éprouvettes de grande taille.

3.2.5 Corrélation entre les propriétés mécaniques

Une étude de corrélation entre les valeurs de la contrainte de compression maximale et celles du module d'Young montre que ces deux propriétés sont positivement corrélées. Les valeurs de la contrainte de compression varient de 0,3MPa à 0,52 MPa. Les valeurs du module varient de 25 à 55 MPa, avec une bonne partie concentrée entre 30 MPa et 40MPa. D'une façon générale, la contrainte de compression augmente proportionnellement au module.

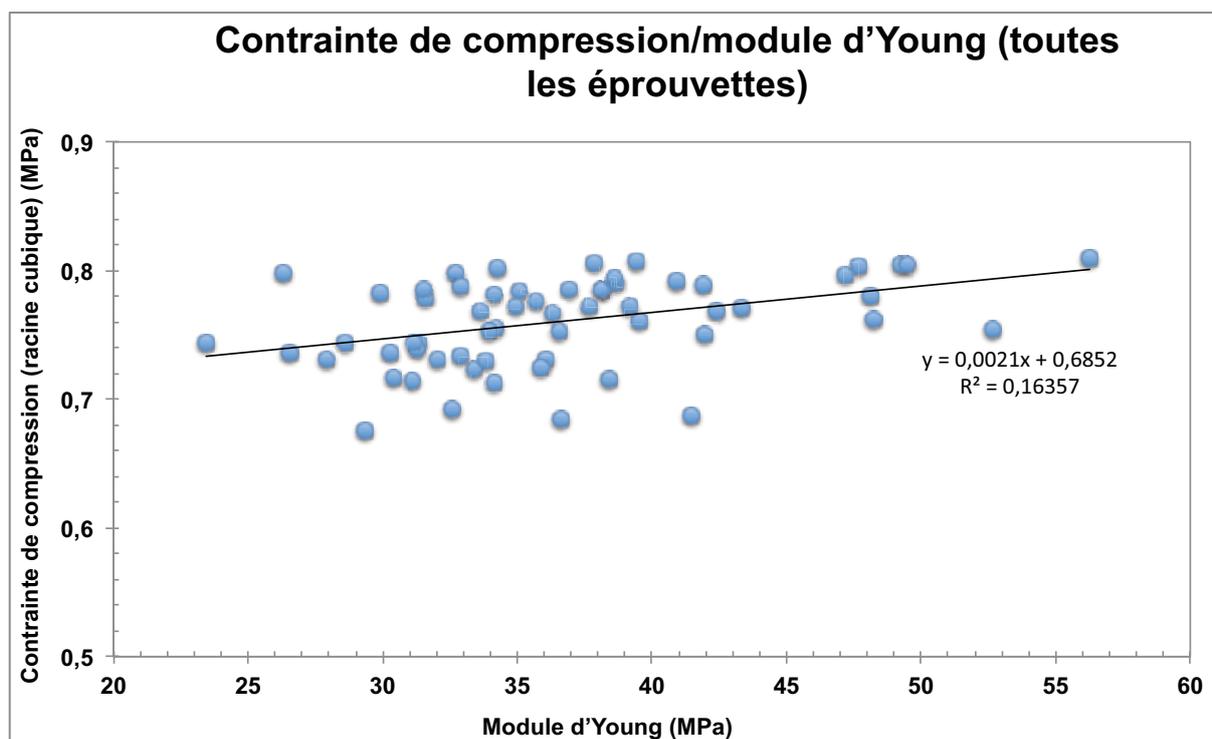


Figure 3-12: Etude de corrélation entre la contrainte maximale de compression et le module d'Young

La tendance observée sur la figure 3-12 montre dans quelle mesure les propriétés du béton de chanvre sont sensibles aux paramètres considérés. Comme nous l'avons vu dans la section 3.2.1.3, la dispersion observée peut être aussi due au fait que la contrainte maximale a été calculée au-delà de la phase linéaire sur la courbe. De plus, la méthode de calcul du module peut aussi influencer puisque là-aussi, le module est déterminé dans les cycles (au delà de la phase linéaire), cette méthode sera détaillée dans le chapitre 4. Cette étude de corrélation met en lumière la tendance proportionnellement croissante des deux propriétés. Les dispersions constatées sont associées à l'interférence des différents paramètres de l'étude (gâchée, taille d'éprouvette, etc.). L'analyse faite au chapitre 5 et qui prend en compte les données avec un seul paramètre (type de chanvre), permet de mieux comprendre la corrélation entre la contrainte de compression et le module d'Young.

3.2.6 Synthèse des résultats

Nous avons mis en évidence l'existence d'une variabilité plus ou moins considérable sur les propriétés du béton de chanvre. La difficulté principale pour une bonne compréhension des dispersions observées est associée à l'interaction des paramètres étudiés. L'analyse séparée (par gâchée, par taille d'éprouvette, etc.) ne permet pas de dissocier complètement les paramètres de l'étude. D'après nos données d'études, il est évident qu'en considérant un paramètre donné, d'autres paramètres peuvent influencer sur les résultats de manière indirecte. A titre d'exemple, si on considère la gâchée, le paramètre laboratoire peut influencer d'une façon ou d'autre sur les résultats obtenus dans la mesure où la même gâchée a été testée par différents laboratoires. Il est clair que la gestion de l'interaction des paramètres rend l'analyse très difficile et ne permet pas d'aboutir à des conclusions suffisamment claires.

D'après l'analyse bibliographique, nous avons montré le manque de repère sur la confiance avec laquelle nous devons considérer les résultats de la littérature. Par ailleurs, les valeurs caractéristiques de notre étude sont jusqu'ici données dans une analyse séparée des paramètres de l'étude. Ce qui laisse davantage d'ambiguïté vis-à-vis de la valeur à considérer

pour les propriétés étudiées. Il devient alors nécessaire de proposer une valeur caractéristique unique prenant en compte tous les paramètres (taille d'éprouvette, laboratoire d'essai, etc.) considérés. Dans ce contexte, une étude est menée dans la section suivante, avec pour objectif de proposer des valeurs caractéristiques pour les trois propriétés étudiées. Elle prend en compte toute les données à la fois et est basée sur la démarche détaillée à la fin de la section 3.1.5.2.

3.3 Lois de distribution

Au delà de la statistique descriptive réalisée dans la section 3.2, il est nécessaire de spécifier les lois de distribution statistique qui s'ajustent mieux aux données expérimentales. Pour cela, la première étape consiste en une analyse statistique de plusieurs lois de distribution afin de sélectionner les lois les plus appropriées. Pour chacune des gâchées, et pour chaque type de chanvre, les tests d'ajustement sont effectués. Alors que nous avons considéré dans nos tests plusieurs lois de distribution, il est courant d'utiliser trois types de distribution dans le domaine du génie civil [106] à savoir la loi normale, la loi log-normale et la loi de Weibull. Cette dernière est souvent utilisée en mécanique pour décrire statistiquement la variabilité de la durée de vie des matériaux [115]. Il est alors possible qu'elle ne convienne pas pour le béton de chanvre. Ainsi, il convient de souligner que dans le cadre de cette thèse, elle est donnée pour information. D'autres études sont nécessaires pour juger de son utilisation dans le cas du béton de chanvre.

Les tests d'ajustement sont faits séparément pour la masse volumique, la contrainte de compression et le module d'Young. Avant de réaliser ces tests, il est nécessaire de vérifier si la variabilité est liée à la dispersion de la population, ou à un mélange (groupage) d'échantillons avec des valeurs moyennes différentes. De ce fait, les tests d'appartenance à une population ont été effectués pour voir si les gâchées et types de chanvre proviennent d'une même population du point de vue statistique, les démarches pour faire ces tests ont été détaillées dans la section 3.1.5.

3.3.1 Masse volumique

Nous avons réalisé les tests statistiques d'appartenance à une population, en suivant la démarche expliquée dans 3.1.5. Les résultats du tableau 3-6 permettent de combiner seulement les gâchées I et II, ce qui conduit à 3 populations, à savoir : gâchées (I&II), gâchée III et gâchée IV. Contre toute attente, les résultats des tests statistiques montrent que les gâchées III et IV issues du chanvre C9 n'appartiennent pas à la même population. Afin de comprendre cette contradiction entre la réalité (deux gâchées fabriquées avec le même type de chanvre) et les tests statistiques, nous avons émis l'hypothèse que les résultats d'un quelconque laboratoire soient à l'origine des différences constatées. Pour détecter ce laboratoire, on peut utiliser le test ANOVA. Sauf que dans le cas de notre étude, le nombre d'éprouvettes dans chacun des laboratoires n'est pas suffisant pour un test statistiquement significatif. Par conséquent, nous avons conduit des tests de comparaison de moyennes entre les deux gâchées (III et IV) en éliminant cette fois-ci les résultats de chacun des laboratoires un à un. En d'autres termes, nous avons éliminé les résultats d'un laboratoire et nous avons fait le test comme si ce laboratoire n'avait pas contribué à l'étude, et nous avons réitéré le test pour tous les laboratoires. Les tests étaient toujours négatifs sauf dans un seul cas, celui du laboratoire G. En effet, en éliminant les résultats du laboratoire G pour la gâchée III (tableau 3-2), il vient que les deux gâchées III et IV sont issues de la même population. Il convient de mentionner que dans cette configuration, le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 à tort est égal à 9,05%. L'analyse laisse penser que ce résultat est lié au fait que le labo G est

le seul à avoir testé plusieurs éprouvettes, 6 au total alors que les autres labos ont testé 2 ou 3 au maximum (tableau 3-2). Sur cette base, nous avons recommencé le test en réduisant le nombre d'éprouvettes à 5, 4, 3 et 2 pour le labo G toutefois sans succès. En conclusion, nous constatons que statistiquement, les deux gâchées n'appartiennent pas à la même population.

Puisque le nombre d'éprouvettes est faible pour les trois populations issues des tests d'appartenance, il est statistiquement plus intéressant de les combiner. Ainsi, la caractérisation du coefficient de variation peut être étudiée en ramenant les résultats expérimentaux sur une valeur moyenne de référence correspondant à la moyenne de la gâchée I. Pour cela, la démarche détaillée en section 3.1.5.2 est appliquée pour permettre une représentation convenable de la dispersion de la population.

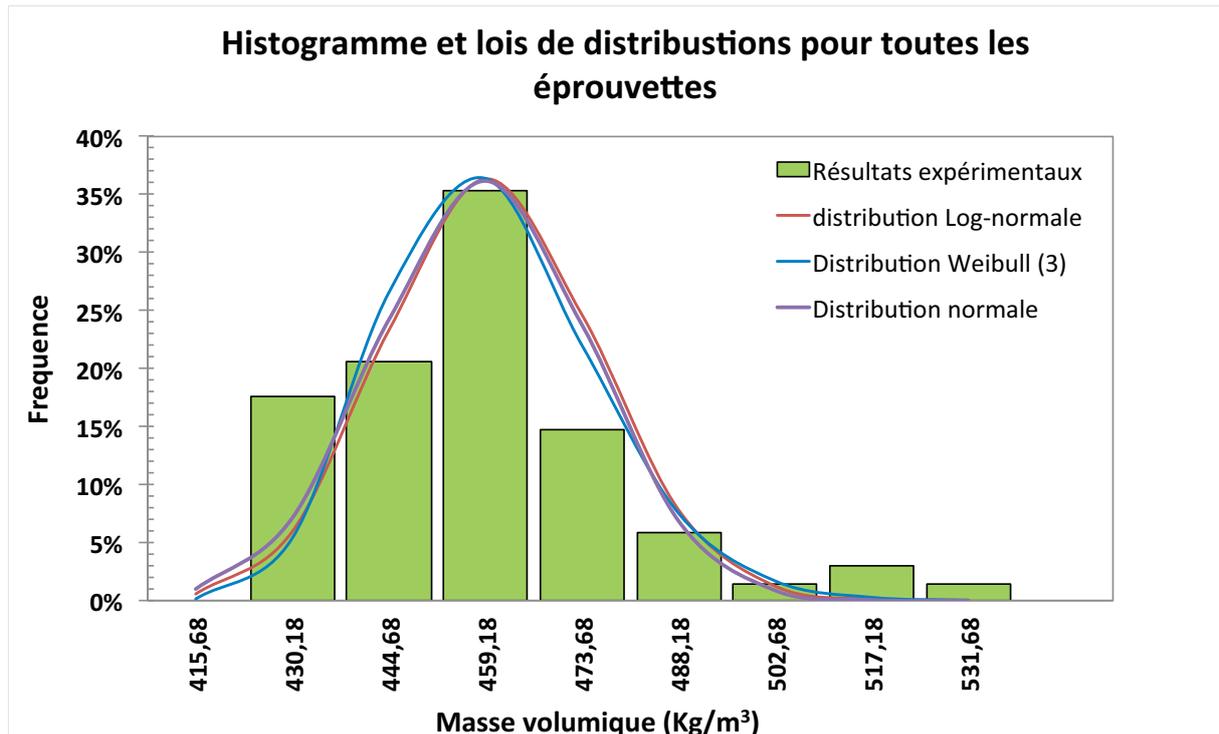


Figure 3-13: Résultats expérimentaux et les lois de distributions pour la masse volumique

Distributions	Normale		Log-normale		Weibull (3)		
	μ	σ	μ	Σ	κ	λ	η
Paramètres	450,992	22,348	6,11	0,049	1,917	39,806	415,679
Moments statistiques ($\mu ; \sigma$)	(450,992; 22,348)		(450,995; 21,99)		(451,207; 22,236)		
Risque de rejeter H0 (%)	8		12,21		24,65		

Tableau 3-11: Paramètres, moments statistiques et risque de rejet de H0, des lois de distributions pour la masse volumique

La population obtenue est alors soumise au test d'ajustement à une loi de distribution. Les résultats montrent que la population respecte les trois lois, normale, log-normale et Weibull, respectivement. Par ailleurs, il convient de noter que d'après le test, la loi logistique et GEV s'ajustent aussi bien à la population. Pour les raisons évoqués dans la section 3.3, nous

considérons seulement les lois courantes données sur la figure 3-13 et leurs paramètres synthétisés dans le tableau 3-11.

3.3.2 Contrainte maximale de compression

Le test d'appartenance à une population a été également conduit sur les résultats de la contrainte maximale de compression, dans l'objectif de savoir si nous pouvons combiner les gâchées ou pas. Tous les résultats du test sont négatifs pour les deux tailles d'éprouvettes et types de chanvre respectivement, à l'exception des gâchées I et II dans le cas des grandes éprouvettes (tableau 3-6). D'après ces mêmes résultats, nous avons sept populations, ce qui est inapproprié pour l'étude statistique.

Afin d'analyser la distribution des résultats expérimentaux et de proposer des lois de distribution qui s'ajustent à ces derniers, nous avons également appliqué la procédure décrite dans la section 3.1.5.2. La population issue de cette procédure a été ainsi soumise à un test d'ajustement de loi de distribution pour la loi normale, log-normale et Weibull respectivement, (figures 3-14 et tableau 3-12).

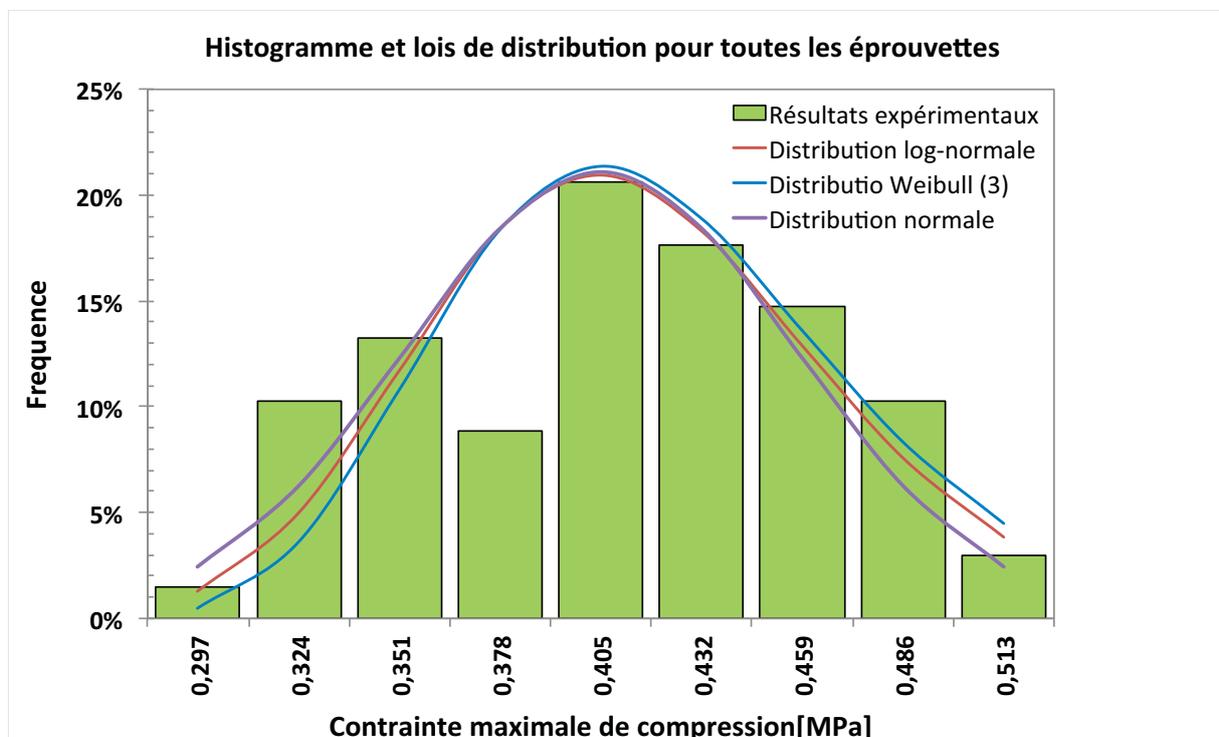


Figure 3-14: Résultats expérimentaux et les lois de distributions pour la contrainte maximale de compression

Distributions	Normale		Log-normale		Weibull (3)		
Paramètres	μ	σ	μ	Σ	κ	λ	η
	0,397	0,052	-0,93	0,135	2,3	0,115	0,295
Moments statistiques (μ ; σ)	(0,397; 0,055)		(0,397; 0,055)		(0,397; 0,045)		
Risque de rejeter H0 (%)	58,05		37,31		50,38		

Tableau 3-12: Paramètres, moments statistiques et risque de rejet de H0, des lois de distributions pour la contrainte maximale de compression

3.3.3 Module d'Young

Les résultats obtenus ont été soumis au test t de Student pour voir si toutes les sous populations appartiennent bien à la même population (tableau 3-6). Comme le test est négatif notamment dans le cas des gâchées III et IV pour les petites éprouvettes, nous avons utilisé l'approche décrite dans la section 3.1.5.2 afin de regrouper les échantillons pour obtenir une population de taille significative.

Par la suite, nous avons conduit le test d'ajustement à des lois de distributions dont les résultats sont donnés sur la figure 3-15 et dans le tableau 3-13. L'analyse des résultats expérimentaux montre une existence possible de deux sous populations. La première à gauche avec une moyenne de 27,57MPa et la deuxième à droite avec une moyenne de 35,75MPa figure 3-15. Il convient de remarquer que la moyenne pour toute la population est de 31,75MPa. Cette tendance observée est probablement liée au fait que nous avons deux tailles d'éprouvette. La même tendance a par ailleurs été constatée dans la section 3.2.4.3 là où une différence significative a été observée pour les valeurs maximales avec un facteur d'environ 1,32.

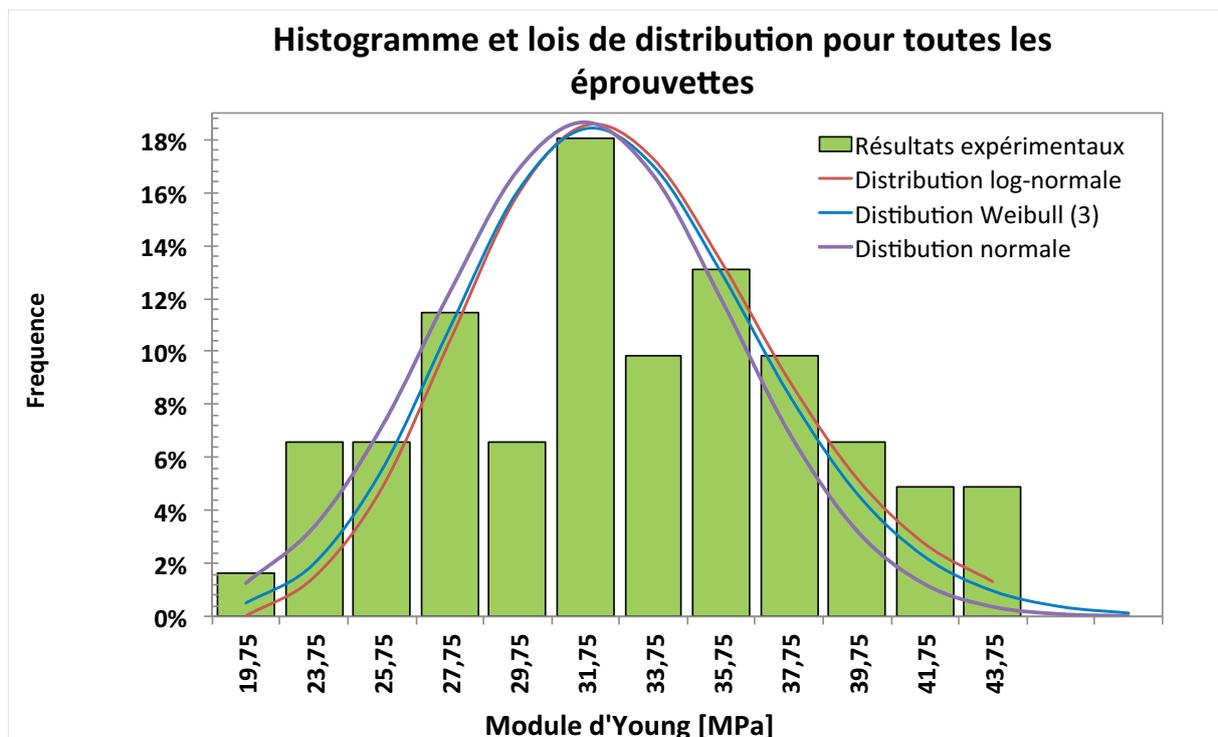


Figure 3-15: Résultats expérimentaux et les lois de distributions pour le module d'Young

Distributions	Normale		Log-normale		Weibull (3)		
paramètres	μ	σ	μ	Σ	κ	λ	η
	31,874	5,669	3,445	0,185	2,76	15,868	17,751
Moments statistiques (μ ; σ)	(31,874; 5,669)		(31,898; 5,943)		(31,865; 5,694)		
Risque de rejeter H0 (%)	92,79		86,33		95,39		

Tableau 3-13: Paramètres moments statistiques et risque de rejet de H0, des lois de distributions pour le module d'Young

Ayant déjà proposé les lois de distribution pour chacune des propriétés étudiées, nous pouvons alors calculer les valeurs caractéristiques. Pour cela, nous utilisons l'équation 3-3 avec un niveau de probabilité égale à 5 %. Dans cette configuration, avec la loi normale, nous proposons les valeurs caractéristiques suivantes: 415 kg/m³ ; 0,30 MPa et 22,5 MPa pour la masse volumique, la contrainte maximale de compression et le module d'Young, respectivement (tableau 3-14).

Propriétés	Valeurs caractéristiques
Masse volumique (kg/m ³)	415
Contrainte de compression (MPa)	0,30
Module d'Young (MPa)	22,5

Tableau 3-14: Valeurs caractéristiques des différentes propriétés du béton de chanvre

3.4 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, une étude statistique a été réalisée sur les trois propriétés du béton de chanvre : masse volumique, contrainte maximale de compression et module d'Young. Les paramètres considérés sont : l'effet du laboratoire d'essai, le type de gâchée, le type du chanvre et la taille de l'éprouvette. Les résultats obtenus par différents laboratoires montrent une bonne répétabilité pour la masse volumique et la contrainte maximale de compression. Cependant, dans le cas du module d'Young, nous avons observé des variabilités considérables. D'après les résultats, nous avons vu que la gâchée peut entraîner quelques variabilités. En conséquence, la fabrication du béton en plusieurs gâchées doit être faite soigneusement. L'impact du type de chanvre a été aussi mis en évidence. D'après cette étude, le chanvre avec des particules de petite taille donne du béton de bonnes performances mécaniques. De plus, il est possible que la taille de l'éprouvette influe sur les résultats. Cependant, une étude portant sur un nombre significatif d'éprouvettes de tailles différentes est nécessaire. Elle permettra d'apporter une meilleure compréhension de l'effet de la taille de l'éprouvette. Par ailleurs, l'impact de la teneur en eau initiale sur la masse volumique a été souligné. En effet, plus elle est élevée, moins sera la masse volumique du béton de chanvre.

D'après les analyses statistiques, nous avons obtenu des résultats cohérents des valeurs moyennes et écarts-types. Les tests d'ajustement ont montré que les valeurs expérimentales s'ajustent bien à trois lois de distribution à savoir les lois: normale, log-normale et Weibull.

Dans le contexte des objectifs de notre thèse, le choix a été fait de mener une étude approfondie en séparant les paramètres susceptibles d'influer sur les propriétés du béton de chanvre. Nous nous intéressons alors à l'impact de la nature du chanvre sur les propriétés du béton. Pour ce faire, dans les mêmes conditions de confection d'éprouvettes (formulation, fabrication, etc.), nous faisons varier la nature du chanvre et nous analysons son impact sur les propriétés du béton ; c'est l'objectif du chapitre 5. Mais avant cela, il est important d'étudier davantage la variabilité observée sur les résultats du module, étant donné que sa méthode de calcul introduit des variabilités supplémentaires, ce que nous étudierons dans le chapitre suivant.

Chapitre 4: Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

Introduction

Parmi les paramètres susceptibles d'influer sur la variabilité du module d'Young pour le matériau béton de chanvre, on trouve entre autre sa méthode de calcul. A ce jour, la méthode de calcul n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie pour le béton de chanvre. En conséquence, le libre choix laissé par l'absence de la réglementation, fait que différentes méthodes et techniques sont utilisées dans la littérature pour déterminer ce module (chapitre 1). D'après la dispersion observée dans le chapitre 3 pour les résultats du module d'Young, il paraît important d'examiner l'impact de la méthode utilisée sur les résultats. L'étude bibliographique a mis en lumière les différentes méthodes utilisées pour déterminer le module. Néanmoins, la bibliographie ne permet pas d'apprécier ni l'impact de la méthode de calcul sur les résultats, ni la précision d'une méthode par rapport aux autres. De ce fait, dans notre étude, nous nous intéressons à l'analyse de l'impact des différentes méthodes disponibles dans la littérature.

Nous distinguons principalement trois types de modules, le module apparent, le module élastique et le module d'écrouissage. Ils sont calculés en utilisant quatre méthodes : flottante, tangente, cyclique et écrouissage ainsi que cinq stratégies ; pour rappel, les détails de calcul pour ces différentes méthodes et stratégies ont été vus au chapitre 1 en §1.5.2.3. Par conséquence, l'analyse d'une courbe contrainte-déformation avec 3 cycles de chargement-déchargement, donne 38 valeurs de module (tableau 4-3).

Au-delà de cette étude comparative des différentes méthodes, un modèle permettant de décrire la loi de comportement mécanique du béton de chanvre est proposé. Grâce à ce modèle, il est possible de déterminer la courbe enveloppe correspondant à la courbe expérimentale issue du chargement monotone. Il permet également de reproduire la courbe expérimentale issue d'un chargement cyclique.

4.1 Contexte et paramètres de l'étude

Dans cette étude, les essais de compression ont été réalisés sur les éprouvettes 11x22 cm. Elles ont été fabriquées en utilisant le même type de chanvre et le même type de liant. La chènevotte utilisée est C11, pour rappel, elle a été caractérisée au chapitre 2 en (cf. § 2.2) et ses caractéristiques sont synthétisées dans le tableau 4-1. Le liant utilisé est un liant hydraulique, ses caractéristiques sont données en annexe E.

Nous avons initialement envisagé une étude de trois différentes formulations. En effet, comme nous les verrons plus tard en §4.3.1, la formulation du béton de chanvre peut changer son caractère de déformabilité, soit en un comportement ductile pour le faible dosage en liant, soit en un comportement fragile pour le fort dosage en liant [33], (figure 4-1).

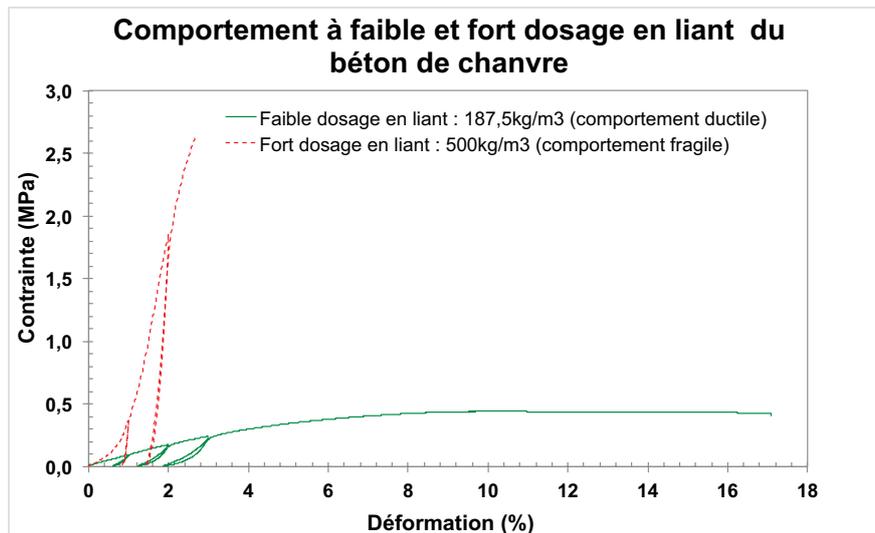


Figure 4-1: comportement du béton de chanvre selon la teneur en liant

De là, il apparaît que le module du béton de chanvre peut être différent d'une formulation à l'autre. Nous avons alors envisagé d'étudier l'impact de la méthode de calcul du module en considérant les formulations : A, B et C (tableau 4-2).

Compte tenu du caractère fragile pour la formulation C à fort dosage en liant, les éprouvettes issues de cette dernière, rompent avant la fin de tous les cycles de chargement (figure 4-6). En conséquence, il devient impossible d'exploiter la courbe contrainte-déformation parce que certaines méthodes de calcul du module consistent à l'exploitation de tous les cycles. Pour ces raisons, il a été possible d'exploiter entièrement les deux formulations A et B de moyen et faible dosage en liant, respectivement. La formulation C ne peut être exploitée que partiellement. Pour cette raison, le choix est fait d'analyser les deux formulations A et B seulement.

Sur la base de ces deux formulations et en considérant 5 éprouvettes par formulation, testées à 60, 90 et 180 jours, nous constatons que la méthode flottante donne les valeurs les plus élevées. Les valeurs moyennes et faibles sont obtenues dans le cas des méthodes tangente et cyclique, respectivement. Par ailleurs, la méthode d'écroutissage donne des valeurs comparables à celles du module apparent obtenues par les méthodes flottante et tangente. Les stratégies 2, 4 et 5 donnent les valeurs moyennes du même ordre de grandeur, tandis que la stratégie 3 conduit à des valeurs faibles. La stratégie 1 est un cas à part avec des valeurs relativement élevées.

4.1.1 Caractéristiques de la chènevotte utilisée

La chènevotte utilisée est issue du chanvre produit en Auvergne (chanvre Lezoux) noté C11 ; ce même chanvre a été étudié lors du chapitre 2. Pour rappel, ses résultats de caractérisation sont synthétisés dans le tableau 4-1.

Masse volumique en vrac	capacité d'absorption d'eau		Granulométrie			
	Initiale (%)	Finale (%)	Masse d'une particule (mg)	Longueur d'une particule (mm)	Largeur d'une particule (mm)	Surface d'une particule (mm ²)
95,4	165,85	339,96	0,23	1,46	0,34	1,72

Tableau 4-1: Caractéristiques du chanvre utilisé, C11.

4.1.2 Préparation d'éprouvettes pour les essais de compression

Le matériau béton de chanvre utilisé en construction a différentes applications comme par exemple : le remplissage de structures en bois (mur), l'isolation au niveau du sol et de toiture et les enduit de façades. D'après les règles professionnelles actuellement en vigueur [70], à chaque type d'application correspond un certain nombre de critères. Parmi ces critères, on peut citer : la résistance à la compression et le module. Pour répondre à ces exigences, il est nécessaire d'adapter la formulation à chaque type d'application.

Dans le cadre de notre étude, les formulations choisies sont synthétisées dans le tableau 4-2. La formulation A avec 250 kg de liant par m³ de chanvre, la formulation B avec 187,5 kg/m³ ainsi que la formulation C avec 500 kg/m³. Leurs applications sont le sol et/ou mur et enduit, respectivement.

Formulations	Chanvre (kg)	Liant commercial (kg)	Eau (l)	Ratio eau/liant	Ratio Chanvre/liant
A	9,5	25	31	1,24	0,38
B	9,5	18,75	26	1,387	0,507
C	9,5	50	50	1	0,19

Tableau 4-2: Formulations testées pour les applications sol, mur et enduit par gâchée de 100l

Les protocoles pour la préparation du mortier, la confection des éprouvettes ainsi que l'essai de compression, sont ceux utilisés au chapitre 3 (cf. §3.1).

4.2 Méthodes et stratégies de calcul du module

Les méthodes utilisées sont celles discutées précédemment dans la partie qui traite les modules au chapitre 1 (cf. § 1.5.2) et sont synthétisées dans le tableau 4-3.

	Tangente	Flottante	Cyclique	Ecrouissage	Stratégie 1	Stratégie 2	Stratégie 3	Stratégie 4	Stratégie 5
Phase 1	1	1		1	1	1	1	1	1
Phase 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Phase 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Phase 4	1	1	1						
Moyenne phases 2 ; 3 et 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Totale par méthode	5	5	4	4	4	4	4	4	4
Total globale	38 valeurs								

Tableau 4-3: Synthèses des valeurs des modules calculées avec différentes types de méthode

D'après les méthodes tangente et flottante, les valeurs de module calculées en phase 1 correspondent au module apparent tandis que celles calculées sur les autres phases sont des modules élastiques. La moyenne faite sur les phases 2, 3 et 4 représente également le module élastique. La méthode d'écrouissage permet de calculer le module dit d'écrouissage et les 5 stratégies permettent par ailleurs de calculer le module élastique. Ainsi pour ces stratégies, dans chaque cas, il est fait une moyenne pour les valeurs calculées en phases 1, 2 et 3. Il convient de rappeler que dans le cas du module cyclique, le calcul est fait sur les cycles (déchargement-chargement), figure 4-4.

Les différentes méthodes et stratégies ont été déjà expliquées et détaillées lors de l'étude bibliographique au chapitre 1. En guise d'illustration, nous montrons les différents cas où le calcul est fait sur la courbe en se servant de l'éprouvette type « A-11-1 ». Ainsi en 4.2.1 nous identifions des zones de la courbe pour lesquelles les méthodes flottante, tangente et cyclique sont utilisées. Par ailleurs, en 4.2.2 nous identifions également les zones de la courbe pour lesquelles la méthode d'écrouissage ainsi que les 5 stratégies sont utilisées.

4.2.1 Méthode flottante, tangente et cyclique

Dans la méthode flottante détaillée en [76,116], on commence par identifier les phases de chargement. D'après le protocole d'essai de compression ces phases s'arrêtent à 1%, 2% et 3% de déformation pour les trois premières phases respectivement. D'après l'illustration de la figure 4-2 ces niveaux de déformation correspondent à 0,24 MPa, 0,52 MPa et 0,68 MPa de contrainte de compression, respectivement. Dans la mesure où le protocole de compression préconise un chargement jusqu'à 20% de déformation, la phase 4 peut s'arrêter au niveau de la contrainte maximale ou n'importe où à condition de couvrir le tronçon correspondant à la pente maximale.

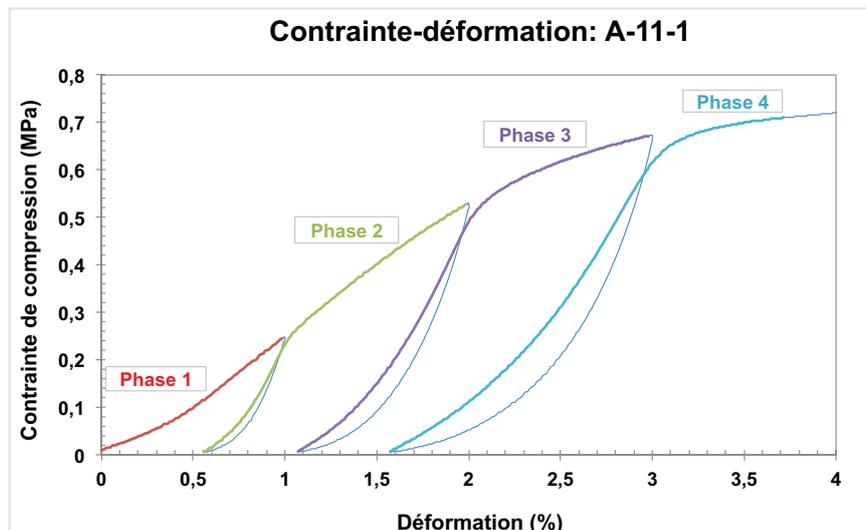


Figure 4-2: Identification de phases de chargement pour la méthodes flottant

Dans la méthode tangente on identifie la zone de la courbe pour laquelle la pente est maximale, elle correspond à la zone au voisinage du point d'inflexion en chacune des phases de chargement. A noter que, suite à l'allure de la première phase de chargement, le calcul est fait en considérant la forte pente qui souvent se trouve à la fin de cette phase de chargement (figure 4-3).

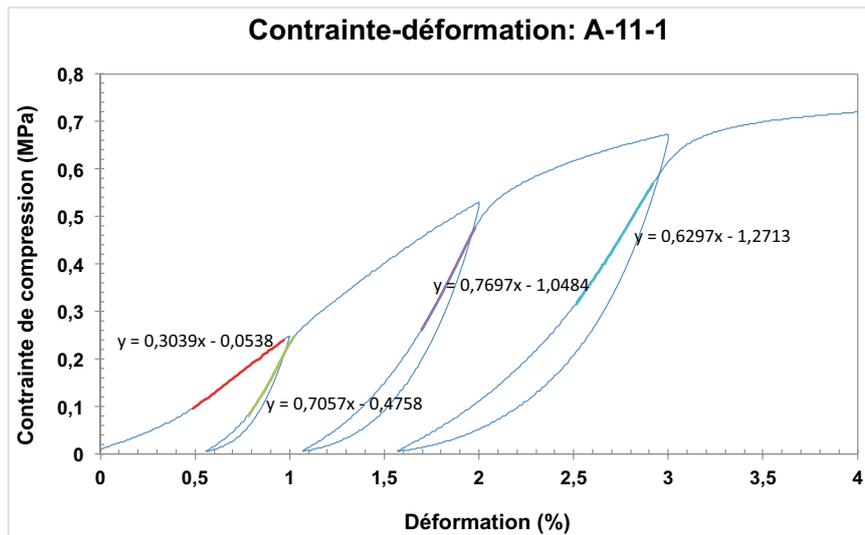


Figure 4-3: Identification de zone de calcul, phases de chargement pour la méthode tangente

L'identification de cycles dans le cas de la méthode cyclique se fait en considérant la phase de déchargement puis rechargement. Le début du cycle sur lequel est calculé le module correspond au début de déchargement, sa fin correspond au point dans la phase de rechargement qui se trouve au même niveau de contrainte que le point du début du cycle. L'illustration de la figure 4-4 montre les niveaux de contrainte de 0,24 MPa, 0,52 MPa et 0,68 MPa pour le cycle 1, 2 et 3, respectivement.

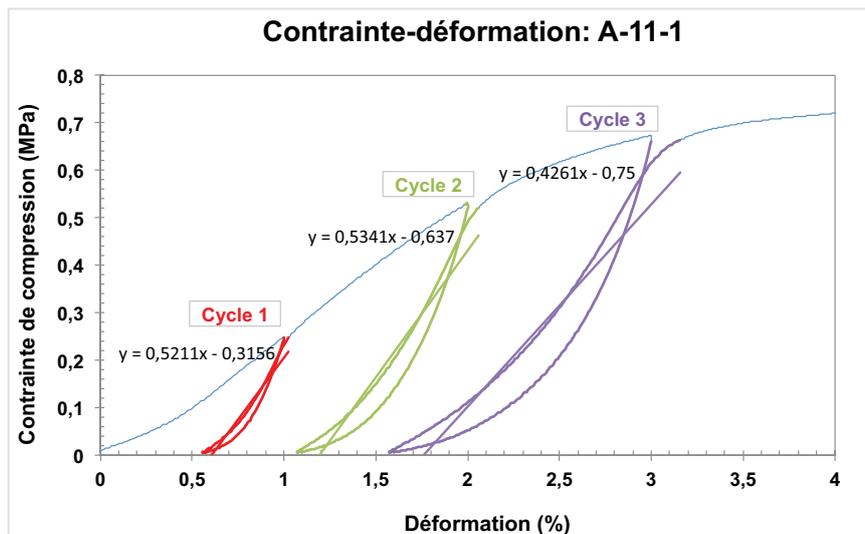


Figure 4-4: Identification de zone de calcul, cycles pour la méthode cyclique

4.2.2 Ecroissance et stratégies

Dans cette partie, nous détaillons et illustrons la méthode d'écroissance et différentes stratégies [117]. Le module d'écroissance est un module tangent qui correspond à la pente dans la zone de charge de la courbe contrainte-déformation dans chacun des cycles (figure 4-5 a).

La stratégie 1 donne un module tangent qui correspond à la pente dans la zone de décharge de la courbe contrainte-déformation (figure 4-5 b). La valeur du module prend en compte seulement les déformations élastiques pendant cette procédure et pas les déformations liées au réarrangement des particules de l'échantillon.

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

La stratégie 2 donne un module sécant qui correspond à la pente de la droite entre le point initial de la phase de déchargement et le point initial de la phase de recharge suivante (figure 4-5 c).

La stratégie 3 donne un module tangent initial dans la zone de recharge élastique de la courbe contrainte-déformation (figure 4-5 d). Il est calculé de la même façon que la stratégie 1.

La stratégie 4 donne un module sécant correspondant à la pente de la droite qui lie le point initial de la phase de recharge avec le point qui a la même valeur de contrainte que le début de la phase de décharge mais dans la phase de recharge (figure 4-5 e).

La stratégie 5 représente un module de type cyclique, qui correspond globalement au module d'élasticité entre la zone de déchargement et de recharge (figure 4-5 f). Sa valeur correspond à la pente de la droite qui lie le premier point de recharge et le point correspondant à l'intersection entre les courbes de déchargement et de recharge.

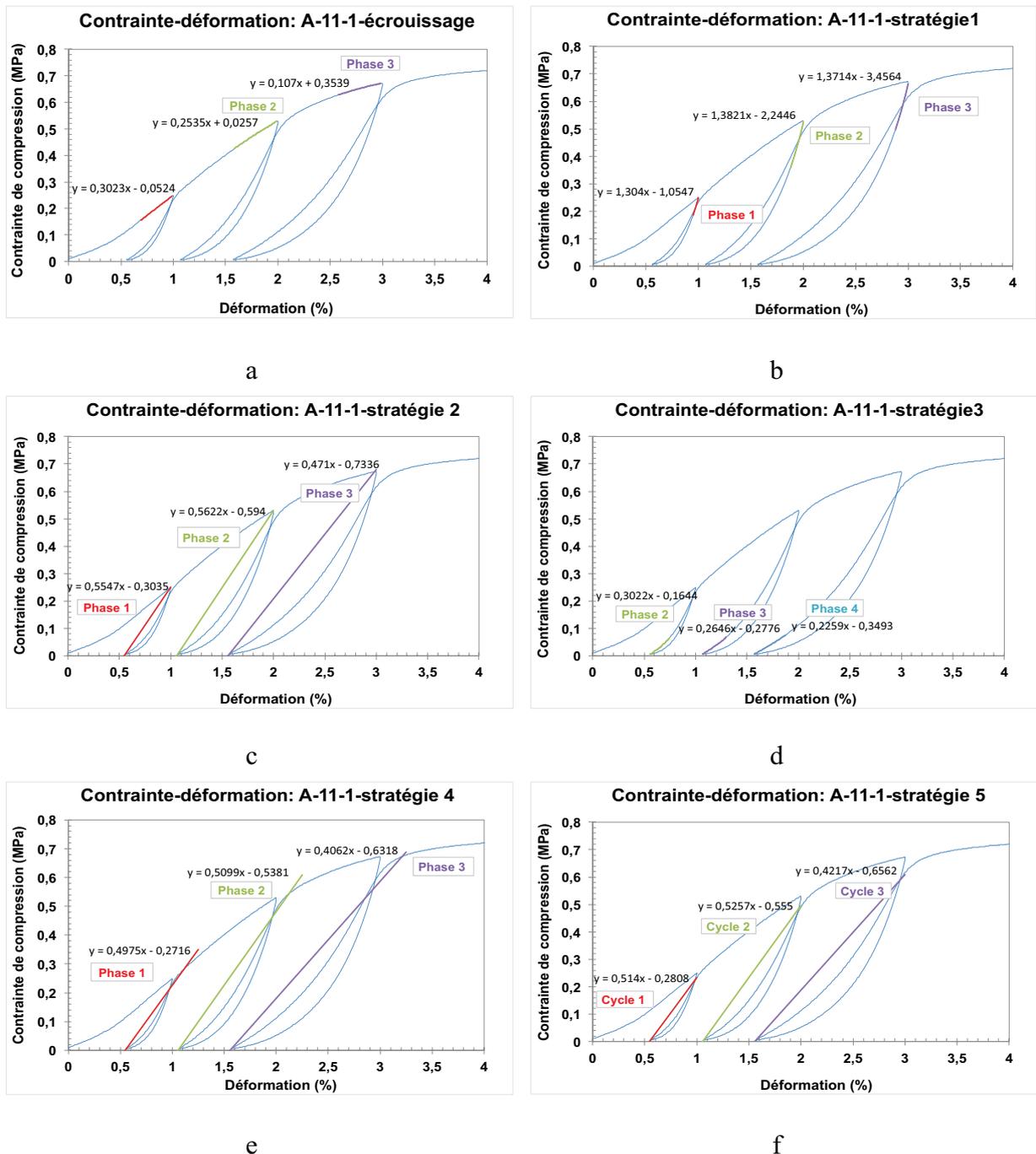


Figure 4-5: Identification des zones de calcul, pour la méthode d'écroissage et 5 stratégies

4.3 Réponse mécanique du béton de chanvre

4.3.1 Selon la formulation

Trois comportements sont observés, selon le niveau de déformation : faible (<6%), moyenne (>6% et < 14%) et grande (>14% et < 20%). Le niveau de déformabilité est gouverné par la teneur en liant. En effet, plus la teneur en liant augmente, plus le niveau de déformabilité diminue et plus la valeur de la contrainte limite de compression augmente.

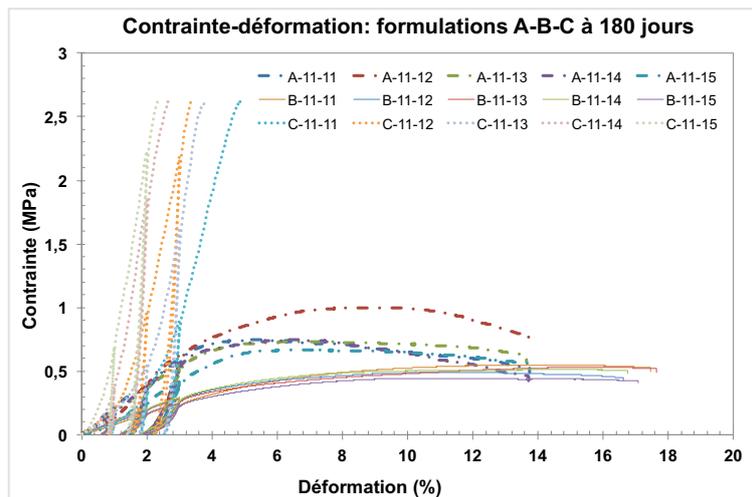


Figure 4-6: Courbes contrainte-déformation pour les formulations A, B et C à 180 jours

Une étude antérieure [33] a permis de mettre en évidence l'impact de la teneur en liant sur la déformabilité du béton de chanvre. Pour une concentration volumique en liant de l'ordre de 10 à 40%, le niveau de déformation varie de 15% à 4%. Ce niveau diminue considérablement jusqu'à atteindre 1,2% pour le liant pur. C'est pourquoi les éprouvettes issues de la formulation C, fortement dosée en liant (500 kg/m^3), rompent à 2% et 6% de déformation.

Par ailleurs, la dispersion des résultats au sein d'une formulation varie selon la teneur en liant. Plus la teneur en liant est faible, moins les résultats sont dispersés. A titre d'exemple, nous observons pour la contrainte maximale, un écart-type de 0,13 MPa et 0,04 MPa pour les formulations A et B, respectivement. D'après Cérezo [33] et Nguyen [19], plus la teneur en liant augmente, plus le comportement mécanique se rapproche de celui de la matrice liant, et vice-versa. Autrement dit, pour une faible teneur en liant, le comportement est similaire à celui des granulats de chanvre en compression. Pour les faibles dosages, nos résultats sont en accord avec les travaux de Gourlay [77] qui a observé une faible dispersion pour les essais de compression réalisés sur les granulats de chanvre seuls (figure 4-7). Pour les forts dosages en liant, nos résultats sont en accord avec ceux du même auteur pour lesquels la forte dispersion a été observée sur le liant pur. Dans ce dernier cas, les essais réalisés sur trois éprouvettes pour différents types de liant ont montré un écart-type de l'ordre de 3,7% à 10,2% de la valeur moyenne obtenue par type de liant.

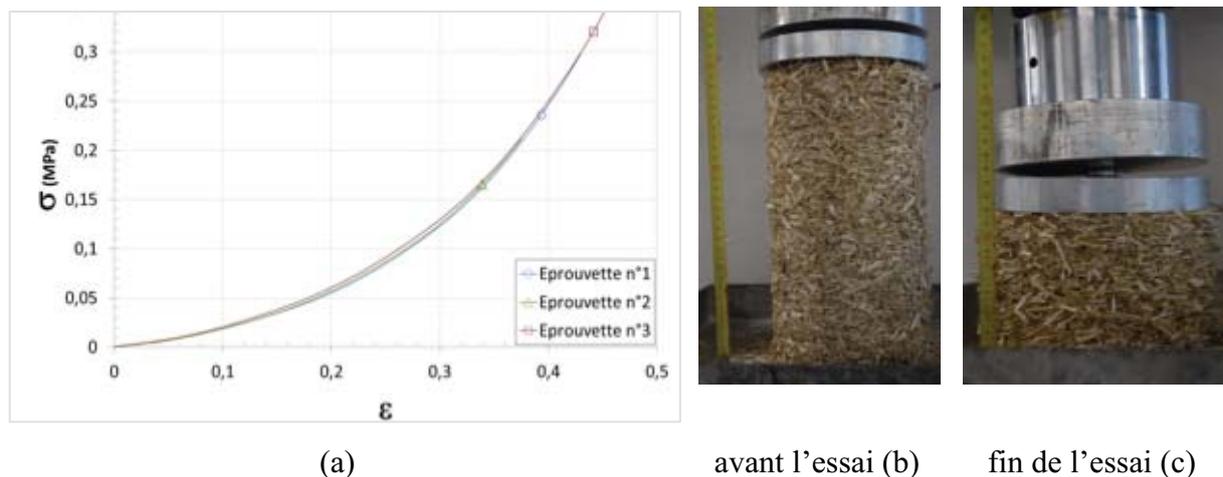


Figure 4-7: Répétabilité de l'essai de compression sur la chènevotte et la compressibilité de l'éprouvette [77].

Il convient de noter que les valeurs de la formulation C ne permettent pas de mettre en évidence cette constatation observée pour les formulations A et B (tableau 4-4). Par ailleurs, cette tendance reste la même dans le temps avec les valeurs moyennes qui ne varient presque pas (figure 4-8), raison pour laquelle nous avons fait le choix de ne présenter que les résultats détaillés à 180 jours. Le caractère fragile de la formulation C fait que les éprouvettes rompent en même temps avant le terme de l'essai. En effet, la rupture se produit autour d'une même valeur de la contrainte, égale à 2,63 MPa. Néanmoins, l'évolution ou le chemin suivi par les courbes de la figure 4-6 ainsi que les valeurs du niveau de déformation au moment de la rupture témoignent de la dispersion observée pour cette formulation à fort dosage en liant.

Formulation	N°	σ_{max} (MPa)	Déformation à σ_{max} (%)	σ à 5% de déformation (MPa)
A	A-11-11	0,75	5,20	0,49
	A-11-12	1,00	9,49	0,73
	A-11-13	0,73	6,74	0,57
	A-11-14	0,75	6,38	0,42
	A-11-15	0,67	6,49	0,52
Moyenne		0,78	6,86	0,55
Ecart-type		0,13	1,58	0,11
B	B-11-11	0,55	14,00	0,50
	B-11-12	0,49	10,98	0,43
	B-11-13	0,53	15,32	0,53
	B-11-14	0,51	14,52	0,48
	B-11-15	0,44	10,06	0,43
Moyenne		0,50	12,98	0,47
Ecart-type		0,04	2,31	0,04
C	C-11-11	2,63	4,86	2,61
	C-11-12	2,63	3,34	2,61
	C-11-13	2,63	3,82	2,62
	C-11-14	2,63	2,67	2,62
	C-11-15	2,63	2,33	2,63
Moyenne		2,63	3,41	2,62
Ecart-type		0,00	1,00	0,01

Tableau 4-4: Contraintes et déformations pour les formulations A, B et C à 180 jours

Bien que les valeurs des contraintes et les niveaux de déformation soient différents pour les trois formulations ; les analyses faites sur les résultats montrent des similitudes pour les valeurs des modules comme nous les verrons plus tard. En effet, pour les deux formulations A et B, les valeurs de module calculées selon les différentes méthodes varient en suivant la même tendance d'une formulation à l'autre. Pour une méthode donnée, plus la teneur en liant est élevée plus la valeur du module obtenue est grande. Cependant, pour une formulation donnée, les valeurs de module changent d'une méthode à l'autre. Afin de mettre en évidence l'impact de la méthode de calcul, nous allons considérer et présenter essentiellement les résultats de la formulation A. Par ailleurs, nous présentons également en annexe A les résultats des modules obtenus par les différentes méthodes à 60 ; 90 et 180 jours pour la formulation B.

4.3.2 Selon l'âge du béton de chanvre

Les dispersions constatées pour les résultats à 180 jours (tableau 4-4) sont similaires à celles obtenues à 60 et 90 jours. En effet, nous observons une légère amélioration de la contrainte entre 60, 90 et 180 jours et ce quel que soit le type de formulation. Ceci est probablement lié au type de liant utilisé pour lequel le comportement mécanique s'améliore progressivement avec le temps.

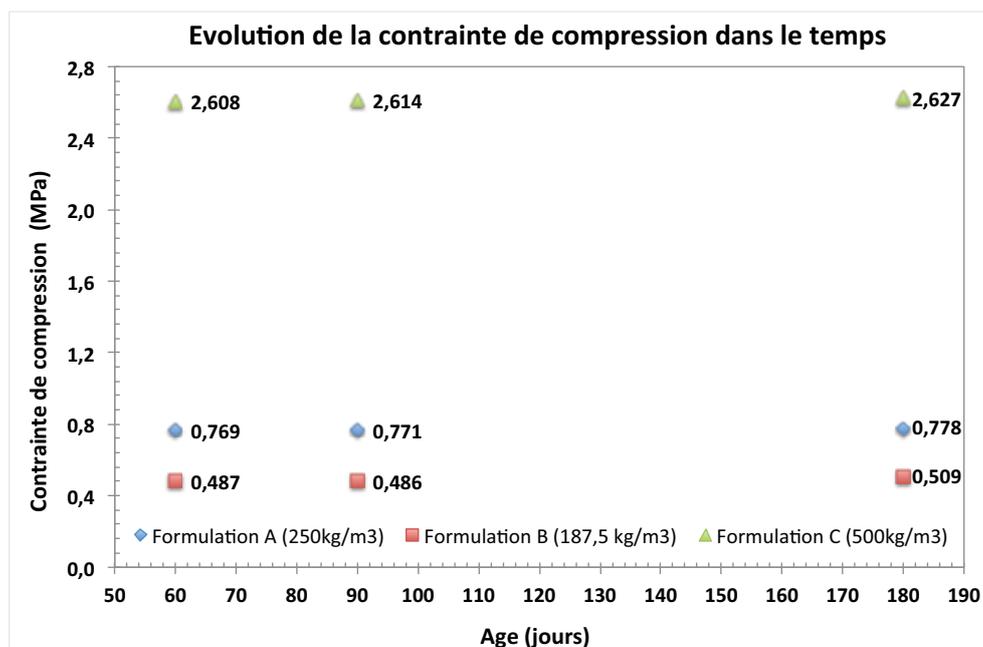


Figure 4-8 : Variation de la contrainte de compression dans le temps, formulations A, B et C.

Dans une étude réalisée par Nguyen [19], il a été mis en évidence une nette amélioration des caractéristiques mécaniques entre les résultats à 21 jours et à 28 jours. Cependant, au-delà de ce délai et jusqu'à 90 jours, il n'y avait pas de différences significatives. Ceci semble être en accord avec nos résultats entre 60 et 90 jours.

Par ailleurs, les résultats obtenus par Cézeo [33], puis Arnaud et Gourlay [32] montrent une évolution croissante dans le temps des propriétés mécaniques du béton de chanvre (figure 4-9). En revanche, il est important de souligner que l'interprétation des résultats dans le temps, doit tenir compte du nombre d'éprouvettes par échéance. Selon que l'analyse est faite sur une ou plusieurs éprouvettes, différentes conclusions sont possibles.

Dans le but de montrer à quel point le nombre d'éprouvettes considéré peut conduire à deux conclusions contradictoires, nous avons choisi volontairement, trois éprouvettes (une par

échéance) pour deux types de formulations A et B. Avec ces éprouvettes, de la même façon que pour les résultats d'Arnaud et Gourlay [32] figure 4-9, nous mettons en évidence une évolution croissante pour les résultats de la formulation A en figure 4-10.

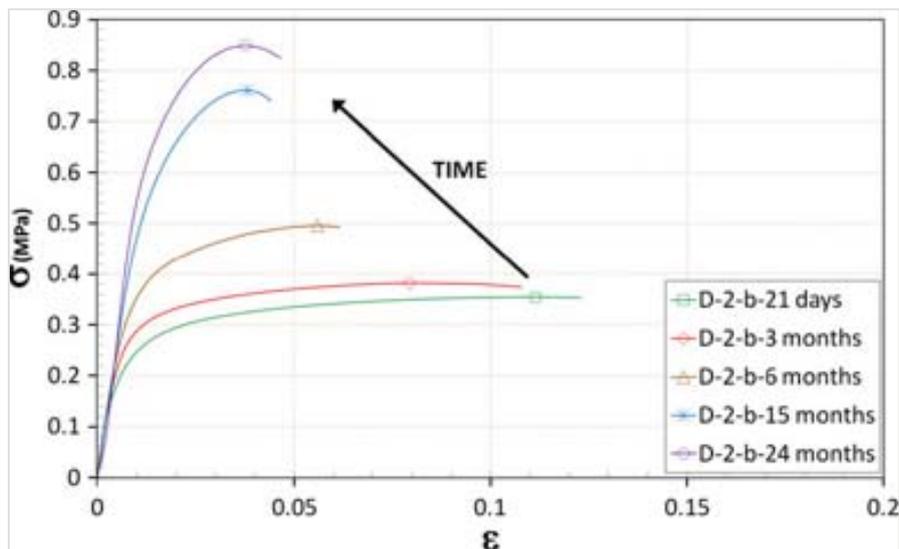


Figure 4-9: Evolution de contrainte de compression en fonction du temps

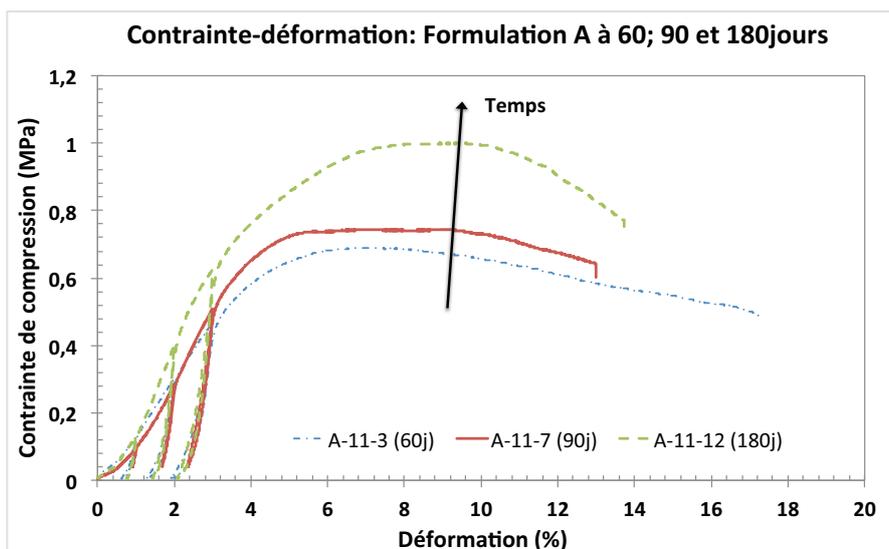


Figure 4-10: Mise en évidence de l'interprétation biaisée d'évolution de la contrainte de compression dans le temps : cas de croissance.

A l'inverse, nous observons une évolution décroissante de la contrainte de compression maximale dans le temps pour les résultats de la formulation B (figure 4-11). En réalité, ces analyses sont erronées dans la mesure où il ne convient pas de considérer une seule éprouvette, compte tenu des incertitudes expérimentales. Il est plutôt nécessaire de considérer la moyenne de plusieurs éprouvettes (§5.3). Dans cette dernière configuration (figure 4-8), il est clair que l'évolution n'est pas significativement différente d'une échéance à l'autre comme le laisse penser les résultats des figures 4-10 et 4-11.

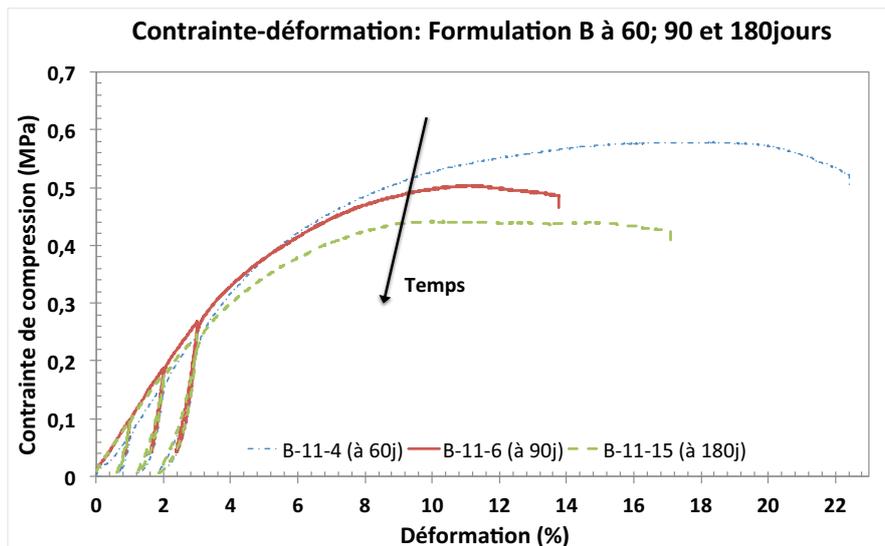


Figure 4-11: Mise en évidence de l'interprétation biaisée d'évolution de la contrainte de compression dans le temps : cas de décroissance.

Il convient de noter que l'illustration du caractère croissante/décroissante faite en choisissant volontairement les éprouvettes de la formulation A et B, respectivement, aurait pu être faite en ordre inverse pour aboutir aux mêmes conclusions. De plus, notons également que de la même façon, en jouant sur le nombre d'éprouvettes, on pourrait arriver à mettre en évidence à tort, une faible variation des résultats dans le temps. En conclusion, la manière efficace et crédible consiste à considérer la moyenne. De là, la question qui se pose est de savoir le nombre d'éprouvettes qu'il convient de considérer. L'étude faite au chapitre 5 (cf. §5.3) permet de valider le nombre minimum d'éprouvettes statistiquement significatif.

Au delà du nombre d'éprouvettes, une étude prenant en compte des échéances à court terme (inférieures à 28 jours) à moyen termes (3 à 6 mois) et à long terme (12 à 24 mois) avec l'utilisation de différents liants peut permettre de mieux mettre en évidence l'impact du temps de séchage sur les performances mécaniques du béton de chanvre.

4.4 Variabilité selon la méthode et l'âge du béton de chanvre

Dans cette partie, nous analysons la variabilité des résultats du module aux différentes échéances selon la méthode utilisée. Pour une bonne représentation des résultats, nous analysons dans un premier temps les méthodes flottante, tangente et cyclique, § 4.4.1 et dans un second temps les méthodes d'écroutissage et différentes stratégies, § 4.4.2.

4.4.1 Méthodes flottante, tangente et cyclique

Dans cette partie, nous présentons et analysons les résultats de module obtenus par trois méthodes distinctes. Il s'agit de la méthode flottante, tangente et cyclique. Les résultats sont détaillés par échéance. Pour une méthode donnée, en ligne des tableaux nous présentons les résultats de chacune des éprouvettes (courbes) avec les valeurs obtenues par phase ou cycle selon le cas ainsi que leur moyenne. En colonne, sur l'ensemble des éprouvettes, les valeurs moyennes, l'écart-type, le coefficient de variation et l'intervalle de confiance sont donnés par phase ou cycle et par courbe.

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (cycles)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	VM
A-11-1	31,76	78,09	81,02	67,63	75,58	30,39	70,57	76,97	62,97	70,17	52,11	53,41	42,61	49,38
A-11-2	17,36	40,38	53,27	61,83	51,83	14,88	36,67	49,77	57,93	48,12	29,69	33,31	33,80	32,27
A-11-3	19,05	48,01	59,94	62,56	56,84	14,25	45,03	54,24	56,04	51,77	29,34	38,78	38,13	35,42
A-11-4	28,61	66,21	96,98	82,21	81,80	12,30	56,97	86,31	75,06	72,78	38,74	53,89	49,47	47,37
A-11-5	13,81	39,18	72,89	91,27	67,78	9,58	35,18	65,44	82,61	61,08	25,85	40,33	53,08	39,75
VM	22,12	54,37	72,82	73,10	66,76	16,28	48,88	66,55	66,92	60,78	35,15	43,94	43,42	40,84
ET	7,69	17,10	17,31	13,05	12,51	8,15	14,90	15,28	11,48	10,88	10,61	9,24	7,92	7,41
CV	34,74	31,45	23,78	17,85	18,74	50,08	30,47	22,95	17,16	17,90	30,20	21,02	18,25	18,14
IC	9,54	21,23	21,50	16,20	15,54	10,12	18,50	18,97	14,26	13,51	13,18	11,47	9,84	9,20

Tableau 4-5: Résultats de modules avec les méthodes flottante, tangente et cyclique à 60 jours

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (phases)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	3 ^è	N°	1 ^{ère}	2 ^è
A-11-6	19,91	79,67	88,81	83,79	84,09	16,26	76,12	79,23	75,12	76,82	78,50	78,92	69,87	75,76
A-11-7	15,42	64,12	78,80	84,39	75,77	11,77	63,25	72,37	77,35	70,99	68,31	70,38	67,80	68,83
A-11-8	23,74	85,75	95,05	87,89	89,56	19,16	78,18	84,02	77,86	80,02	79,40	82,14	70,41	77,32
A-11-9	10,61	39,38	39,56	37,58	38,84	9,55	38,29	34,80	33,86	35,65	38,10	35,25	31,45	34,93
A-11-10	21,45	73,96	78,20	72,73	74,96	19,64	70,47	72,19	63,73	68,80	70,30	70,48	60,24	67,01
VM	18,23	68,58	76,08	73,28	72,65	15,28	65,26	68,52	65,58	66,46	66,92	67,43	59,95	64,77
ET	5,23	18,16	21,61	20,75	19,84	4,48	16,15	19,50	18,64	17,79	16,84	18,72	16,45	17,25
CV	28,72	26,48	28,40	28,32	27,31	29,31	24,75	28,45	28,42	26,78	25,16	27,76	27,43	26,63
IC	6,50	22,55	26,83	25,76	24,64	5,56	20,05	24,21	23,15	22,09	20,90	23,25	20,42	21,42

Tableau 4-6: Résultats de modules avec les méthodes flottante, tangente et cyclique à 90 jours

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (phases)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	VM
A-11-11	25,11	82,61	79,21	84,16	82,00	23,54	76,57	65,75	75,46	72,59	59,95	50,10	51,85	53,97
A-11-12	17,86	63,53	95,70	90,52	83,25	16,31	59,02	90,73	80,53	76,76	48,64	66,94	62,41	59,33
A-11-13	18,30	60,56	71,76	70,77	67,70	15,90	54,19	64,49	62,71	60,46	43,26	50,30	47,60	47,05
A-11-14	21,92	61,43	76,02	74,72	70,72	19,26	57,85	67,88	69,01	64,91	45,72	53,32	51,16	50,07
A-11-15	15,10	45,77	59,65	61,77	55,73	14,17	40,38	51,75	57,19	49,77	34,87	43,74	42,95	40,52
VM	19,66	62,78	76,47	76,39	71,88	17,84	57,60	68,12	68,98	64,90	46,49	52,88	51,19	50,19
ET	3,90	13,13	13,06	11,27	11,31	3,68	12,94	14,12	9,40	10,59	9,11	8,60	7,20	7,09
CV	19,82	20,92	17,08	14,76	15,73	20,62	22,47	20,74	13,63	16,31	19,59	16,26	14,06	14,13
IC	4,84	16,31	16,22	14,00	14,04	4,57	16,07	17,54	11,68	13,15	11,31	10,68	8,93	8,81

Tableau 4-7: Résultats de modules avec les méthodes flottante, tangente et cyclique à 180 jours

L'analyse globale des résultats (tableaux 4-5 à 4-7) montre des valeurs plus élevées pour la méthode flottante quel que soit le module calculé (apparent ou élastique). De cette tendance, il paraît que la méthode flottante permet de calculer la pente maximale pour un tronçon donné de la courbe contrainte-déformation. Alors que pour la méthode tangente, soit on juge à l'œil nu le tronçon de la courbe susceptible de donner la valeur maximale comme dans [74,75], soit, on fixe les niveaux de contrainte a priori et on cherche les niveaux de déformation

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

correspondants et on calcule ensuite la pente associée [58,90]. Quelle que soit la démarche que l'on peut adopter, il paraît d'après les résultats de notre étude que la méthode tangente n'est qu'un cas particulier de la méthode flottante.

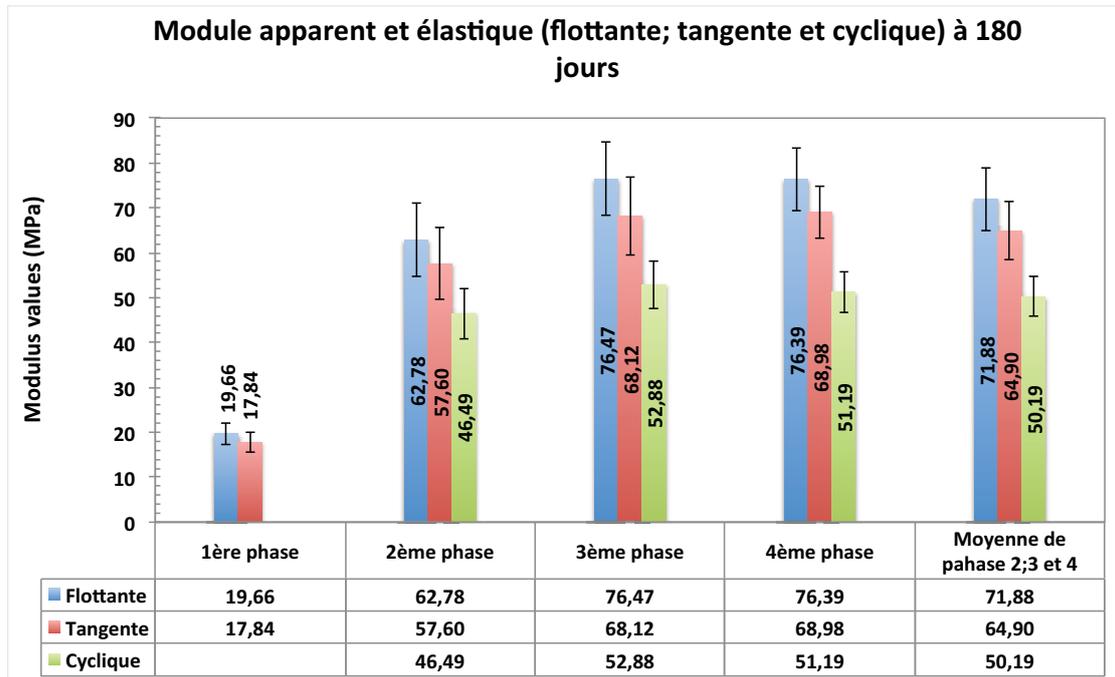


Figure 4-12: Valeurs de module par les méthodes flottante, tangente, cyclique en phase de chargement avec leurs moyennes (phases 2, 3 et 4) à 180 jours

Contrairement à la méthode flottante où on cherche le maximum, pour la méthode cyclique une moyenne est calculée. De plus, la différence réside dans le fait que pour la méthode cyclique non seulement on prend en compte la phase de chargement mais aussi la phase de déchargement (figure 4-4). Dans tous les cas, quels que soient l'âge et la formulation considérés, nous observons des valeurs inférieures pour cette méthode (figures 4-12 et 4-13). Le calcul du module en considérant la même démarche que pour la méthode cyclique mais seulement sur la phase de chargement, peut donner des valeurs supérieures à celle de la méthode cyclique.

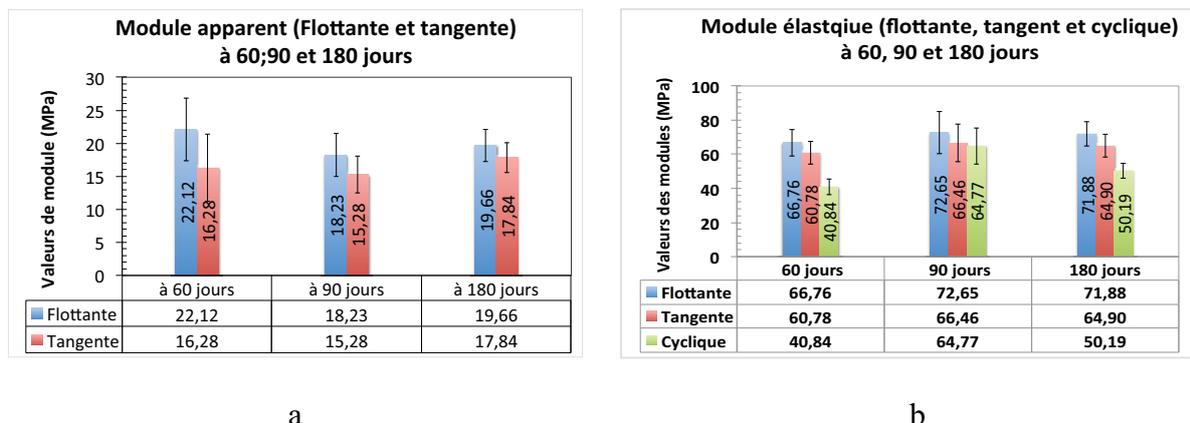


Figure 4-13: Module apparent et élastique par les méthodes flottant, tangente et cyclique de 60 à 180 jours

Les valeurs du module apparent à 60 jours (figure 4-13 a) sont légèrement supérieures aux autres échéances pour le cas de la méthode flottante. Nous observons une diminution entre 60 et 90 jours puis une amélioration entre 90 et 180 jours. Quelles que soient les variations

constatées, les valeurs obtenues à 60 et 180 jours sont presque les mêmes. Elles sont voisines de 20 MPa et 17 MPa pour les méthodes flottante et tangente, respectivement. Ces tendances observées sont probablement liées à l'interaction chimique entre le liant et les particules de chanvre qui fait que l'évolution du durcissement n'est pas stable à ces différents âges. Nguyen [19] a mis en évidence l'amélioration des propriétés mécaniques entre 28 et 90 jours pour les liants hydrauliques NHL2 et NHL 3,5Z. Cette amélioration n'a pas été constatée pour le liant Tradical PF70, ce qui laisse privilégier l'hypothèse d'interaction chimique entre le type de liant et le chanvre [19].

Par ailleurs, nous remarquons que plus l'âge du béton de chanvre évolue, plus la dispersion des résultats du module apparent diminue. On observe alors un CV qui varie de 34,7% à 19,8% et 50% à 20% à 60 et 180 jours pour les méthodes flottante et tangente, respectivement. Concernant la dispersion des résultats, les deux méthodes semblent donner les mêmes dispersions à l'exception de l'étude à 60 jours avec une différence nette d'environ 15% (figure 4-14 a).

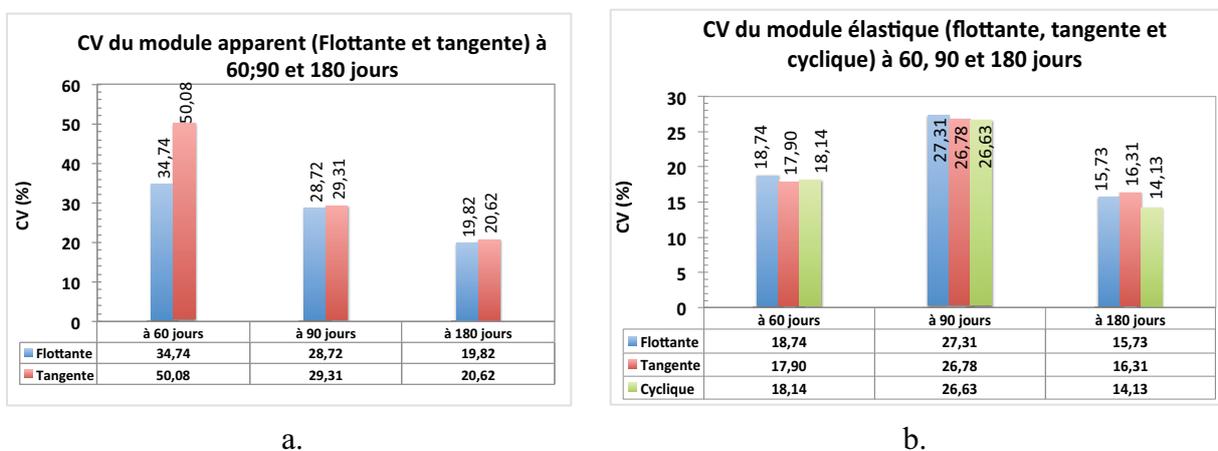


Figure 4-14: CV de module apparent et élastique par les méthodes flottant, tangent et cyclique à 60, 90 et 180 jours, formulation A.

Le module élastique varie d'une méthode à l'autre, il croit de la méthode cyclique à la méthode flottante (figure 4-13 b). Cette tendance est moins remarquée pour les résultats à 90 jours. Au cours du temps, on observe des valeurs qui s'améliorent de 60 à 90 jours puis se dégradent légèrement à 180 jours. L'évolution croissante et décroissante dans le temps du module élastique suit la même allure pour les méthodes tangente et flottante. A l'inverse pour la méthode cyclique, il existe une nette augmentation puis une diminution (la tendance est marquée). Compte tenu des écarts observés vis-à-vis des autres méthodes à 60 et à 180 jours et l'écart constaté à 90 jours, la méthode cyclique donne les résultats qui varient dans le temps. Par ailleurs, les trois méthodes présentent des dispersions considérables à 90 jours avec un CV d'environ 27% (figure 4-14 b). Cette dispersion diminue sensiblement jusqu'à atteindre environ 15% de CV à 180 jours.

En résumé, quel que soit le module (apparent ou élastique), la méthode flottante donne des valeurs plus élevées tandis que la méthode tangente donne de faibles valeurs. Pour le module élastique, la méthode cyclique donne des valeurs encore plus faibles que le module tangent. Les trois méthodes donnent des résultats dispersés à 90 jours avec un CV de l'ordre de 27%. Les résultats de la méthode tangente sont dispersés à 60 jours pour le module apparent. La méthode cyclique donne des valeurs de module élevées à 90 jours.

Compte tenu de ces analyses, la méthode flottante semble être la meilleure avec un bon compromis entre la faible variation dans le temps et la dispersion des résultats obtenus. Cependant, il convient de souligner qu'elle peut présenter un risque de surestimation des valeurs du module.

4.4.2 Méthode d'écroutissage et différentes stratégies

Dans cette partie, nous présentons et détaillons les résultats de module obtenus par les méthodes d'écroutissage et les cinq stratégies. Les détails des résultats donnés dans les tableaux sont les mêmes que dans la partie 4.4.1. A noter que dans le cas présent on a seulement trois phases.

N°	Ecroutissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5								
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e						
A-11-1	30,58	27,05	11,74	23,12	130,40	138,21	137,14	135,25	55,47	56,22	47,10	52,93	30,22	26,46	22,59	26,42	49,75	50,99	40,62	47,12	51,40	52,57	42,17	48,71
A-11-2	15,69	15,78	16,36	15,94	60,41	91,00	122,31	91,24	29,86	36,03	37,26	34,38	20,72	17,12	14,65	17,50	28,26	31,89	33,79	31,31	28,51	31,48	33,51	31,17
A-11-3	15,94	17,60	16,08	16,54	80,37	130,88	134,40	115,22	31,38	41,80	41,88	38,35	18,31	17,43	16,38	17,37	28,96	37,80	37,89	34,88	27,36	37,04	37,57	33,99
A-11-4	25,06	32,04	12,31	23,14	103,19	173,31	212,88	163,13	42,68	59,85	53,03	51,85	20,62	17,82	16,08	18,17	38,84	55,44	46,29	46,86	37,07	54,36	47,29	46,24
A-11-5	12,55	20,61	26,16	19,77	60,06	146,63	170,02	125,57	30,41	45,48	58,12	44,67	16,08	16,31	17,34	16,58	24,30	40,01	53,22	39,18	25,58	38,02	50,87	38,16
VM	19,96	22,62	16,53	19,70	86,89	136,01	155,35	126,08	37,96	47,88	47,48	44,44	21,19	19,03	17,41	19,21	34,02	43,23	42,36	39,87	33,98	42,69	42,28	39,65
ET	7,55	6,79	5,78	3,45	30,09	29,84	36,70	26,40	11,12	9,95	8,37	8,14	5,40	4,19	3,05	4,07	10,29	9,72	7,58	7,07	10,69	10,16	7,04	7,61
CV	37,83	30,02	34,98	17,51	34,64	21,94	23,62	20,94	29,30	20,78	17,62	18,33	25,47	22,03	17,54	21,20	30,26	22,48	17,89	17,73	31,46	23,81	16,64	19,20
IC	9,38	8,43	7,18	4,28	37,37	37,05	45,57	32,78	13,81	12,35	10,39	10,11	6,70	5,20	3,79	5,06	12,78	12,07	9,41	8,78	13,28	12,62	8,74	9,45

Tableau 4-8: Résultats du module par la méthode d'écroutissage et 5 stratégies à 60 jours

N°	Ecroutissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5								
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e						
A-11-6	18,22	19,28	12,49	16,66	98,64	152,49	171,72	140,95	79,74	89,38	76,20	81,77	74,00	67,96	55,65	65,87	76,79	76,77	66,19	73,25	76,51	77,70	66,63	73,61
A-11-7	14,08	21,79	20,15	18,67	67,59	125,33	148,32	113,75	72,54	77,83	73,44	74,60	61,26	59,01	51,99	57,42	63,75	68,12	63,44	65,10	63,81	68,54	64,23	65,53
A-11-8	22,42	25,04	15,15	20,87	113,65	168,23	193,74	158,54	89,73	88,08	75,83	84,55	70,24	64,86	58,11	64,40	77,35	78,54	67,75	74,55	77,56	79,24	68,63	75,14
A-11-9	8,25	7,25	5,80	7,10	48,16	65,64	69,21	61,00	42,91	38,07	34,92	38,63	37,42	31,97	30,02	33,14	38,77	33,78	30,91	34,49	40,00	34,71	31,54	35,42
A-11-10	19,27	17,83	7,67	14,92	100,94	125,66	167,75	131,45	86,41	75,04	64,03	75,16	66,89	62,48	48,39	59,25	68,74	68,65	57,88	65,09	69,68	69,16	58,98	65,94
VM	16,45	18,24	12,25	15,65	85,80	127,47	150,15	121,14	74,27	73,68	64,88	70,94	61,96	57,26	48,83	56,02	65,08	65,17	57,23	62,50	65,51	65,87	58,00	63,13
ET	5,47	6,72	5,78	5,27	27,01	39,11	48,04	37,31	18,73	20,86	17,46	18,56	14,50	14,51	11,14	13,26	15,77	18,16	15,19	16,27	15,31	18,08	15,23	16,09
CV	33,24	36,87	47,14	33,68	31,48	30,68	31,99	30,80	25,22	28,32	26,91	26,16	23,39	25,34	22,82	23,67	24,24	27,87	26,54	26,03	23,37	27,45	26,25	25,49
IC	6,79	8,35	7,17	6,54	33,54	48,56	59,64	46,33	23,25	25,90	21,68	23,04	18,00	18,02	13,84	16,47	19,58	22,55	18,86	20,20	19,01	22,45	18,91	19,98

Tableau 4-9: Résultats du module par la méthode d'écroutissage et 5 stratégies à 90 jours

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

N°	Ecroûissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5								
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	VM	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	VM	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	VM	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	VM					
A-11-11	22,60	11,31	19,68	17,86	133,83	141,95	183,14	152,97	64,84	53,01	55,26	57,70	37,94	25,64	22,87	28,82	55,09	48,82	50,77	51,56	57,35	49,78	49,99	52,37
A-11-12	16,10	26,68	15,69	19,49	96,99	167,68	198,71	154,46	49,67	72,92	69,77	64,12	31,23	35,84	33,74	33,60	45,07	65,52	60,93	57,17	45,88	66,82	61,85	58,18
A-11-13	17,80	20,25	14,58	17,54	95,96	146,08	174,08	138,71	49,07	53,66	51,43	51,39	30,60	28,00	25,00	27,87	41,00	48,07	46,25	45,11	41,61	48,55	44,76	44,97
A-11-14	18,56	21,66	16,03	18,75	112,54	147,53	173,25	144,44	51,32	57,08	55,67	54,69	29,60	29,39	27,70	28,90	43,43	53,72	48,46	48,54	44,34	49,53	50,11	47,99
A-11-15	13,53	17,21	14,69	15,14	70,13	107,58	122,62	100,11	39,13	46,41	46,79	44,11	24,72	25,34	23,78	24,61	32,19	43,62	42,05	39,29	32,89	43,61	42,79	39,76
VM	17,72	19,42	16,13	17,76	101,89	142,16	170,36	138,14	50,81	56,62	55,78	54,40	30,82	28,84	26,62	28,76	43,36	51,95	49,69	48,33	44,41	51,66	49,90	48,66
ET	3,34	5,68	2,08	1,65	23,46	21,74	28,58	22,21	9,19	9,90	8,60	7,42	4,73	4,26	4,38	3,22	8,23	8,39	7,06	6,72	8,81	8,84	7,41	7,03
CV	18,87	29,25	12,88	9,29	23,02	15,30	16,78	16,08	18,09	17,48	15,41	13,65	15,36	14,76	16,44	11,20	18,98	16,15	14,20	13,91	19,83	17,11	14,86	14,45
IC	4,15	7,05	2,58	2,05	29,13	27,00	35,49	27,57	11,41	12,29	10,68	9,22	5,88	5,29	5,43	4,00	10,22	10,42	8,76	8,35	10,93	10,97	9,20	8,73

Tableau 4-10: Résultats du module par la méthode d'écroûissage et 5 stratégies à 180 jours

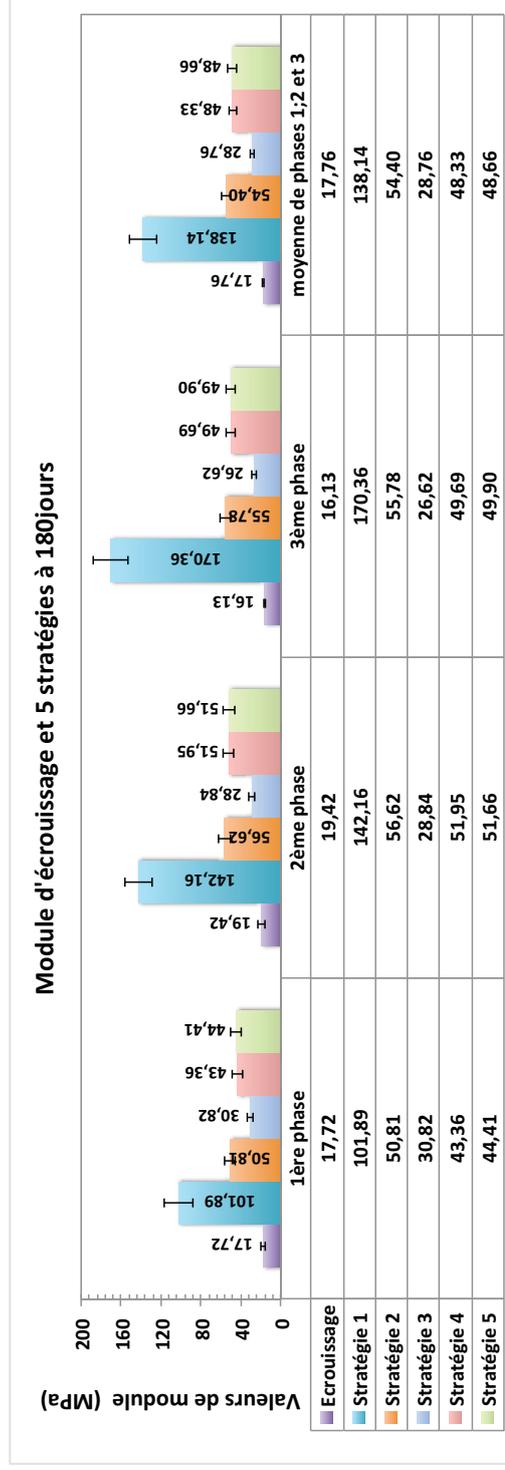


Figure 4-15: Valeurs du module d'écroûissage et élastique par la méthode d'écroûissage et 5 stratégies à 180 jours

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

Le module d'écroissage calculé avec la méthode dite « d'écroissage » donne des valeurs faibles du même ordre de grandeur que celles du module apparent. Elles sont comprises entre 15 MPa et 20 MPa. D'ailleurs, en 1^{ère} phase, le calcul par la méthode d'écroissage est similaire à celui de la méthode tangente. Dans la mesure où la méthode d'écroissage est calculée dans les trois phases, on pouvait penser a priori que la valeur de ce module augmente d'une phase à l'autre. Ceci est vrai dans certains cas mais ne peut pas être généralisé à l'ensemble des résultats. En effet, les valeurs obtenues sur les trois phases (méthode d'écroissage) varient de façon aléatoire, soit en augmentant, soit en diminuant ou de manière quasi-identique. Il s'agit des cas par exemple des éprouvettes A-11-5, A-11-1 et A-11-2, respectivement (tableau 4-10).

La stratégie 1 est un cas à part puisqu'on calcule le module dans la phase de déchargement. Dans la mesure où la phase de déchargement n'est pas contrôlée lors de l'essai, l'éprouvette a tendance à revenir à sa position initiale de façon instantanée. En conséquence, on enregistre de grandes variations de la force sous un faible allongement (retour à la position initiale) de l'éprouvette. La déformation enregistrée lors de cette phase est équivalente à celle subie par l'éprouvette pendant la phase de chargement moins la déformation résiduelle. C'est pourquoi les valeurs obtenues avec cette stratégie sont les plus élevées de l'ordre de 120 MPa à 140 MPa, tout âge confondu.

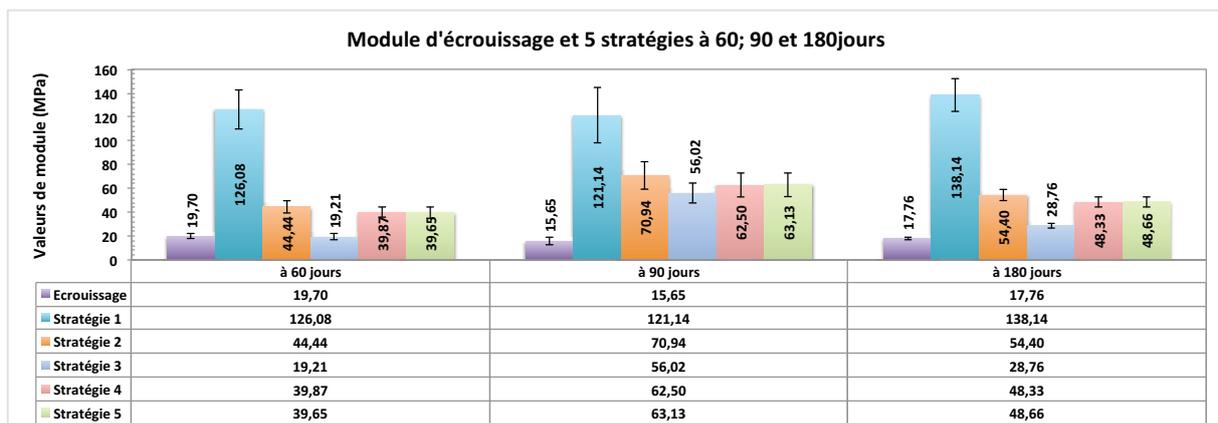


Figure 4-16: Valeurs du module d'écroissage et élastique par la méthode d'écroissage et 5 stratégies à 60, 90 et 180 jours, formulation A

Les stratégies 2, 4 et 5 donnent des résultats comparables. Il n'existe pas de différences significatives pour les résultats de la stratégie 4 et 5, quels que soient l'âge et la formulation (figures 4-16 et 5-41). En effet, l'évolution du chemin suivi par la courbe sur laquelle nous nous sommes inspirés (cf. figure 1-25 b au chapitre 1) n'est pas la même qu'un échantillon de chanvre. La courbe est strictement croissante tandis que pour le chanvre, on a une courbe croissante avec changement de direction. La particularité de la courbe avec point d'inflexion, fait que les droites tracées d'après les stratégies 4 et 5 passent quasiment aux mêmes endroits, figure 4-5 e et f. Ceci n'est pas le cas pour la courbe à laquelle on se réfère. De même, la droite tracée d'après la stratégie 2 passe au voisinage de deux droites (stratégies 4 et 5) figure 4-5 c, mais avec une pente légèrement raide, ce qui conduit à des valeurs plus élevées pour la stratégie 2.

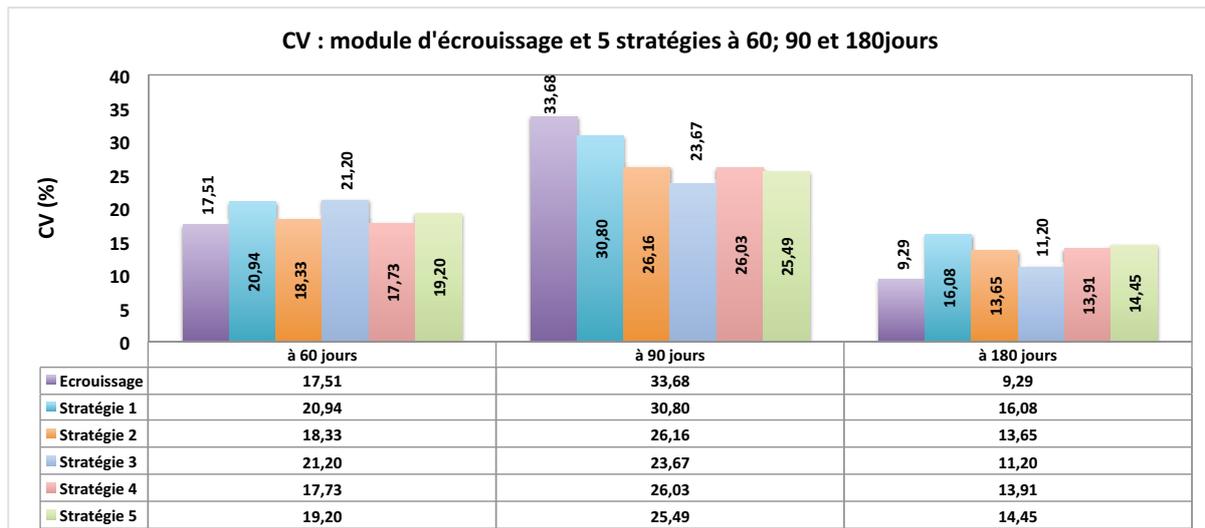


Figure 4-17: CV pour le module d'écrouissage et élastique par la méthode d'écrouissage et 5 stratégies à 60, 90 et 180 jours

Comme dans le cas des méthodes tangente, flottante et cyclique, nous observons encore des dispersions qui s'amplifient à 90 jours et qui diminuent sensiblement à 180 jours (figure 4-17). Ces dispersions remarquables à 90 jours sont vraisemblablement associées à une erreur de manipulation non identifiée. Nous observons également les valeurs de module qui augmentent à 90 jours quelle que soit la méthode, à l'exception de la stratégie 1 (figure 4-16). L'analyse des résultats de la formulation B (annexe A) révèle la même tendance, ce qui est encourageant pour privilégier encore une fois l'hypothèse d'une erreur de manipulation. Notons au passage que dans cette formulation, la dispersion est faible grâce à sa faible teneur en liant.

La variabilité constatée à 90 jours pour les résultats du module n'est pas constatée dans le cas de la contrainte à la compression (figure 4-8). Ce qui laisse penser que l'erreur a été commise lors du dépouillement des données en calculant le module. Après vérifications, il s'avère que les données ont été exploitées de la même façon à toutes échéances. Il est alors possible que l'erreur ait été commise lors des essais de compression. D'où la nécessité d'analyser les résultats bruts.

L'analyse des courbes contrainte-déformation (figure 4-18) permet alors d'identifier la source d'erreur. L'augmentation, ainsi que la dispersion des résultats à 90 jours sont dues à une erreur de paramétrage de l'essai. En effet, lors d'essai de compression, il est mis une force de pré-charge de 50N; pour permettre d'assurer une bonne mise en contact du plateau de compression et la face supérieure de l'éprouvette. Dans la suite de l'essai, le déchargement doit se faire alors jusqu'à une force égale à 0, (figure 4-18 a, b. et d). Par erreur, contrairement aux autres échéances, à 90 jours nous avons omis le déchargement jusqu'à la force égale 0. Le déchargement a été fait jusqu'à la valeur de la force de pré-charge (50N) (figure 4-18 c), d'où les différences constatées à cette échéance.

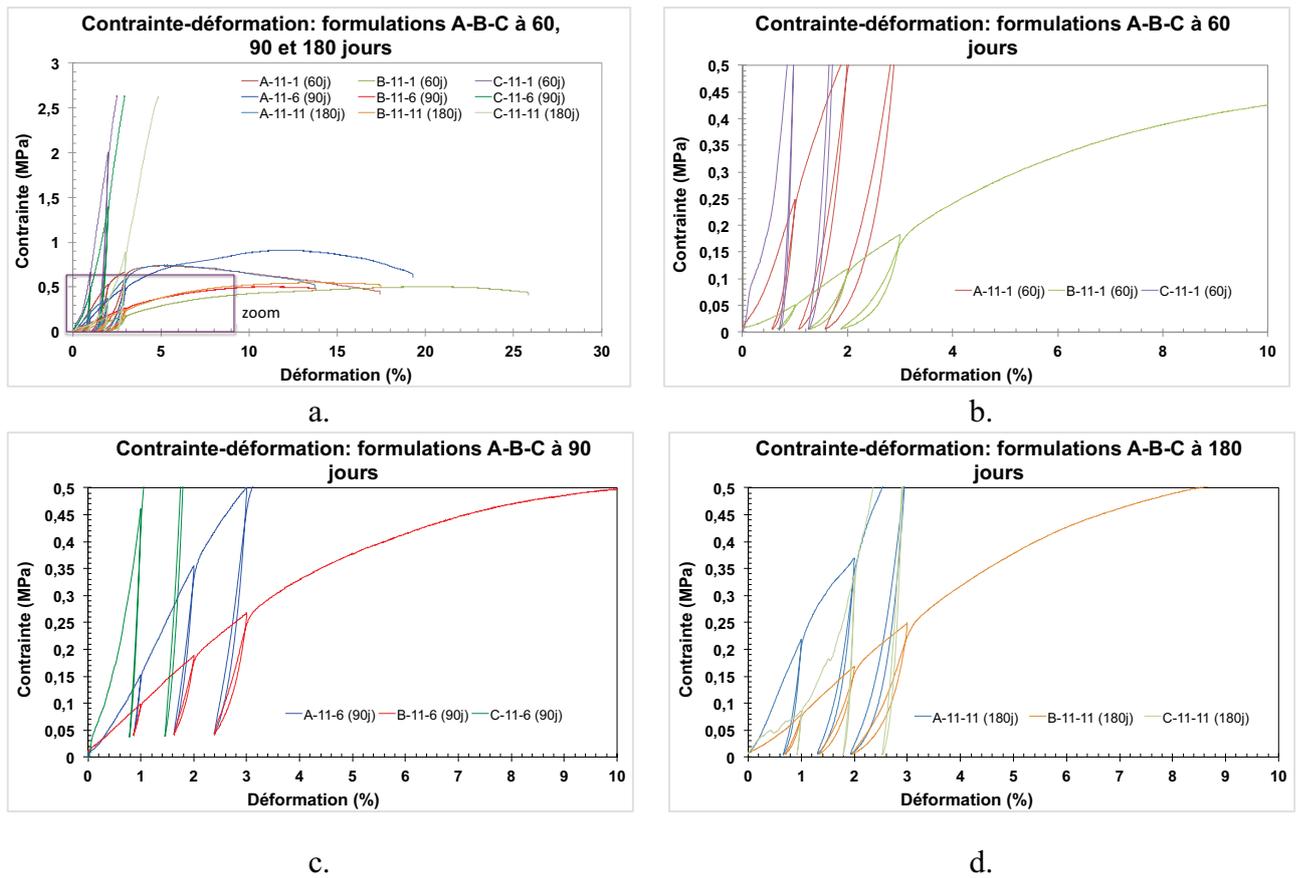


Figure 4-18: Mise en évidence d'erreur de paramétrage commise lors de l'échéance à 90 jours

D'après Nguyen [19], la force de pré-charge lors de la fabrication peut contribuer à améliorer le comportement mécanique du béton de chanvre. Sur cette base, nous avons choisi une valeur faible (de l'ordre de 0,1 à 1% de force maximale), considérée comme négligeable pour ne pas biaiser les résultats. Toutefois, l'erreur de paramétrage permet de se rendre compte que la force de pré-charge influe sur le module du béton de chanvre. En revanche, la valeur de la force choisie reste relativement faible dans la mesure où l'erreur commise n'impacte pas le module apparent ni la valeur de contrainte de compression. Ainsi, d'après les résultats du module élastique, il est nécessaire de bien respecter le protocole en limitant les erreurs.

4.4.3 Conclusion

Nous avons mis en évidence les ressemblances entre les méthodes utilisées pour calculer les différents modules. Grâce à sa faible dispersion et sa faible variation dans le temps, la méthode flottante semble être mieux adaptée que les méthodes tangente et cyclique. Sa tendance à surestimer les résultats de module a été soulignée. Par ailleurs, nous avons mis en évidence le fait que la méthode tangente est un cas particulier de la méthode flottante. Nous avons également montré que la méthode cyclique donne des valeurs faibles (tendance à sous-estimer les valeurs du module).

La méthode d'écrouissage donne les valeurs comparables à celles des méthodes tangente et flottante. La stratégie 1 est un cas à part, avec des valeurs plus élevées. Par ailleurs, les stratégies 2, 4 et 5 donnent les valeurs comparables et quasi-identiques pour les stratégies 4 et 5. Enfin, nous avons vu que la stratégie 3 a tendance à sous-estimer les valeurs du module.

Nous avons également constaté que la dispersion des résultats est fonction de la teneur en liant. Plus cette teneur augmente, plus la dispersion dans les résultats obtenus est importante. La faible variation dans le temps pour les résultats (contrainte et module) est probablement associée au type de liant utilisé. Lors de l'analyse de l'évolution des performances mécaniques, nous avons également mis en évidence le risque d'erreur lorsqu'on utilise une seule valeur d'essai.

Par ailleurs, les valeurs obtenues pour les différents modules présentent des corrélations. Pour chaque phase, la variation suit une allure comparable d'une méthode à l'autre. En conséquence, une analyse plus approfondie peut permettre de proposer un modèle de comportement. Grâce à ce modèle, on proposera alors une loi de comportement mécanique du matériau béton de chanvre.

4.5 Proposition d'une loi de comportement mécanique du matériau béton de chanvre

4.5.1 De l'intérêt d'une loi de comportement du béton de chanvre

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de la loi de comportement mécanique du béton de chanvre. Cette étude est basée sur l'analyse de la courbe expérimentale contrainte-déformation, grâce à laquelle un modèle à cinq paramètres est proposé. D'après ce modèle, il est possible de reproduire numériquement la courbe expérimentale. Non seulement avec ce modèle, il est possible de déterminer les différents types de module, mais aussi il peut être implémentée dans un code de calcul pour décrire le comportement mécanique du matériau béton de chanvre.

Dans ce qui suit, nous analysons la courbe expérimentale contrainte-déformation, dans le but de proposer une loi de comportement du béton de chanvre à partir de l'exploitation des résultats expérimentaux. Par la suite, nous décrivons le modèle proposé avec ses différents paramètres et les étapes de leur évaluation. Avant de conclure et de donner quelques perspectives, nous proposons une analyse comparative entre les courbes expérimentales et celles obtenues numériquement sur la base du modèle proposé.

4.5.2 Courbe expérimentale à chargement cyclique

Alors que la littérature préconise deux types de chargement, monotone [32,37] et cyclique [19,73], nous avons adopté, dans cette étude, un chargement cyclique conformément au protocole d'essai de compression en §3.1.3. De ce fait, la courbe expérimentale est composée de trois cycles de chargement/déchargement. Il convient de rappeler que les courbes expérimentales obtenues par les deux types de chargement se superposent pour la plupart des matériaux. Comme nous le verrons plus loin, au-delà de l'intérêt que présente le modèle que nous proposons, il est possible de tracer la courbe enveloppe de la courbe expérimentale. Cette dernière correspond pratiquement à la courbe expérimentale monotone.

La courbe expérimentale cyclique (figure 4-19 a) est composée de sept phases dont quatre phases de chargement (figure 4-19 b), notées PC1 à PC4, et trois phases de déchargement (figure 4-19 c), notées PD1 à PD3. Nous pouvons ainsi séparer ces différentes phases lors de l'analyse des courbes cycliques, afin de permettre l'identification du modèle.

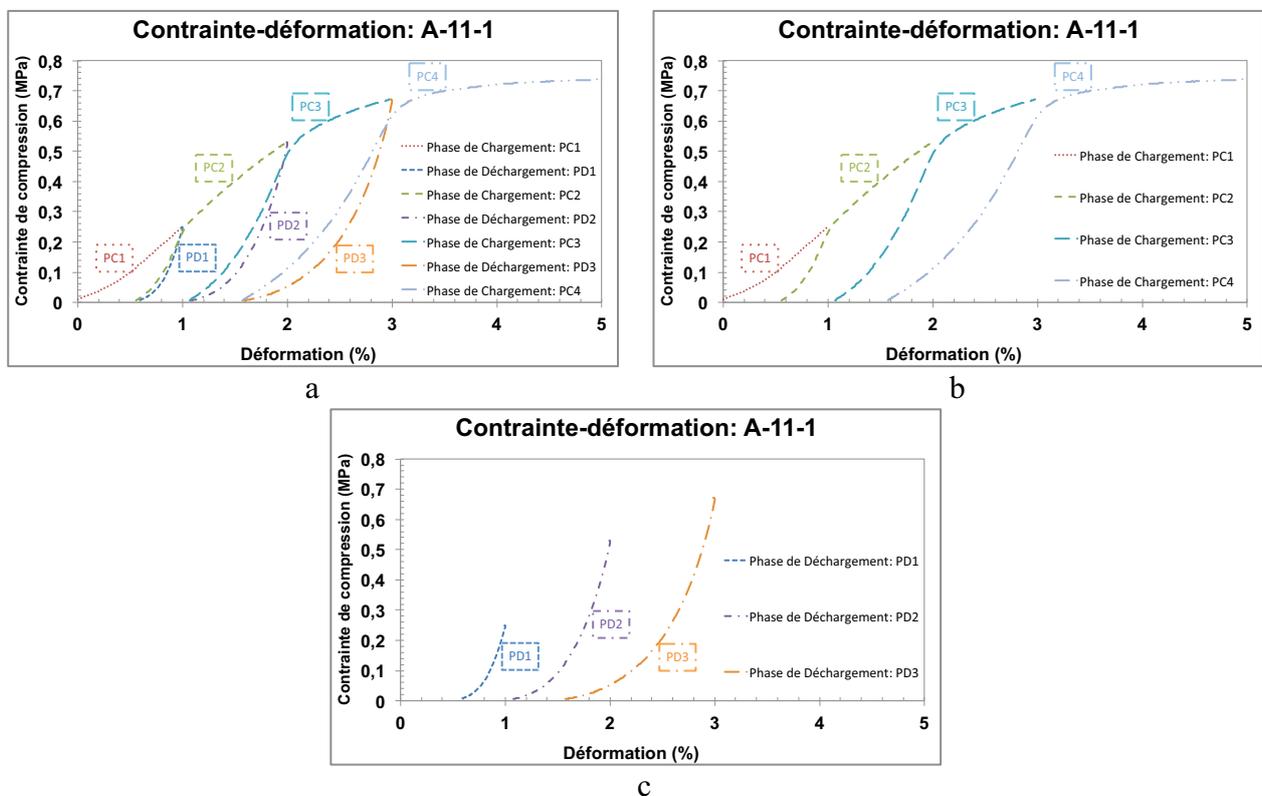


Figure 4-19: Phases de la courbe expérimentale cyclique (a), phases de chargement (b) et de déchargement (c).

4.5.3 Proposition d'une loi de comportement du béton de chanvre

D'après la courbe expérimentale, notamment dans les phases de chargement (figure 4-19 b), la loi de comportement du béton de chanvre est fortement non linéaire, avec les sous-phases suivantes :

- sous-phase de module croissant, qui se situe en début de la phase de chargement (y compris lors du chargement initial du matériau) ;

- sous-phase quasi-linéaire, avec un module quasi-constant égal à sa valeur maximale, dont la longueur est souvent très courte (cette sous-phase peut être considérée comme ponctuelle pour un certain nombre d'éprouvettes) ;
- sous-phase de module décroissant, qui se situe entre l'atteinte du module maximum et la contrainte de rupture ou de fin d'essai ;
- sous-phase d'écroutissage négatif, caractérisée par la diminution de la contrainte ; elle se situe au-delà de la contrainte maximale.

L'analyse de la courbe expérimentale, permet de proposer une loi de comportement du béton de chanvre, en tenant compte de ces différentes sous-phases. Grâce à cette loi, il est possible de calculer les différents types de module. Par ailleurs, on peut arriver à déterminer les cycles de chargement/déchargement à un niveau de déformation quelconque, non seulement aux déformations préalablement spécifiées dans le protocole d'essai. Cela présente un intérêt pratique certain, car cette loi peut être implémentée dans un code de calcul (CAST3M par exemple) pour décrire le comportement mécanique du matériau béton de chanvre.

Pour modéliser cette loi de comportement, nous prenons comme référence les points d'inflexion des phases de chargement (PC) (figure 4-19 b), auxquels le module est maximal. Pour une phase donnée PC_i (avec $i=1, 2, 3, 4$), les coordonnées de ce point d'inflexion, que nous appelons point maître « m », sont notées $\varepsilon_{m,i}$ pour la déformation et $\sigma_{m,i}$ pour la contrainte, et le module en ce point est noté $E_{m,i}$. Ce point maître correspond à la position où le module tangent du cycle est maximum (i.e. module flottant). Pour plus de clarté, ces grandeurs sont illustrées sur la Figure 4-20 pour une phase de chargement typique (pour des raisons de représentation graphique, l'échelle des axes est donnée ici pour la phase PC3 de l'éprouvette A-11-1).

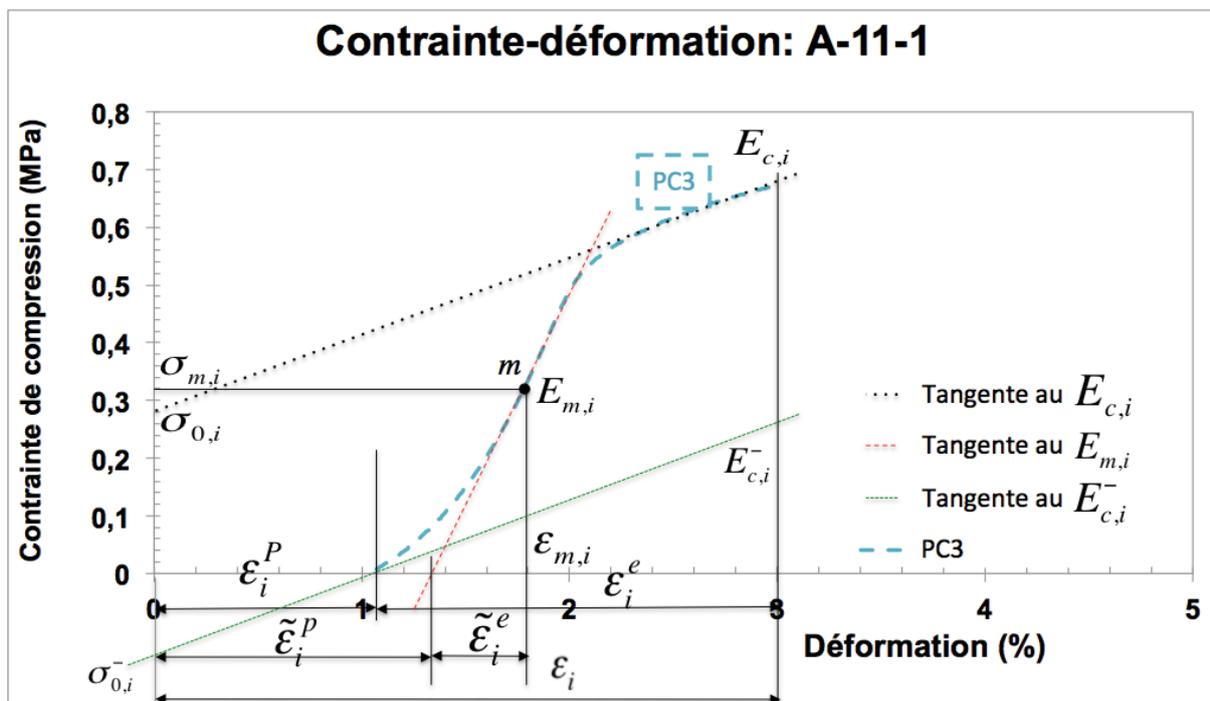


Figure 4-20: Identification des paramètres du modèle de la loi de comportement du béton de chanvre, phase de chargement.

Il convient de souligner que dans les phases de déchargement PD_i (avec $i=1, 2, 3$), le point maître « m » correspond au point de départ de cette phase (figure 4-21) ; i.e. point où le module tangent est maximum. En effet, l'allure de la phase de déchargement est similaire à

celle de la partie inférieure de la courbe de chargement ($\varepsilon \leq \varepsilon_{m,i}$) ; i.e. phase de chargement avant le point d'inflexion.

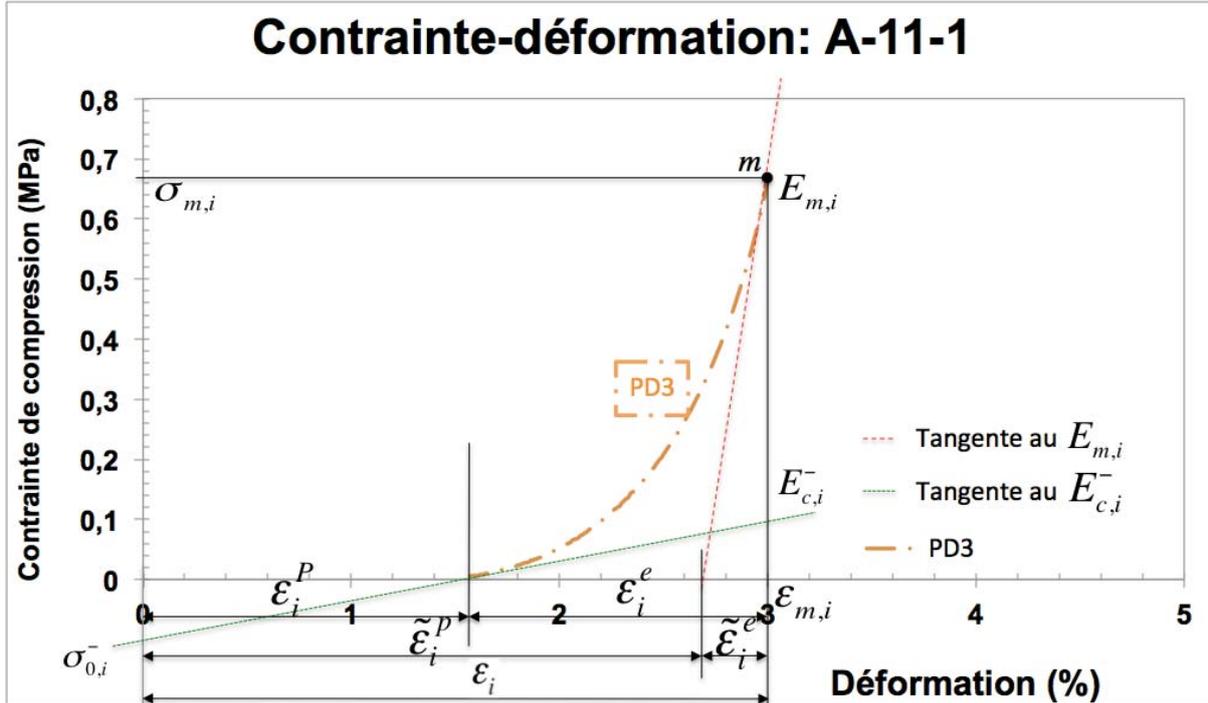


Figure 4-21: Identification des paramètres du modèle de la loi de comportement du béton de chanvre, phase de déchargement.

Pour la phase de chargement, la procédure proposée consiste à identifier les courbes contrainte-déformation de part et d'autre de ce point maître, tout en assurant la continuité en ce point. Pour la phase de déchargement, l'identification se fait seulement pour les niveaux de déformation en dessous du point maître. De plus, la loi de comportement doit permettre de décrire le module d'écrouissage du matériau, mesuré lors de la phase de chargement, $E_{c,i}$ (figure 4-20).

En faisant référence au point maître « m », le modèle de comportement proposé est défini par les expressions suivantes :

Phase de chargement PCi:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{m,i} + E_{c,i}^- (\varepsilon - \varepsilon_{m,i}) + \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{0,i}^-} + \frac{1}{(E_{m,i} - E_{c,i}^-)(\varepsilon - \varepsilon_{m,i})}} & \text{pour } \varepsilon \leq \varepsilon_{m,i} \end{cases} \quad \text{éq. 4-1}$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{m,i} + E_{c,i} (\varepsilon - \varepsilon_{m,i}) + \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{0,i}^-} + \frac{1}{(E_{m,i} - E_{c,i})(\varepsilon - \varepsilon_{m,i})}} & \text{pour } \varepsilon \geq \varepsilon_{m,i} \end{cases} \quad \text{éq. 4-2}$$

Phase de déchargement PDi :

$$\sigma = \sigma_{m,i} + E_{c,i}^- (\varepsilon - \varepsilon_{m,i}) + \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{0,i}^-} + \frac{1}{(E_{m,i} - E_{c,i}^-)(\varepsilon - \varepsilon_{m,i})}} \quad \text{avec } \varepsilon \leq \varepsilon_{m,i} \quad \text{avec } \varepsilon \leq \varepsilon_{m,i} \quad \text{éq. 4-3}$$

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

où $\varepsilon_{m,i}$, $\sigma_{m,i}$ et $E_{m,i}$ sont respectivement la déformation, la contrainte (MPa) et le module (MPa) au point maître (i.e. point d'inflexion, m) de la phase i , $E_{c,i}$ est le module d'érouissage (MPa), $\sigma_{0,i}$ est la contrainte initiale d'érouissage (MPa), pour la phase de chargement i , et $E_{c,i}^-$ et $\sigma_{0,i}^-$ sont respectivement le module et la contrainte initiale en début de la mise en charge ou lors du déchargement.

Pour la phase de chargement i , la déformation plastique apparente peut être calculée par :

$$\tilde{\varepsilon}_i^p = \varepsilon_{m,i} - \tilde{\varepsilon}_i^e = \varepsilon_{m,i} - \frac{\sigma_{m,i}}{E_{m,i}}, \text{ où } \varepsilon_{m,i} \text{ est la déformation totale au point maître, } \tilde{\varepsilon}_i^e \text{ est la}$$

déformation élastique apparente et $\tilde{\varepsilon}_i^p$ est la déformation plastique apparente figure 4-21. Il convient de noter qu'une partie de la déformation plastique réelle ε_i^p est inférieure à la déformation plastique apparente $\tilde{\varepsilon}_i^p$, à cause de la non linéarité du comportement lors du déchargement.

Ce modèle comprend cinq paramètres à calculer pour chaque phase de chargement PCi (figure 4-20) :

- module maximum $E_{m,i}$,
- module d'érouissage $E_{c,i}$ et de durcissement $E_{c,i}^-$
- contrainte initiale d'érouissage $\sigma_{0,i}$ et de durcissement $\sigma_{0,i}^-$

En ce qui concerne les phases de déchargements, comme le point maître se trouve en haut de la courbe, seuls trois paramètres sont à identifier : $E_{m,i}$, $E_{c,i}^-$ et $\sigma_{0,i}^-$.

4.5.4 Procédure d'identification des paramètres

L'identification des paramètres du modèle peut être effectuée en respectant les étapes détaillées ci-dessous :

1. pour une phase de chargement donnée i , nous calculons le module maximum $E_{m,i}$ par régression sur un ensemble de points (10 points successifs de la courbe expérimentale peuvent être utilisés pour ce calcul) ; ensuite nous identifions le point d'inflexion (i.e. maître point) m associé au module maximum ;
2. nous déterminons les coordonnées du point maître m , à savoir : $\varepsilon_{m,i}$ et $\sigma_{m,i}$ qui sont la déformation et la contrainte, respectivement ;
3. nous calculons le module d'érouissage $E_{c,i}$, et nous déterminons la contrainte initiale qui lui est associée $\sigma_{0,i}$ (cette étape est effectuée seulement pour les phases de chargement) ;
4. de la même manière, nous calculons le module de durcissement $E_{c,i}^-$, et la contrainte associée $\sigma_{0,i}^-$.

A l'issue de l'identification de l'ensemble des paramètres du modèle, il est possible de générer, grâce au modèle proposé, la courbe de comportement comparable à celle obtenue expérimentalement.

Il est à noter que cette même procédure a été appliquée pour la détermination de la loi de comportement de la courbe enveloppe, représentant la courbe de chargement monotone. Cette loi de la courbe enveloppe peut être ensuite exploitée pour la détermination des points maîtres dans un cadre général permettant l'implémentation dans un code calcul par éléments finis.

4.5.5 Comparaison du modèle avec les courbes expérimentales

L'illustration proposée en (figures 4-22 et 4-23) pour les formulations A et B, respectivement, montre dans quelle mesure le modèle proposé permet de représenter les courbes expérimentales. Ces figures montrent la capacité du modèle à reproduire les résultats expérimentaux avec une très bonne précision. L'écart constaté entre les courbes numérique et expérimentale dans la dernière phase de chargement (PC4) est associé au fait que dans cette phase, contrairement aux autres, le niveau de déformation ultime n'est pas défini. Il dépend du type de matériau et de son niveau de déformation (faible, moyen ou fort). Dans le cadre de cette étude, nous avons décidé de tronquer la courbe expérimentale à 5% de déformation. Ce niveau correspond ou avoisine, pour la plus part des cas, celui de la déformation à la contrainte de compression maximale et reste acceptable pour une utilisation pratique de ce matériau.

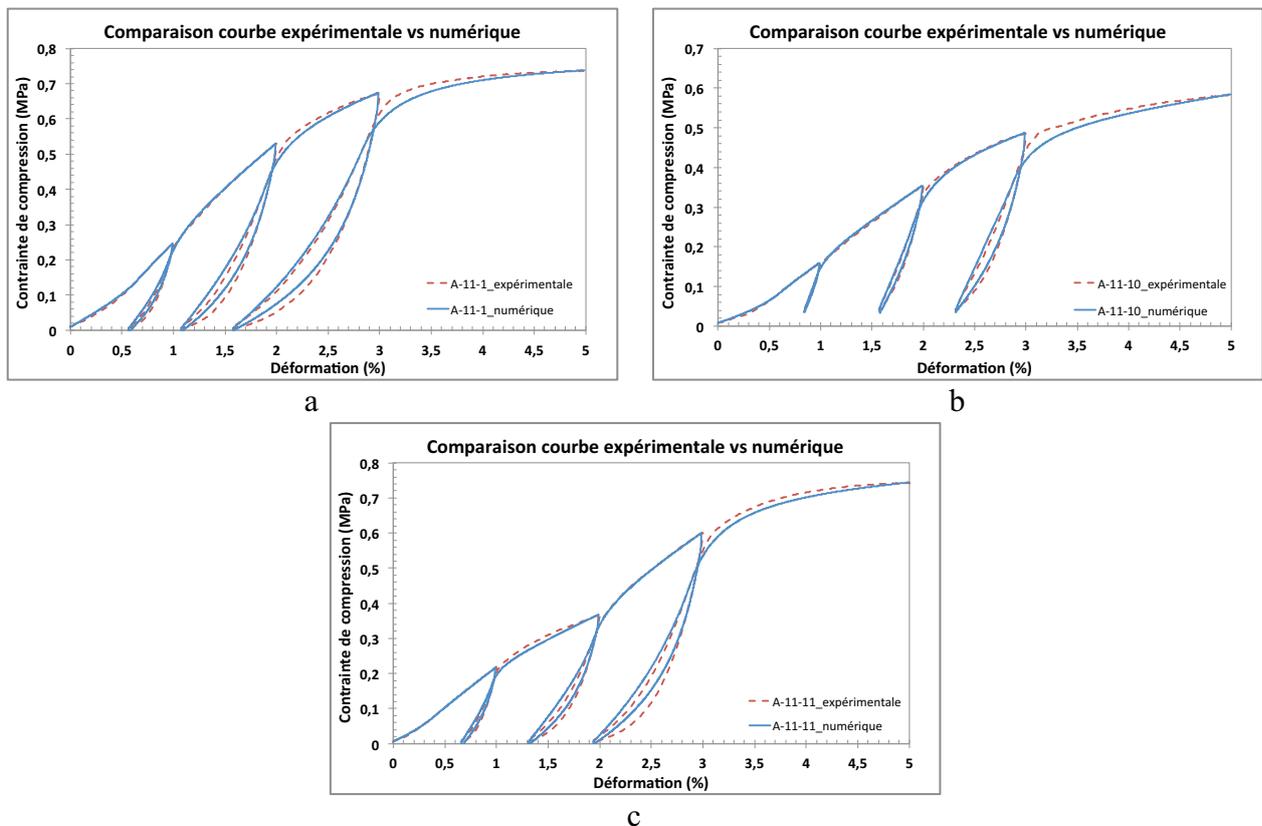


Figure 4-22: Comparaison des courbes expérimentales et numériques pour la formulation A.

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

A titre d'exemple, pour la formulation A, dans le cas de la troisième phase de chargement (PC3), les paramètres du modèle pour les courbes illustrées sur les figures 4-22.a-c sont donnés dans le tableau 4-11.

	$E_{m,3}$ (MPa)	$E_{c,3}$ (MPa)	$\sigma_{0,3}$ (MPa)	$E_{c,3}^-$ (MPa)	$\sigma_{0,3}^-$ (MPa)
A-11-1	81,38	9,19	0,202	24,90	-0,357
A-11-10	78,58	7,37	0,180	58,64	-0,028
A-11-11	79,39	19,44	0,112	32,0	-0,134

Tableau 4-11: Paramètres du modèle pour les courbes numériques, cas de la formulation A

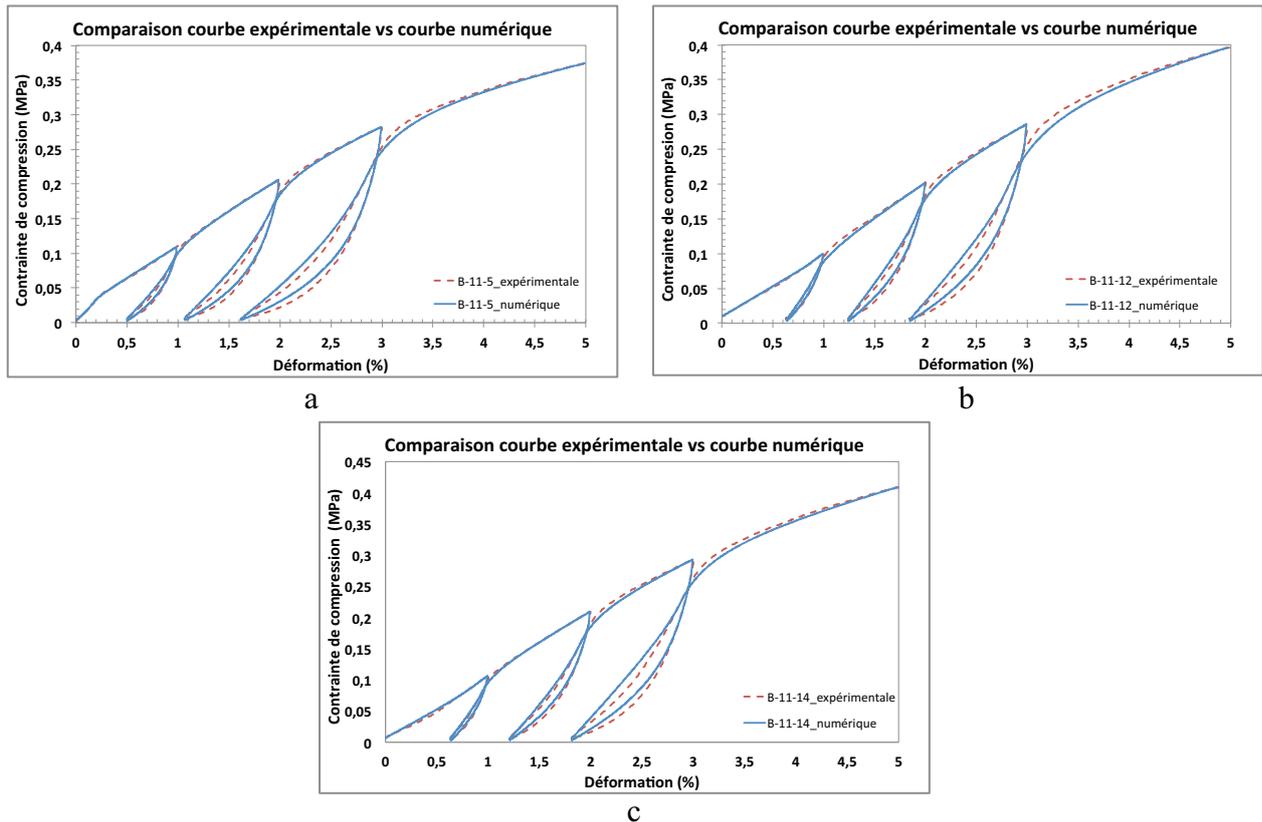


Figure 4-23: Comparaison des courbes expérimentales et numériques pour la formulation B.

Pour la formulation B, les paramètres du modèle pour les courbes illustrées sur les figures 4-23.a-c sont donnés dans le tableau 4-12.

	$E_{m,5}$ (MPa)	$E_{c,5}$ (MPa)	$\sigma_{0,5}$ (MPa)	$E_{c,5}^-$ (MPa)	$\sigma_{0,5}^-$ (MPa)
B-11-5	31,26	6,19	0,065	0,123	-0,076
B-11-12	34,21	7,61	0,058	0,183	-0,033
B-11-14	33,62	7,63	0,059	0,154	-0,077

Tableau 4-12: Paramètres du modèle pour les courbes numériques, cas de la formulation B

Par ailleurs, le modèle proposé a été exploité pour la représentation de la courbe enveloppe du comportement observé lors de la campagne expérimentale. Cette courbe enveloppe correspond à la courbe expérimentale monotone. Les figures ci-dessous illustrent les courbes enveloppes obtenues par le modèle pour les deux formulations. L'identification numérique des paramètres est également donnée dans les tableaux 4-13 et 4-14, où l'erreur maximale

Etude de l'impact de la méthode de calcul du module.

observée est indiquée dans la dernière colonne (en valeur absolue). Dans tous les cas, cette erreur reste inférieure à 0,05 MPa, ce qui justifie la grande précision du modèle proposé.

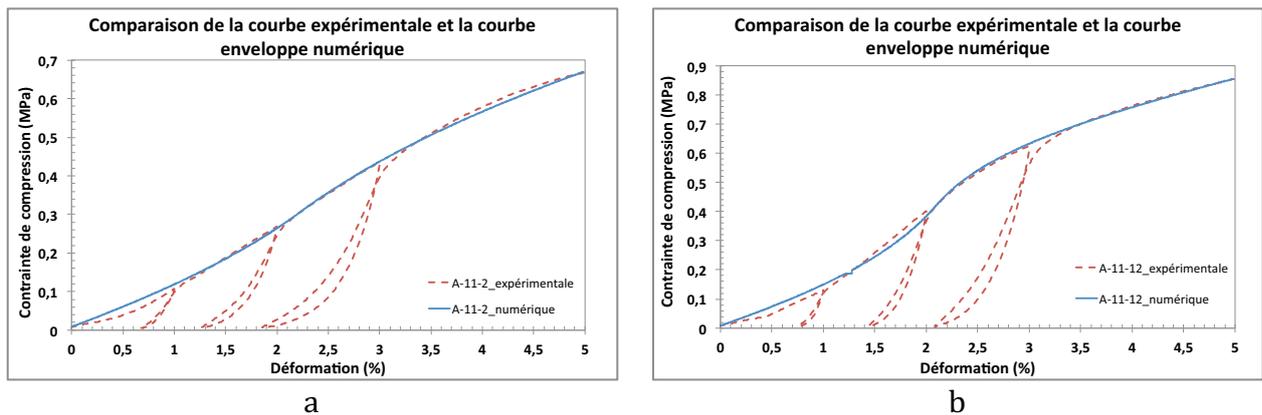


Figure 4-24: Comparaison des courbes expérimentales et courbes enveloppes numériques pour la formulation A.

	E_m (MPa)	E_c (MPa)	σ_0 (MPa)	E_c^- (MPa)	σ_0^- (MPa)	Erreur max. (MPa)
A-11-2	19,60	5,40	0,473	6,03	-0,355	0,0235
A-11-12	32,29	8,70	0,087	7,62	-0,201	0,0397

Tableau 4-13: Paramètre du modèle pour les courbes enveloppes, cas de la formulation A

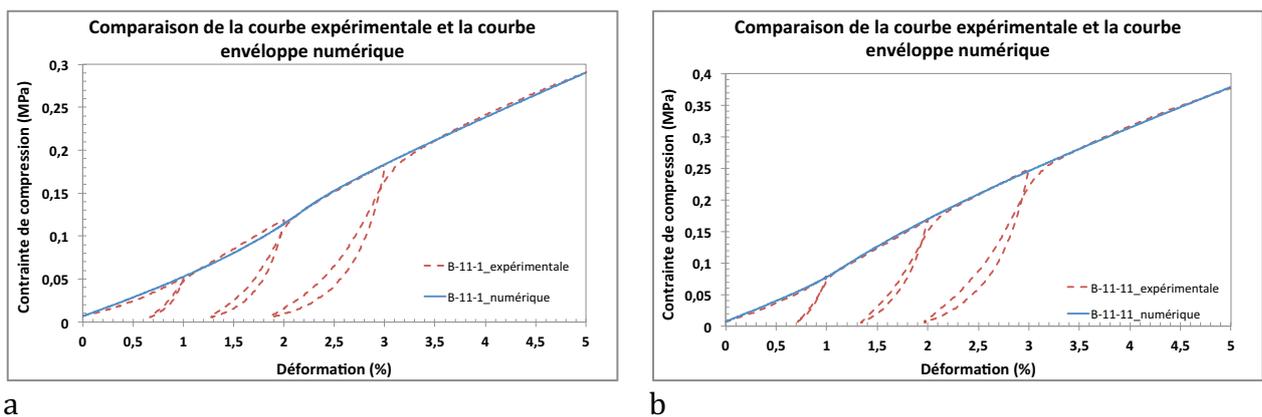


Figure 4-25: Comparaison des courbes expérimentales et courbes enveloppes numériques, pour la formulation B.

	E_m (MPa)	E_c (MPa)	σ_0 (MPa)	E_c^- (MPa)	σ_0^- (MPa)	Erreur max. (MPa)
B-11-1	8,60	5,04	0,240	3,05	-0,102	0,0065
B-11-11	10,32	5,44	0,135	5,94	-0,021	0,0033

Tableau 4-14: Paramètre du modèle pour les courbes enveloppes, cas de la formulation B

4.5.6 Conclusion

Le modèle proposé permet de décrire la loi de comportement mécanique du béton de chanvre. Grâce à ce modèle, il est possible de déterminer la courbe enveloppe correspondant à la courbe expérimentale issue du chargement monotone. Le modèle permet également de reproduire un cycle quelconque de chargement-déchargement, ce qui le rend utilisable dans les codes de calcul par éléments finis, pour le calcul du béton de chanvre sous chargement statique et variable.

Dans la mesure où le comportement mécanique du béton de chanvre dépend fortement de la teneur en liant, il serait intéressant de tester la validité du modèle proposé pour des formulations à fort dosage en liant. Pour rappel, les formulations A et B testées sont respectivement de moyen et faible dosages.

4.6 Conclusions et perspectives

Tout au long de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'impact des différentes méthodes de calcul du module disponibles dans la littérature. Différents types de modules ont été calculé en utilisant quatre méthodes : flottante, tangente, cyclique et écrouissage ainsi que cinq stratégies.

D'après notre étude, il a été mis en évidence ce qui suivent:

- les ressemblances entre certaines méthodes utilisées pour calculer les différents modules;
- la méthode tangente est un cas particulier de la méthode flottante;
- la méthode cyclique donne des valeurs faibles (tendance à sous-estimer les valeurs du module);
- la méthode d'écrouissage donne les valeurs comparables à celles des méthodes tangente et flottante;
- la stratégie 1 est un cas à part, avec des valeurs plus élevées;
- les stratégies 2, 4 et 5 donnent les valeurs comparables et quasi-identiques pour les stratégies 4 et 5;
- la stratégie 3 a tendance à sous-estimer les valeurs du module;
- grâce à sa faible dispersion et sa faible variation dans le temps, la méthode flottante semble être mieux adaptée que les méthodes tangente, cyclique et les différentes stratégies.

Après une étude comparative des différentes méthodes, un modèle permettant de décrire la loi de comportement mécanique du béton de chanvre a été proposé. Grâce à ce modèle, il est possible de déterminer la courbe enveloppe correspondant à la courbe expérimentale issue du chargement monotone. Il permet également de reproduire la courbe expérimentale issue d'un chargement cyclique.

En perspective, dans la mesure où le comportement mécanique du béton de chanvre dépend fortement de la teneur en liant, il serait intéressant de tester la validité du modèle proposé pour des formulations à fort dosage en liant. Par ailleurs, cette loi de la courbe enveloppe peut être ensuite exploitée pour la détermination des points maîtres dans un cadre général permettant l'implémentation dans un code calcul par éléments finis.

Chapitre 5: Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

Introduction

Le problème d'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre a fait l'objet de quelques études dans la littérature [19,32,92]. Nous avons mis en évidence dans le chapitre 2 la nécessité d'une étude approfondie sur ce sujet. En effet, les études réalisées précédemment n'ont pas envisagé une large variabilité des chènevottes. De plus, dans la démarche de sélection de la chènevotte à utiliser, seules la taille de particule [32] et leur origine [92] sont prises en compte pour différencier les chènevottes. De notre part, nous avons proposé une démarche de classification et de sélection basée sur l'analyse multicritère.

Dans le présent chapitre, nous présentons les résultats de l'étude sur les bétons de chanvre fabriqués en utilisant différents types de chènevotte, dont la sélection résulte de notre démarche d'analyse multicritère présentée au chapitre 2. Dans un premier temps, nous présentons les résultats obtenus pour la masse volumique, la contrainte de compression, les modules et la conductivité thermique. Après cette présentation des résultats bruts, nous présenterons une étude réalisée sur la variabilité des résultats en fonction du nombre d'échantillons utilisée. Cette étude permettra en effet, de déterminer le nombre d'éprouvettes nécessaires pour un résultat statistiquement significatif. Par ailleurs, au delà des résultats bruts, une analyse de la variabilité des propriétés permettra de mettre en évidence l'impact du type de chanvre sur ces dernières. Nous présenterons également, la variabilité des résultats vis-à-vis du type d'éprouvette (cylindrique ou cubique), en nous intéressant à l'orientation des particules ainsi qu'à l'effet de forme de l'éprouvette. Nous présentons ensuite une étude de corrélation pour mettre en évidence d'éventuelles relations entre les différentes propriétés étudiées. Avant de conclure, nous présentons une étude basée sur la classification multicritère entre différents bétons de chanvre, dans le but de mettre en évidence les liens entre la classification des chènevottes et les propriétés des bétons de chanvre.

5.1 Contexte et paramètres de l'étude

5.1.1 Caractéristiques des chènevotte utilisées

Les caractéristiques des chènevottes utilisées ont été discutées au chapitre 2. Lors de la fabrication des éprouvettes, nous avons déterminé la teneur en eau des chènevottes.

5.1.1.1 Teneur en eau à la fabrication

Des échantillons d'environ 250 gr de chaque type de chènevotte ont été prélevés lors de la fabrication des éprouvettes. Ils ont été mis à l'étuve à 60°C pendant une semaine et ont été pesés pour déterminer la teneur en eau. La teneur en eau observée est comprise entre 7,12% et 8,30% avec une moyenne de 7,88% (tableau 5-1). Les types d'essais (principaux et secondaires) ont été définis au chapitre 2 et sont rappelés en 5.1.2.4.

Types d'essais	Type de chanvre	Masse initiale avec eau (g)	Masse finale sans eau (g)	Masse d'eau évaporée (g)	Teneur en eau (%)
Principaux	C2	241,63	221,6	20,03	8,29
	C4	244,3	224,41	19,89	8,14
	C5	251,77	230,87	20,9	8,30
	C12	253,39	232,77	20,62	8,14
Secondaires	C3	245,67	227,86	17,81	7,25
	C6	250,44	230,23	20,21	8,07
	C10	248,88	231,17	17,71	7,12
	C11	250,61	231,92	18,69	7,46
	C13	248,48	228,28	20,2	8,13
Minimum					7,12
Maximum					8,30
Moyenne					7,88
Ecart-type					0,47

Tableau 5-1: Teneur en eau des chènevottes lors de la fabrication d'éprouvettes

La teneur en eau observée est presque identique pour l'ensemble des chènevottes puisque ces dernières ont été stockées dans les mêmes conditions. Les légères différences constatées peuvent être justifiées par la nature des chènevottes et leur capacité à absorber l'humidité ambiante. Une autre source de différence peut résider dans le fait que ces granulats étaient stockés dans deux types de sacs différents (plastique et carton).

5.1.2 Préparation des éprouvettes

5.1.2.1 Fabrication des éprouvettes

Les essais de caractérisation des granulats ont été réalisés sur 13 types de chanvre (voir le chapitre 2). Parmi ces granulats, neuf types ont été utilisés pour la confection des éprouvettes. Dans l'idéal, l'ensemble des granulats aurait dû être utilisé mais ceci n'a pas été possible pour deux raisons principales : la quantité insuffisante pour les chanvres C7, C8 et C9 et l'endommagement du chanvre C1 dû à l'incompatibilité du malaxeur initialement utilisé. En effet, le malaxeur pour le béton classique n'est pas adéquat dès lors qu'il s'agit du béton de chanvre (cf. § 5.1.2.2). Les chanvres C8 et C9 ont été utilisés dans l'étude du RRT3, (chapitre 3) dont les résultats pourraient être éventuellement considérés, même si les conditions dans lesquelles l'étude du RRT3 a été réalisée ne sont pas similaires à celles de la présente étude.

5.1.2.2 Choix du type de malaxeur

Le malaxeur classique est doté de pales principales et secondaires montées sur axes rotatifs verticaux (figures 5-1 a). Seules les pales principales sont motorisées et permettent le malaxage. Au moment du malaxage les pales secondaires sont alors entraînées par le mélange du béton en sens inverse à celui des pales principales. Cette mise en mouvement des pales secondaires permet d'assurer la bonne homogénéité du mélange. Dans le cas du béton de chanvre, ce dernier étant léger, il devient difficile d'entraîner les pales secondaires. Au contraire, le béton de chanvre se trouve coincé dans les pales formant ainsi une sorte de bloc qui tourne dans le malaxeur sans que les constituants se mélangent correctement. Ce qui rend finalement ce type de malaxeur inapproprié pour le béton de chanvre.



Figure 5-1: Différents types de malaxeur a. classique et b. adapté au béton de chanvre

Un malaxeur à axe rotatif horizontal avec les pales ramifiées est plus adapté pour le béton de chanvre (figure 5-1 b). Du fait que l'ensemble des pales soit ramifié sur un axe motorisé et à plus forte raison de sa possibilité à tourner dans les deux sens, il devient alors plus pratique de mélanger correctement le béton de chanvre. Il convient de remarquer que la qualité du malaxage est appréciée à l'œil nu ; à ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas une méthode pour mesurer la qualité de malaxage du béton de chanvre.

5.1.2.3 Etiquetage des éprouvettes

Afin de permettre l'identification des éprouvettes, l'étiquetage a été adopté et synthétisé dans le tableau 5-2.

Codage du type d'essai	Codage du type de chanvre	Codage de l'éprouvette	Numéro de l'éprouvette
P : Principal S : Secondaire	C1 à C13	11 : Cylindrique (11x22cm) 15 : Cubique (15x15x15 cm)	de 1 à n dans chaque type d'essai.

Tableau 5-2: synthèse des codes d'étiquetage des éprouvettes

A titre d'exemple, la numérotation de l'éprouvette «P-C2-11-2» désigne : l'essai principal, chanvre brut TREMARGAT (C2), éprouvette cylindrique 11x22 cm avec le N°2.

5.1.2.4 Synthèse de la campagne d'essais

Les essais réalisés ont été proposés et détaillés à la fin du chapitre 2, un rappel synthétique est donné dans le tableau 5-3.

Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

Echéance (Dates)		05/05/15	09/06/15	16/07/15	08/10/15		
Essais principaux							
Type d'éprouvette		11x22cm	15x15x15cm	11x22cm	11x22cm	11x22cm	15x15x15cm
Type de chanvre	C2	9	3	6	6	6	3
	C4	9	3	6	6	6	3
	C5	9	3	6	6	6	3
	C12	9	3	6	6	6	3
Total par échéance/type d'éprouvette		36	12	24	24	24	12
Total essais principaux		132					
Essais secondaires							
Type de chanvre	C3	3				3	
	C6	3				3	
	C10	3				3	
	C11	3				3	
	C13	3				3	
Total par échéance/type d'éprouvette		15				15	
Total essais principaux		30					
Total global		162					

Tableau 5-3: Récapitulatifs des essais réalisés par échéances, type d'éprouvette et de chanvre

D'après les dates de réalisation des essais (tableau 5-3) et compte tenu de la date de fabrication des éprouvettes (02/04/2015), les essais ont eu lieu après 34 jours, 68 jours, 105 jours et 188 jours. Dans la suite, pour simplifier nous utilisons les notations essais à 30j, 60j, 90j et 180j, respectivement.

5.1.2.5 Formulation utilisée « type mur »

Nous avons utilisé la formulation de type mur avec 250 kg/m³, sur la base des essais à réaliser (types et nombres d'éprouvettes), nous avons calculé les quantités nécessaires par type d'essai pour chaque type de chanvre. Ainsi, pour les essais principaux avec 27 éprouvettes cylindriques et 6 éprouvettes cubiques, il nous faut au total 92 litres (tableau 5-4). Cette quantité prend en compte une majoration du volume de 20%. Pour simplifier les calculs, nous optons pour une gâchée de 95 litres.

Type d'essais	Taille d'éprouvette	Volume d'éprouvette	Nombre d'éprouvette	Volume total	Volume+20% excès m ³	Volume+20% % excès L
Principaux	11x22cm	0,00209	27	0,05642	0,06770	67,70531
	15x15x15cm	0,00338	6	0,02025	0,02430	24,30000
	Total					0,09201
Secondaires	11x22cm	0,00209	6	0,01254	0,01505	15,04563
	Total					0,01505

Tableau 5-4: Quantité nécessaire pour les essais principaux et secondaires

De la même façon, pour les essais secondaires avec 6 éprouvettes par type de chanvre, il nous faut 15 litres (tableau 5-4). En considérant une masse volumique moyenne en vrac de 120 kg/m³ pour la chènevotte, on obtient les quantités nécessaires des constituants pour les gâchées de 95 litres et 15 litres pour les essais principaux et secondaires, respectivement (tableau 5-5).

Type d'essai	Volume gâchée (L)	Chènevottes (kg)	Liant (kg)	Eau (L)	Eau/Liant	Chènevotte/Liant
Principaux	95	11,4	23,75	28,5	1,2	0,48
Secondaires	15	1,8	3,75	4,5	1,2	0,48

Tableau 5-5: Quantité nécessaire des constituants par gâchées de 95 litres et 15 litres

5.1.2.6 Remplissage des moules

Pour un type de chanvre donné, le remplissage de moule s'est fait librement à la main en trois ou quatre couches environ. D'une couche à l'autre, on effectue un grattage de la face supérieure, ce qui permet un bon accrochage. Dans ces conditions, un moule modèle est rempli puis pesé, ainsi les autres éprouvettes sont fabriquées en respectant la même masse. Cette astuce permet de contrôler indirectement l'énergie de compactage au sein d'un même type de chanvre.

Une seule personne s'est chargée de remplir les moules modèles, afin de permettre de contrôler l'énergie de compactage entre les moules cylindriques et cubiques ou encore entre les différents types de chanvre. Toutefois, cette stratégie ne permet pas d'éliminer totalement les variabilités de mise en œuvre, car une personne ne peut pas maintenir exactement la même énergie de compactage pour chaque éprouvette modèle.

5.1.3 Conditions de séchage

A l'issue de l'étape de fabrication, les éprouvettes sont laissées dans leurs moules. En effet, étant donné que la prise du béton de chanvre se fait lentement, les éprouvettes sont laissées dans leurs moules durant plusieurs heures. De plus, vu la difficulté de démoulage notamment pour les éprouvettes cylindriques, il n'est pas prudent de démouler tout de suite. Car l'éprouvette n'est pas assez solide et risque de s'effondrer. En revanche, les moules cubiques de par leur forme, présentent la facilité de démoulage ; dans ce cas, il est en effet possible de démouler tout de suite. Toutefois, par mesure de prudence, nous avons démoulé après trois jours pour les deux types d'éprouvettes. A l'issue du démoulage, nous distinguons deux type de séchage à savoir : le séchage à l'air libre et le séchage à l'étuve qui précède les essais de compression et thermique.

5.1.3.1 Séchage à l'air libre

Le séchage s'est effectué dans un hall d'essai pendant environ 6 mois (photo 5-1). Dans la mesure où les conditions climatiques de ce local ne sont pas maîtrisées, les éprouvettes étaient exposées à la variation de température et d'humidité relative qui sont enregistrées et tracées sur la figure 5-2.

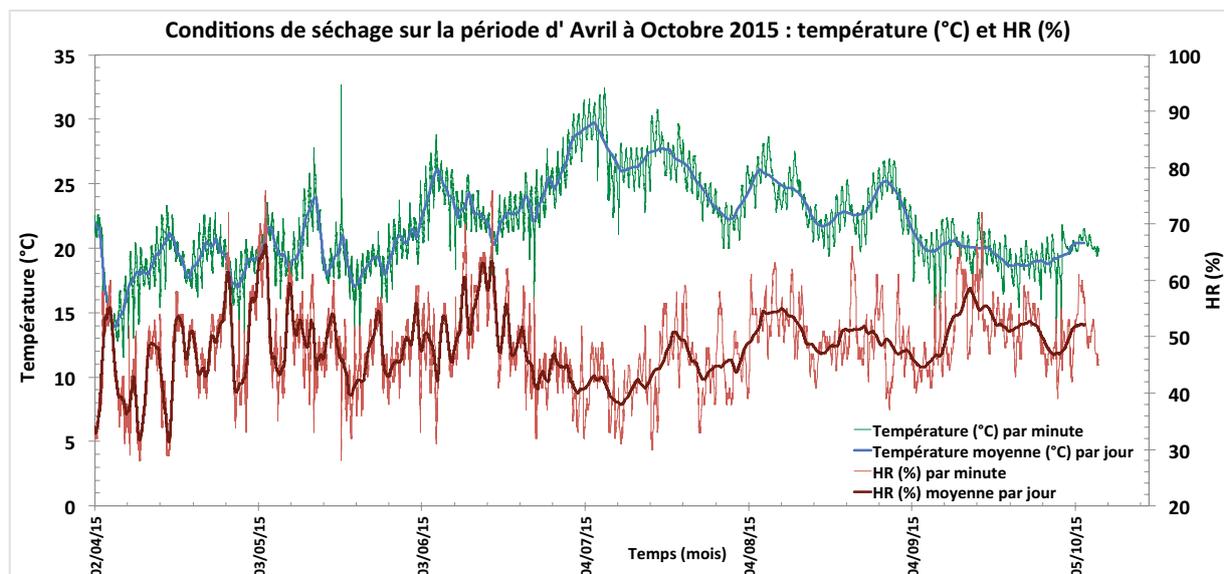


Figure 5-2: Suivi de température et d'HR du local de séchage des éprouvettes



Photo 5-1: Séchage des éprouvettes à l'air libre

Au cours de la période de séchage, d'après la courbe de température et d'humidité relative, (figure 5-2), la température enregistrée est comprise entre 14 et 30°C avec en moyenne 21°C et un écart-type de 3°C. Par ailleurs, l'humidité relative du local est comprise entre 31 et 66% avec en moyenne 48% et un écart-type de 6%.

5.1.3.2 Séchage à l'étuve

Le séchage à l'air libre ne permet pas d'éliminer toute la quantité d'eau contenue dans l'éprouvette. Afin d'éliminer au maximum cette quantité, il est nécessaire de procéder à un séchage à l'étuve (photo 5-2).



Photo 5-2: Séchage des éprouvettes à l'étuve

Comme nous l'avons vu précédemment au chapitre 1, plusieurs protocoles existent dans la littérature pour un séchage préalable avant essais. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons séché les éprouvettes à 60°C pendant 48 heures au minimum. Ce qui correspond à une variation de masse inférieure à 0,1% entre deux pesées consécutives sous 24 heures. On suppose ainsi que la quantité d'eau est quasi-évacuée. Plus tard dans ce chapitre, nous verrons comment la quantité d'eau évaporée influe sur la variation de la masse volumique du béton de chanvre.

5.1.4 Protocole d'essai et méthode de calcul du module

A la sortie de l'étuve, les éprouvettes sont soumises aux essais de conductivité et de compression. Le protocole utilisé pour l'essai de compression a été présenté au chapitre 3 (§ 3.1.3) ; la méthode de mesure de la conductivité thermique est illustrée en § 5.4.5. Par ailleurs, les modules apparent et élastique ont été calculés par la méthode flottante (§4.2.1).

5.2 Résultats expérimentaux de l'étude

5.2.1 Réponse mécanique selon le type de chanvre

Trois comportements mécaniques du béton de chanvre sont observés vis-à-vis des types de chènevotte utilisée. Ils sont caractérisés par les différents niveaux de déformation :

- Faible niveau de déformation : on constate d'une part une faible déformation, d'environ 3%, de telle sorte que la contrainte de compression maximale apparaisse dans certains cas lors du 2^{ème} cycle de chargement avant la fin de l'essai.
- Niveau de déformation modéré : d'autre part, nous avons un autre comportement intermédiaire, caractérisé par des niveaux de déformation moyens avec une contrainte maximale à environ 5% de déformation.
- Fort niveau de déformation : par ailleurs, on a de forts niveaux de déformation, l'éprouvette est compressible jusqu'à plus de 20%, niveau maximal imposé.

Dans l'illustration donnée plus bas, nous présentons avec les photos (de gauche vers à droite) avant et après l'essai avec la courbe contrainte-déformation (figures 5-3 à 5-5) pour les trois comportements.

Le faible niveau de déformation est rencontré pour le chanvre ayant une taille de particule faible (1,36 mm² de surface moyenne d'une particule) et une surface moyenne spécifique élevée (18822 mm²/3g), tel que le chanvre C13. En effet, pour ce type de chanvre, les particules empêchent la bonne liaison avec la matrice liante ce qui fragilise l'ensemble et

Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

résulte en une faible résistance. La rupture est caractérisée par un écrasement total de l'éprouvette, figure 5-3 b.

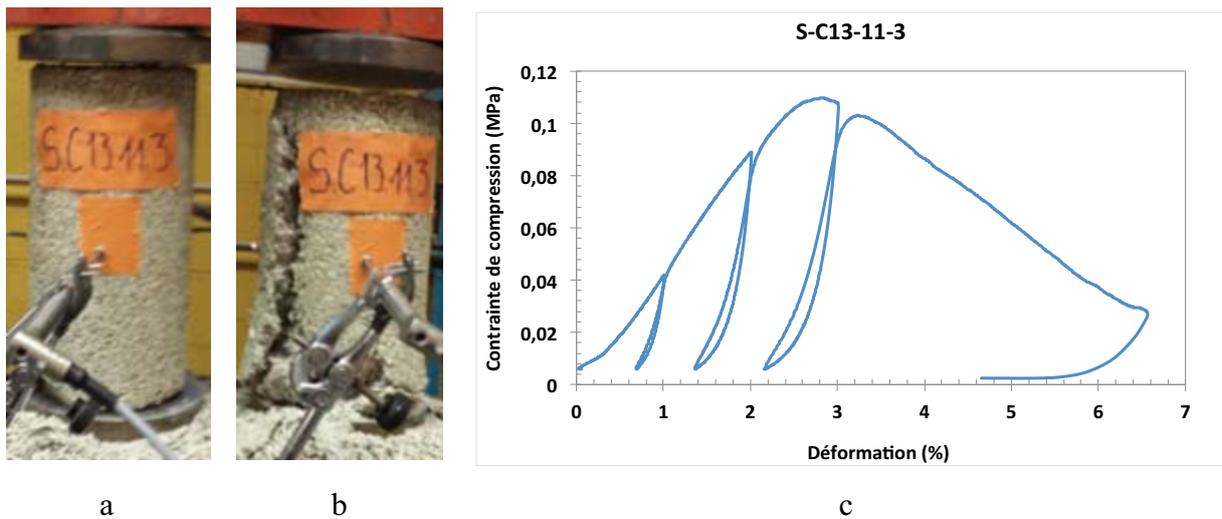


Figure 5-3: Comportement du béton de chanvre à faible déformation

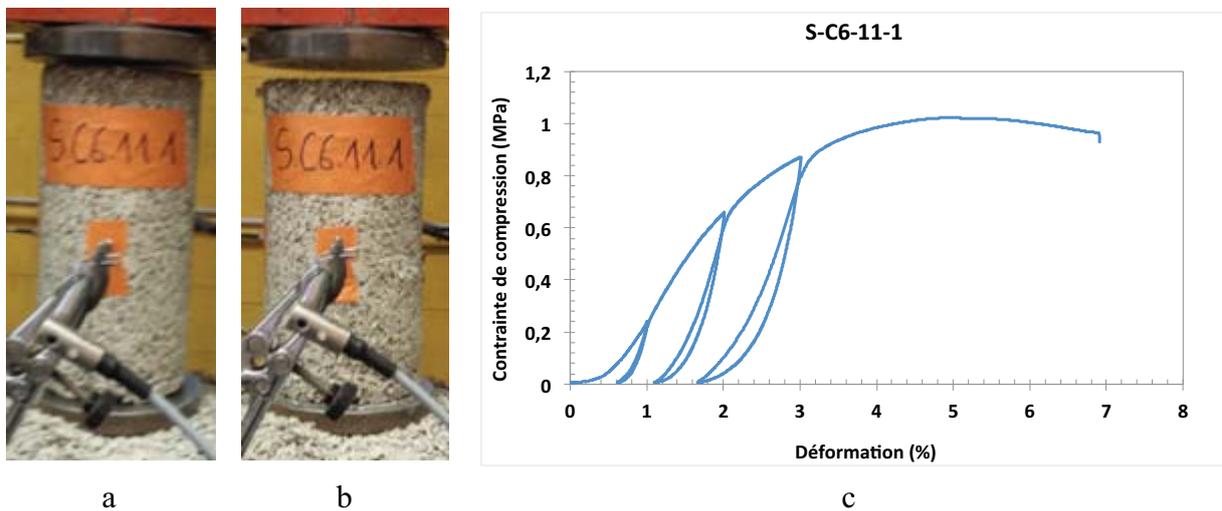


Figure 5-4: Comportement du béton de chanvre à déformation modérée

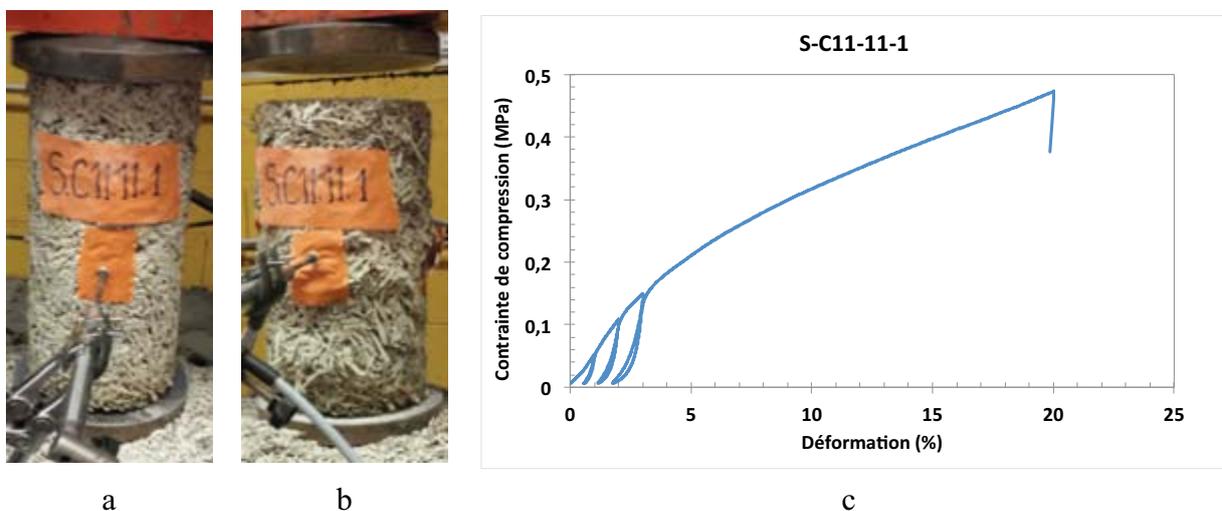


Figure 5-5: Comportement du béton de chanvre à fort déformation

Dans le cas de forte déformation, les particules de chanvre se réarrangent comme un empilement de strates. En effet, ce réarrangement est facilité par la taille des particules induisant un bon chevauchement des particules les unes contre les autres. Par ailleurs, il est possible que la forte capacité d'absorption d'eau (340% au bout de 48 heures) pour ce type de chanvre amplifie le niveau de déformation. En effet, l'eau nécessaire à la prise et au durcissement du liant étant absorbée par le chanvre, il se passe probablement un phénomène de fausse prise. Suite à ce phénomène, la matrice liante ne joue plus ce rôle mécanique, on observe alors pour le béton de chanvre un comportement similaire à celui du granulat de chanvre, caractérisé par une grande déformation (figure 5-5 c). Il convient de souligner que ces constatations ne sont pas forcément généralisables sur l'ensemble des chènevottes étudiées. Ce qui laisse penser que l'interaction chimique entre le liant et les chènevottes utilisées peut contribuer également à la réponse mécanique observée.

L'étude de la composition chimique et celles des molécules faiblement liées aux parois végétales « extractibles » peuvent permettre de mieux comprendre l'impact de l'interaction chimique liant-chènevotte sur la prise et le durcissement du béton de chanvre. Dans une étude antérieure [38], il a été démontré que ces composés chimiques « extractibles » affectent significativement la prise hydraulique des liants.

5.2.2 Propriétés du béton de chanvre

Comme nous l'avons vu à la section 5.1.2.4, les essais ont été effectués à quatre échéances, sur différents types de chanvre en considérant un nombre donné d'éprouvettes (3 à 9 selon la configuration). Dans la mesure où la variabilité des résultats dans le temps n'est pas considérable (§ 5.4), le choix est fait ici de ne présenter en détail que les résultats à 30j. Pour les autres échéances, nous présenterons une synthèse des résultats sous formes de moyennes, écarts-types, etc. ; les autres détails sont donnés en annexe B.

5.2.2.1 Masse volumique

Les résultats de la masse volumique présentés sur la figure 5-6 sont ceux obtenus après séchage des éprouvettes à l'étuve avant les essais de compression et thermique. Nous observons des valeurs variant de 385 kg/m³ à 480 Kg/m³ pour les chanvres C3 et C10, respectivement. L'étude antérieure sur la masse volumique (chapitre 3) avait montré une faible dispersion pour les essais réalisés dans le contexte similaire (sur une seule formulation). Ceci semble être le cas dans le contexte actuel. Néanmoins, on observe des dispersions vis-à-vis du type de chanvre utilisé. Cet aspect est analysé en détail dans la partie consacrée à l'analyse de la variabilité selon le type de chanvre (§ 5.4.1).

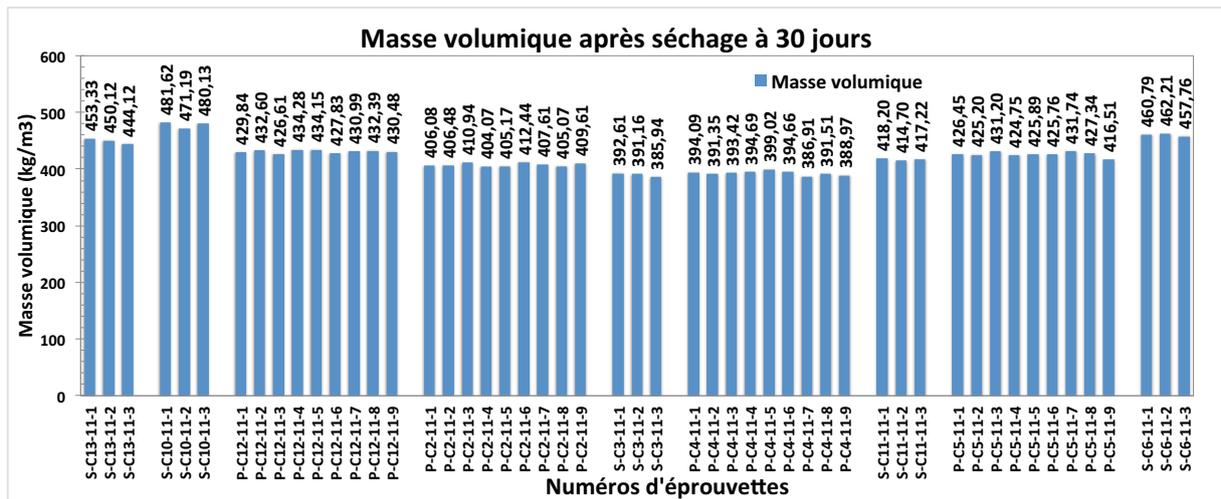


Figure 5-6: Masse volumique après séchage de différents types de chanvre à 30j

5.2.2.2 Contrainte de compression maximale

Contrairement au cas précédent, les résultats de contrainte de compression révèlent des dispersions considérables à deux niveaux. Dans un premier temps, nous observons la variabilité vis-à-vis du type de chanvre avec un facteur 10 entre la valeur minimale et maximale observées, en particulier entre les chanvres C13 et C6, respectivement (figure 5-7). Dans un deuxième temps, nous observons des dispersions non négligeables au sein d'un type de chanvre donné. A titre d'exemple, nous avons un minimum de 0,47 MPa et 0,65 MPa avec un maximum de 0,65 MPa et 0,99 MPa pour les chanvres C2 et C5, respectivement (figure 5-7). Cette variabilité intrinsèque du matériau, montre dans quelle mesure il est nécessaire de tenir compte du nombre d'échantillons nécessaire pour un résultat significatif. Pour l'instant, nous nous limitons à la présentation des résultats obtenus, l'analyse vis-à-vis du type de chanvre est détaillée en 5.4.2. Par ailleurs, une étude sur le nombre d'échantillons nécessaire pour un résultat statistiquement significatif est proposée en § 5.3.

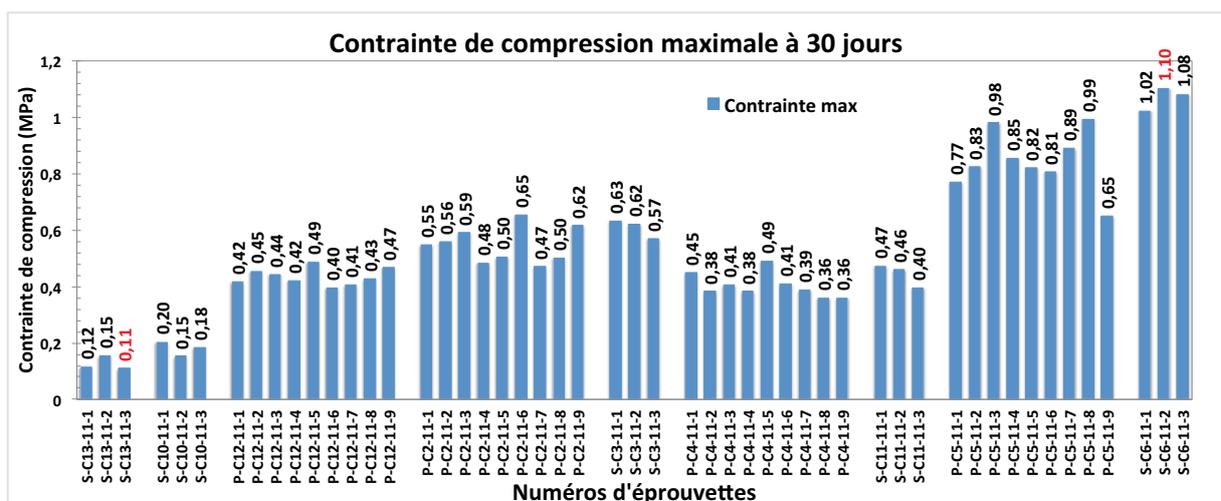


Figure 5-7: Contrainte de compression maximale de différents types de chanvre à 30j

5.2.2.3 Module apparent et élastique

Les dispersions constatées pour la contrainte sont confirmées dans le cas du module. Cependant, les résultats du module apparent permettent de se rendre compte que pour certains types de chanvre les résultats sont moins dispersés par rapport à d'autres. C'est le cas notamment du chanvre C12 caractérisé par de faibles dispersions, comparativement aux autres chanvres (figure 5-8). D'ailleurs, ce caractère peu dispersé pour C12, bien qu'il soit moins marqué, reste observable pour la contrainte de compression avec des valeurs de l'ordre de 0,4 MPa (figure 5-7).

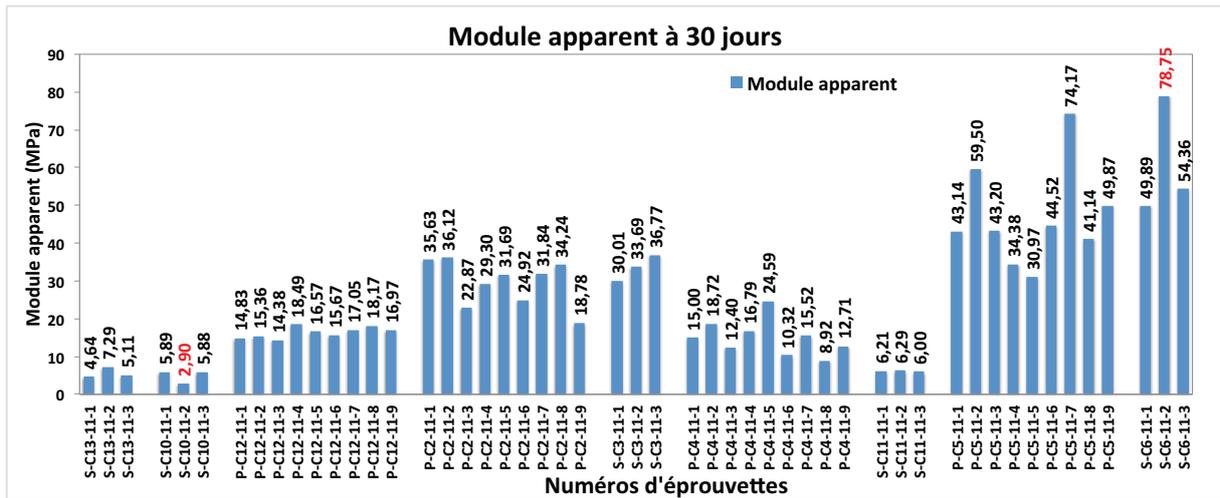


Figure 5-8: Module apparent de différents types de chanvre à 30j

Les mêmes tendances sont également observées pour le module élastique. Là aussi, nous observons de faibles dispersions pour le chanvre C2. Ces résultats mettent en évidence encore une fois, la sensibilité de la variabilité vis-à-vis de la propriété considérée et bien entendu de sa méthode de mesure. Pour rappel, cette problématique associée à la méthode de calcul des modules a été abordée au chapitre 4.

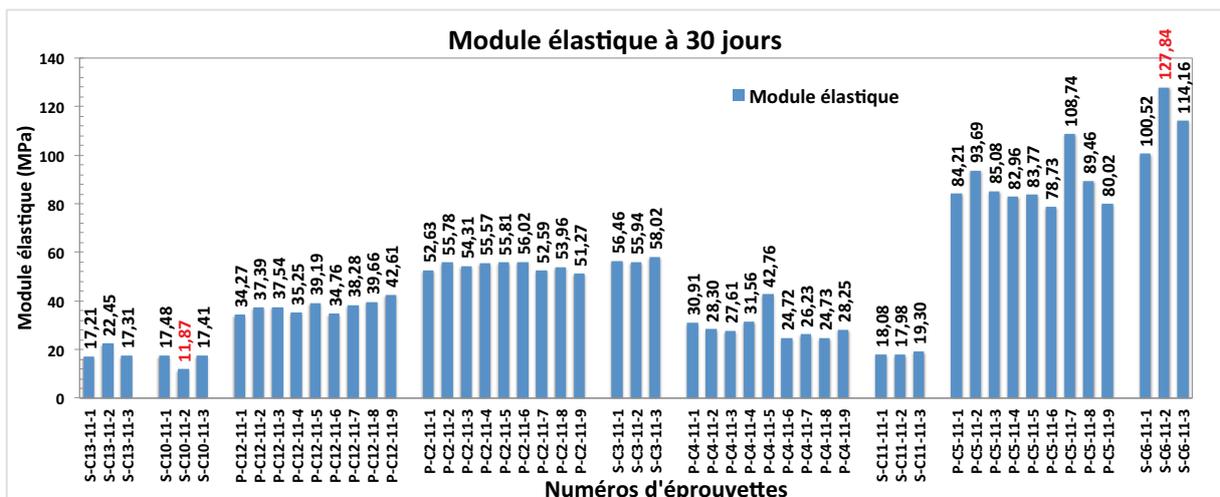


Figure 5-9: Module élastique de différents types de chanvre à 30 j

Après cette présentation des résultats bruts, avant d'aborder une analyse approfondie de leurs variabilités, nous allons nous intéresser dans un premier temps, à une étude du nombre d'échantillons nécessaire pour un résultat statistiquement significatif.

5.3 Nombre d'éprouvettes statistiquement significatif

Les analyses de la variabilité obtenue sur les différentes propriétés ont permis d'identifier que le nombre d'échantillons utilisé peut occasionner des dispersions. Dans une étude menée par Almeida F.M et al. [104] sur la variabilité de propriétés du béton auto-plaçant, les auteurs soulignent l'importance du nombre d'échantillons pour un résultat significatif. A ce jour, et à notre connaissance, ce problème n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie dans le cas du matériau béton de chanvre.

Actuellement, trois échantillons sont considérés comme suffisamment significatif pour l'essai sur les matériaux classiques comme le béton ordinaire par exemple. Ce même nombre est aussi utilisé pour le béton de chanvre malgré le manque de connaissance sur sa précision. Dans cette partie, nous cherchons à comprendre l'impact du nombre d'échantillons sur les résultats obtenus. Les propriétés du béton de chanvre considérées sont : la masse volumique sèche, la contrainte de compression maximale, le module apparent et élastique. L'analyse est faite sur les résultats des essais principaux à 30 jours, tableau 5-3. En effet, cette échéance est intéressante car nous avons des lots de 9 échantillons par type de chanvre.

Un lot de 9 échantillons permet de former plusieurs lots de 3, 4, 5 échantillons, etc. Pour former ces échantillons, soit on peut procéder à un tirage sans ou avec remise. Dans la constitution des lots, nous avons fait un choix simple qui correspond à ce qu'on peut faire en pratique. Nous commençons d'abord par 3 éprouvettes, ensuite nous ajoutons la 4^{ème} puis la 5^{ème} jusqu'à la 9^{ème}. Le but ici est d'arriver à mettre en évidence la précision du résultat obtenu lorsque le nombre d'échantillons augmente. Avec cette démarche nous avons alors pour chaque type de chanvre 7 lots, numérotés de 1 jusqu'à 7. Pour une meilleure identification de ces lots, nous proposons une numérotation complémentaire d'un lot (tableau 5-6). Elle consiste à mettre le numéro de chanvre puis le numéro du lot. A titre d'exemple, C4-6 est le 6^{ème} lot (constitué de 8 éprouvettes) pour le chanvre C4.

N° lot	Ci-1	Ci-2	Ci-3	Ci-4	Ci-5	Ci-6	Ci-7
Nombre d'échantillons	3	4	5	6	7	8	9

Tableau 5-6: Principe de numérotation des lots (ou sous-échantillon) analysés

L'analyse des valeurs moyennes, minimales, maximales et en particulier l'intervalle de confiance, permet d'apprécier la précision et la qualité des résultats obtenus par lot. Par ailleurs, une analyse comparative entre la distribution théorique et la distribution observée dans chacun des lots permet une meilleure appréciation de la qualité des résultats obtenus.

L'étude étant réalisée sur 4 types de chanvre (C2, C4, C5 et C12) en tenant compte des 4 propriétés, avec 7 lots à chaque fois, il n'est pas pratique de présenter tous les résultats obtenus. Ainsi, nous nous limitons à une propriété par type de chanvre, avec les lots Ci-1, Ci-6 et Ci-7 (figures 5-10 à 5-13). Les autres résultats sont par ailleurs discutés et donnés en annexe C. Parmi les outils utilisés, nous distinguons entre autre : les diagrammes à moustaches indiquant notamment les valeurs moyennes, minimales et maximales, les diagrammes Q-Q qui indiquent les distributions théoriques et expérimentales (figures 5-42 à 5-56). Nous avons aussi les diagrammes avec les valeurs moyennes et leurs intervalles de confiance pour l'ensemble des chanvres analysés (figures 5-58 à 5-61).

5.3.1.1 Masse volumique après séchage

Avant de présenter les résultats, il est à rappeler que pour une analyse complète, en cas de besoin, nous faisons appel aux résultats donnés en annexe C. La valeur moyenne de la masse volumique varie lorsqu'on augmente le nombre d'échantillons. Cette variation étant aléatoire, on observe soit une diminution, cas du chanvre C2, (figure 5-42 a), soit une augmentation C12 (figure 5-45 a). Malgré cette variation, il convient de noter que les valeurs moyennes obtenues pour les différents lots sont voisines avec une amplitude de l'ordre de 2 kg/m^3 entre la valeur minimale et maximale. En général, au-delà de 5 échantillons, cette moyenne devient stable. On observe également qu'au bout de 6 échantillons, le lot contient déjà la valeur minimale et maximale. De plus, on observe la diminution de l'amplitude de l'intervalle de confiance lorsque le nombre d'échantillons augmente, elle passe de 8 kg/m^3 à 3 kg/m^3 (figure 5-60 a). Cette amélioration de la qualité des résultats est par ailleurs observée sur les diagrammes Q-Q. Plus le nombre d'échantillons augmente, plus les résultats expérimentaux sont proches de la distribution théorique, les points sont alors alignés par rapport à la première bissectrice, comme le montre la figure 5-10 d par exemple.

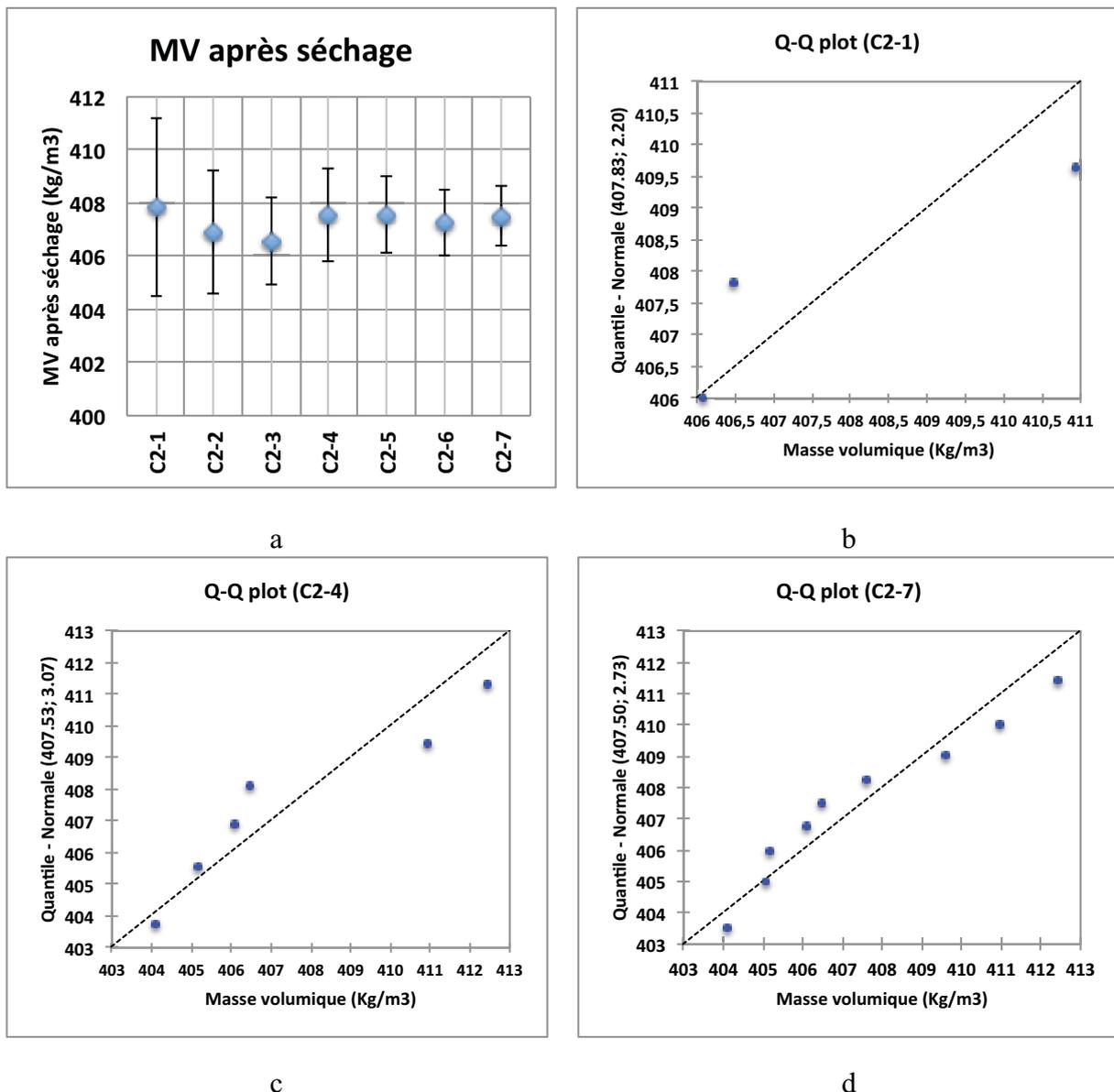


Figure 5-10: Nombre significatif d'échantillon b=3 ; c=6 et d=9 ; pour la masse volumique à 30j: C2.

En conclusion, l'augmentation du nombre d'échantillons permet d'obtenir un meilleur résultat de bonne précision avec un intervalle de confiance faible et une bonne corrélation entre les valeurs observées et la distribution théorique. Cependant, dans la mesure où la moyenne obtenue reste du même ordre de grandeur quel que soit le nombre d'échantillons (3 à 9), le lot avec trois échantillons peut être considéré en pratique. Avec ce choix, l'intervalle de confiance maximal observé est de 8 kg/m^3 , cas du chanvre C5 (figure 5-60 a). Il permet par ailleurs de limiter le coût et le temps associé à la fabrication et à la réalisation d'essais.

5.3.1.2 Contrainte maximale de compression

Lors de la détermination expérimentale de la contrainte de compression, l'augmentation du nombre d'échantillons entraîne également une variation aléatoire de la valeur moyenne d'un lot à l'autre. Malgré l'amplitude significative observée entre les valeurs minimale est maximale (variant jusqu'à $0,35 \text{ MPa}$ dans certains cas, chanvre C5, figure 5-48 b), il est intéressant de remarquer que la moyenne est stable dès le lot de 3 échantillons.

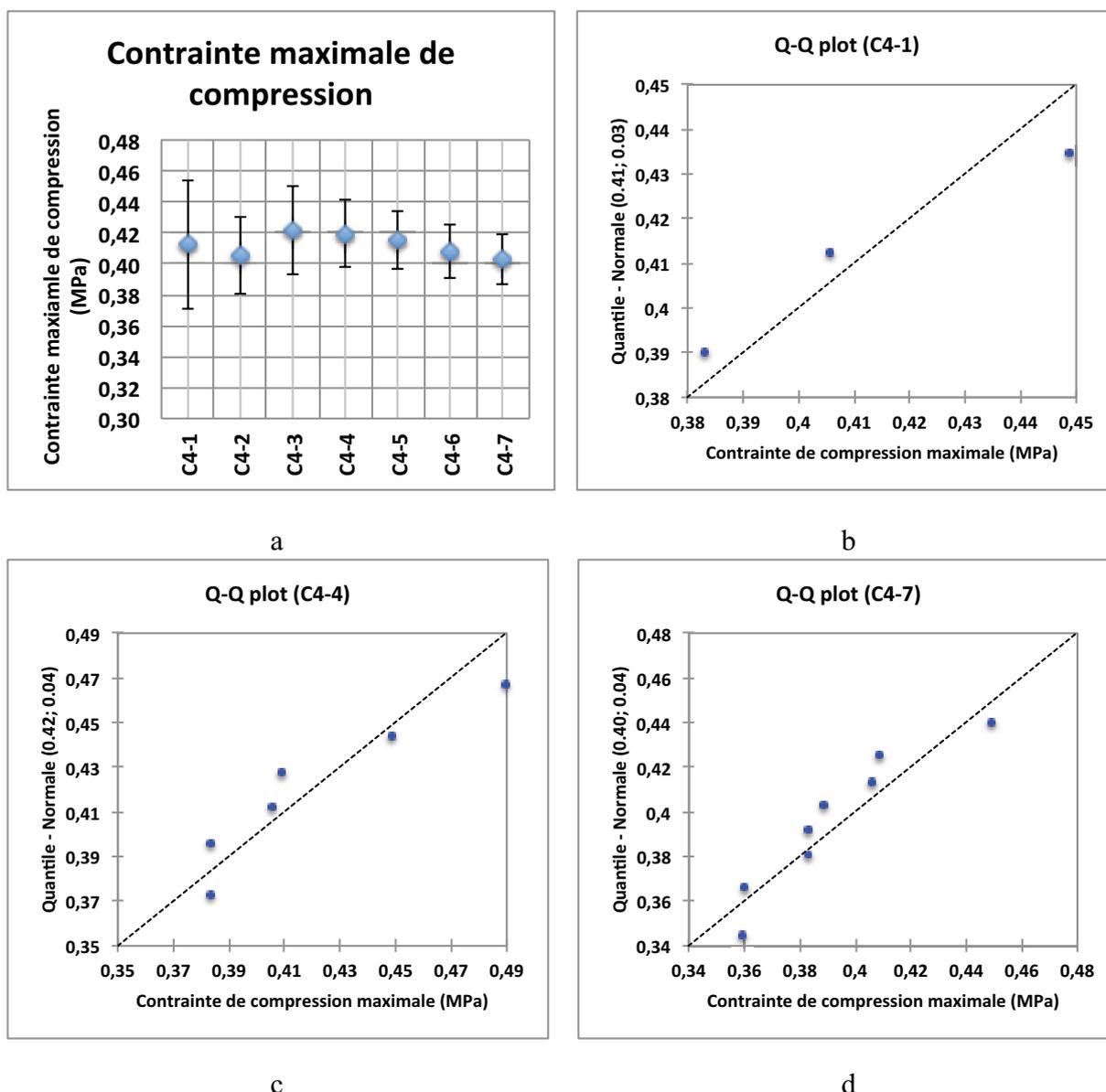


Figure 5-11: Nombre significatif d'échantillon b=3 ; c=6 et d=9 ; pour la contrainte de compression max. à 30jours : C4.

L'amplitude maximale obtenue sur les valeurs moyennes en considérant les lots de différents échantillons ne dépasse pas 0,02 MPa, c'est le cas des C4 et C12 en figures 5-11 b et 5-49 b. En général, au bout de 6 échantillons, le lot contient déjà la valeur minimale et maximale à l'exception de certains cas comme le chanvre C5, (figure 5-48 b), pour lequel il faut carrément un lot de 9 échantillons. Dès lors qu'on a un lot de 4 échantillons, on observe une amélioration de la précision avec l'intervalle de confiance qui diminue, elle varie de 0,08 MPa à 0,03 MPa (figure 5-11 a) ou encore de 0,27 MPa à 0,08 MPa (figure 5-60 b). Par ailleurs, les résultats des diagrammes Q-Q montrent cependant qu'une bonne corrélation entre la distribution normale théorique et les observations expérimentales est obtenue à partir d'un lot de 6 échantillons, comme par exemple C12 en figure 5-49 b.

La faible amplitude observée entre les valeurs moyennes quel que soit le lot et une nette amélioration de la précision traduite par une diminution de l'intervalle de confiance (par exemple figure 5-60 b) mettent en évidence l'intérêt d'augmenter le nombre d'échantillons.

5.3.1.3 Module apparent

L'analyse sur les résultats du module apparent en 5.4.3, révèle une variabilité considérable avec de forts CV. Dans le cas de l'analyse sur le nombre d'échantillons, l'étendue de l'amplitude obtenue entre les valeurs minimale et maximale témoigne également de cette variabilité ; par exemple, elle est de 45 MPa pour C5 (figure 5-52 c). La moyenne obtenue sur les différents lots varie également, son amplitude maximale observée est d'environ 8 MPa pour le même chanvre C5. La variation de cette moyenne en fonction du nombre d'échantillons est aussi aléatoire, dans certains cas, elle est stable, C2, (figure 5-50 c). Par contre dans d'autres cas, elle est croissante puis décroissante, ou vice-versa C4 (figures 5-51 c) et C5 (figure 5-52 c), ou encore strictement croissante, C12 (figure 5-53 c). Au bout de 5 échantillons, on arrive à une bonne corrélation entre la distribution théorique et les observations expérimentales. La précision des résultats est optimale vis-à-vis de l'intervalle de confiance au bout de 6 échantillons. Il diminue de la moitié lorsqu'on passe du lot de 3 au lot de 9 échantillons dans le cas des chanvres C4, C5 et C12 (figures 5-59 c, 5-60 c et 5-61 c), et diminue considérablement de 18,67 MPa à 4,66 MPa pour le chanvre C2 (figure 5-58 c).

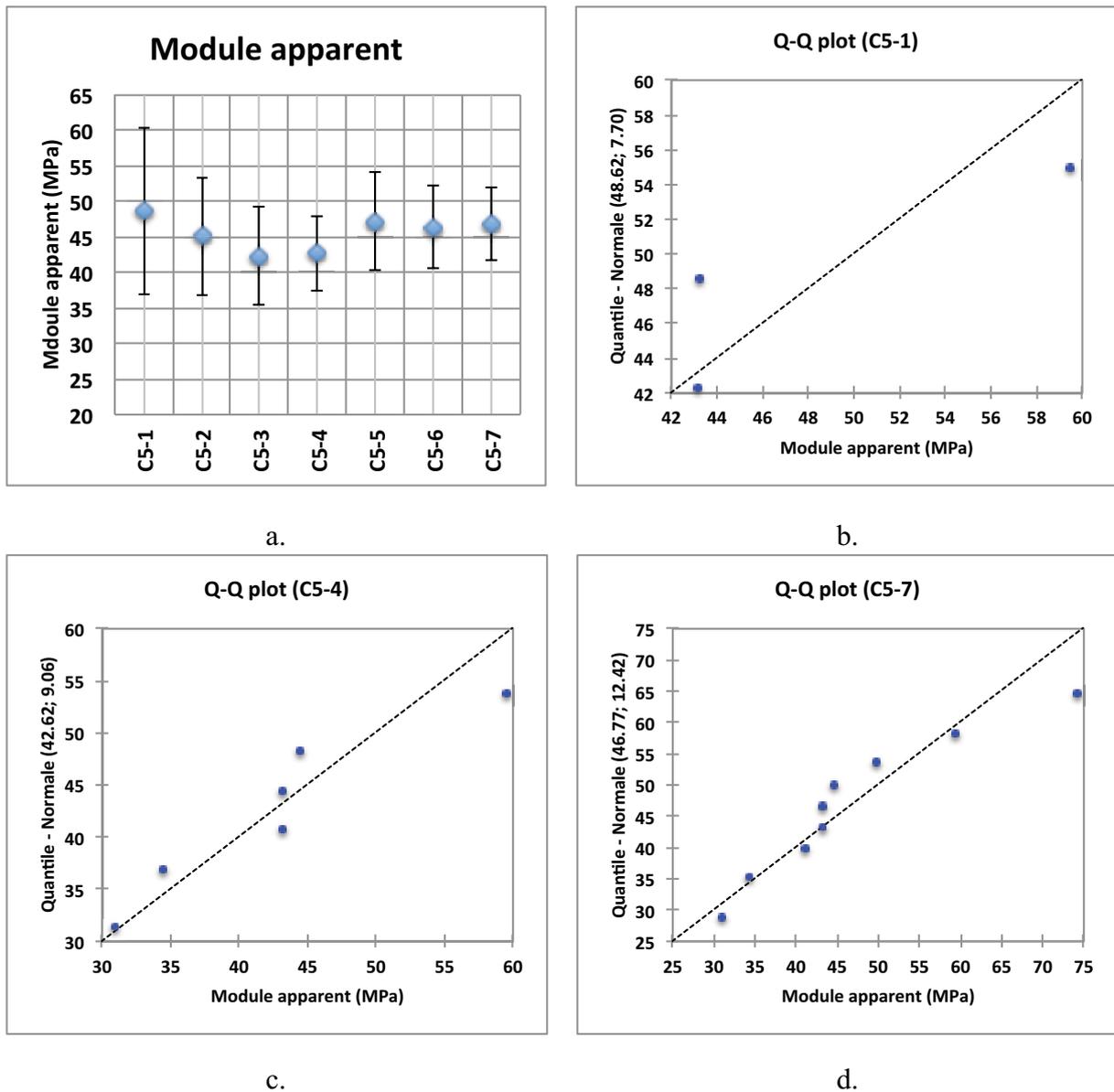


Figure 5-12: Nombre significatif d'échantillon $b=3$; $c=6$ et $d=9$; pour le module apparent à 30 jours : C5.

En conclusion, compte tenu de la variabilité obtenue sur les modules et vu le caractère dispersé et aléatoire de la moyenne sur les différents lots, et la faible diminution de l'intervalle de confiance avant 6 échantillons, la considération d'un lot de trois échantillons n'est pas judicieuse.

5.3.1.4 Module élastique

La variation des moyennes obtenues sur les différents lots est nettement améliorée pour le module élastique. Elles varient dans un intervalle d'amplitude au maximum égal à 5 MPa, cas du chanvre C5 (figure 5-56 d). L'évolution de la valeur moyenne est également aléatoire, elle est dans certains cas, croissante puis décroissante, C2 (figure 5-54 d). Dans le cas du C4 (figure 5-55d) elle est quasi-stable, tandis que dans le cas du C12 (figure 5-57 d) elle est strictement croissante. On obtient de bonnes corrélations entre la distribution théorique et les observations au bout de 6 à 7 échantillons. D'après les résultats des intervalles de confiance, la précision est améliorée dès 4 échantillons, elle reste quasi-inchangée au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'échantillons. De manière générale, l'intervalle de confiance

diminue de moitié pour un lot de 3 à 7 échantillons et reste quasi-inchangé jusqu'à 9 échantillons, comme par exemple cas du C12 (figure 5-13 a).

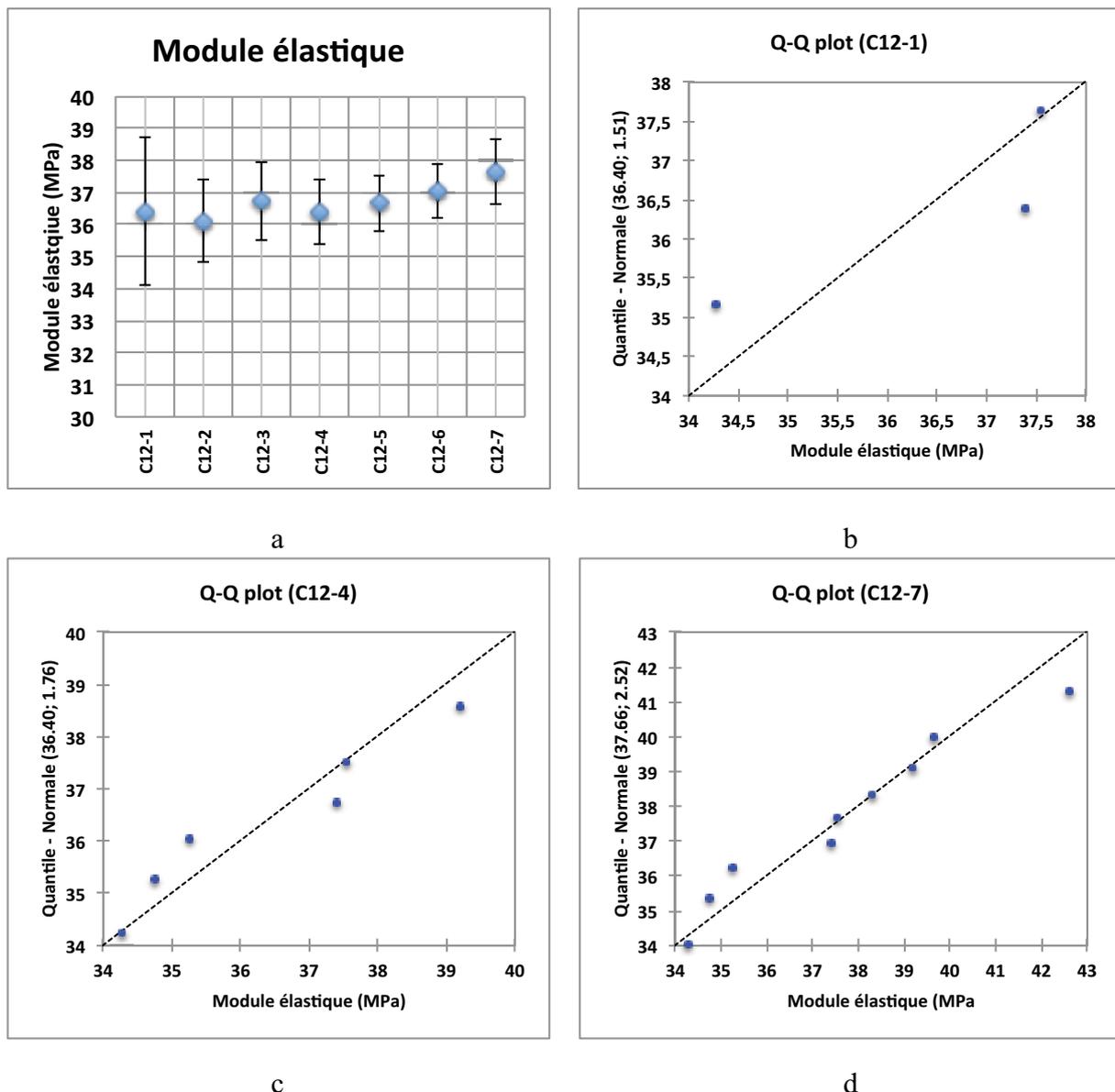


Figure 5-13: Nombre significatif d'échantillon b=3 ; c=6 et d=9 ; pour le module élastique à 30jours : C12.

La prise en compte d'un lot de 3 échantillons reste raisonnable dans la mesure où la moyenne obtenue quel que soit le nombre d'échantillons (3 à 9) ne varie pas beaucoup. Certes, avec ce choix on perd en précision, mais en revanche on gagne en terme de temps et de coût occasionné par la fabrication des éprouvettes.

5.3.2 Conclusion

L'étude et l'analyse du nombre significatif d'échantillons à prendre en compte a mis en évidence une faible variation de la moyenne quel que soit le lot (nombre d'échantillons de 3 à 9). Sur la base des résultats obtenus, nous avons mis en évidence la possibilité d'utiliser 3 échantillons. Les avantages et les inconvénients associés à ce choix ont été soulignés quelle que soit la propriété analysée. Cependant, pour le module apparent, les résultats montrent que

l'utilisation de 3 échantillons n'est pas judicieuse à cause de l'instabilité de la valeur moyenne lorsque le nombre d'échantillons augmente mais aussi la faible diminution de l'intervalle de confiance (mauvaise précision des résultats) avant un lot de 6 échantillons.

5.4 Variabilité selon le type de chanvre utilisée

Les résultats préliminaires en 5.2.2 montrent des dispersions significatives à différentes amplitudes selon la propriété et le type de chanvre considéré. Une analyse dans le temps de chacune des propriétés par type de chanvre est nécessaire pour une meilleure compréhension des résultats. Dans la suite, nous analysons les résultats de masse volumique, de contrainte de compression et de module, ainsi que ceux de la conductivité thermique synthétisés sur les figures 5-14 à 5-24 et tableaux 5-18 à 5-23.

5.4.1 Masse volumique (30j à 180j)

Le suivi du séchage des éprouvettes permet de mieux comprendre l'évolution de sa cinétique. La courbe de séchage en fonction du temps est donnée dans le chapitre 3. Nous nous intéressons ici à l'analyse de la variation de la masse en se basant sur des mesures prises aux échéances clés : juste après la fabrication, et avant et après séchage à l'étuve (figures 5-14 à 5-16). Il est ainsi possible de comprendre l'effet de la perte de masse associée au séchage à l'air libre et à l'étuve (5.1.3).

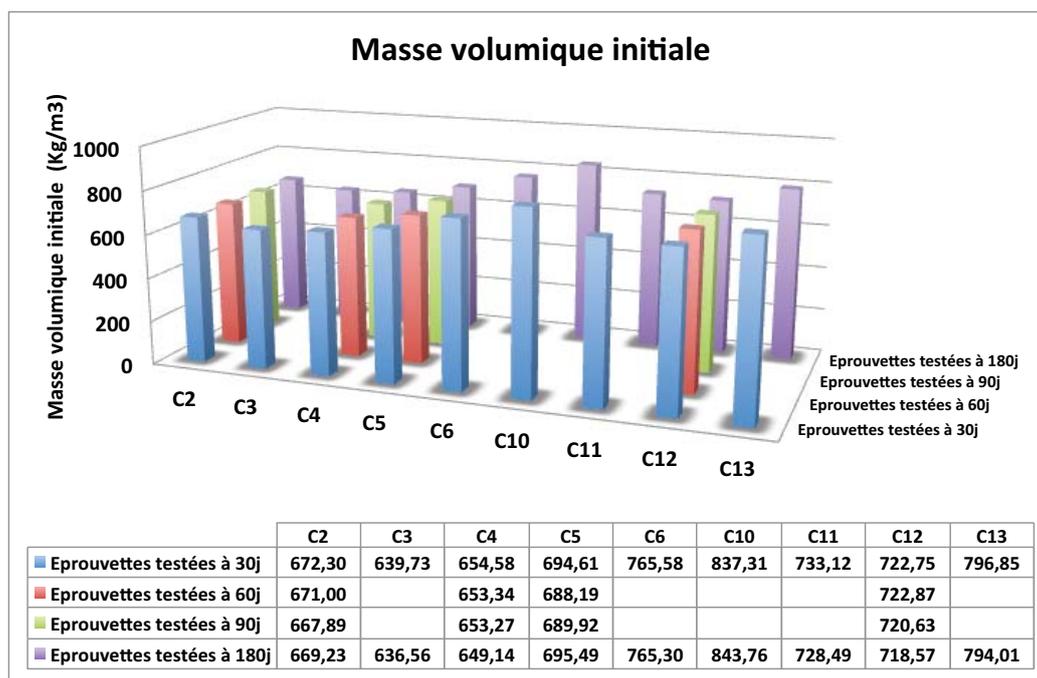


Figure 5-14: Masse volumique initiale après démoulage des éprouvettes

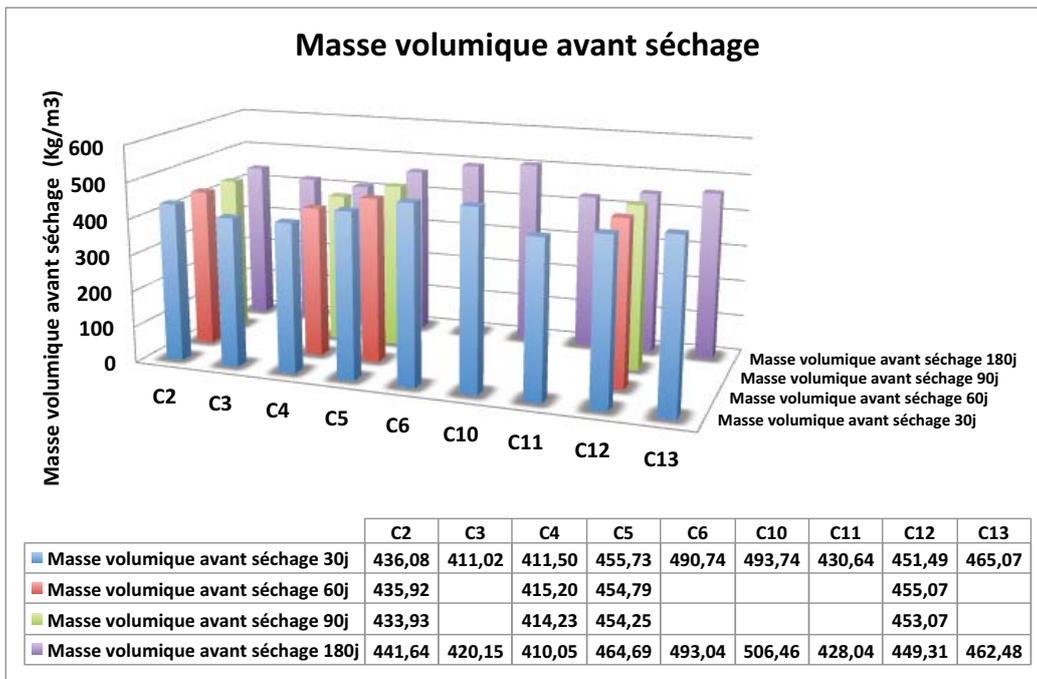


Figure 5-15: Masse volumique avant séchage à l'étuve

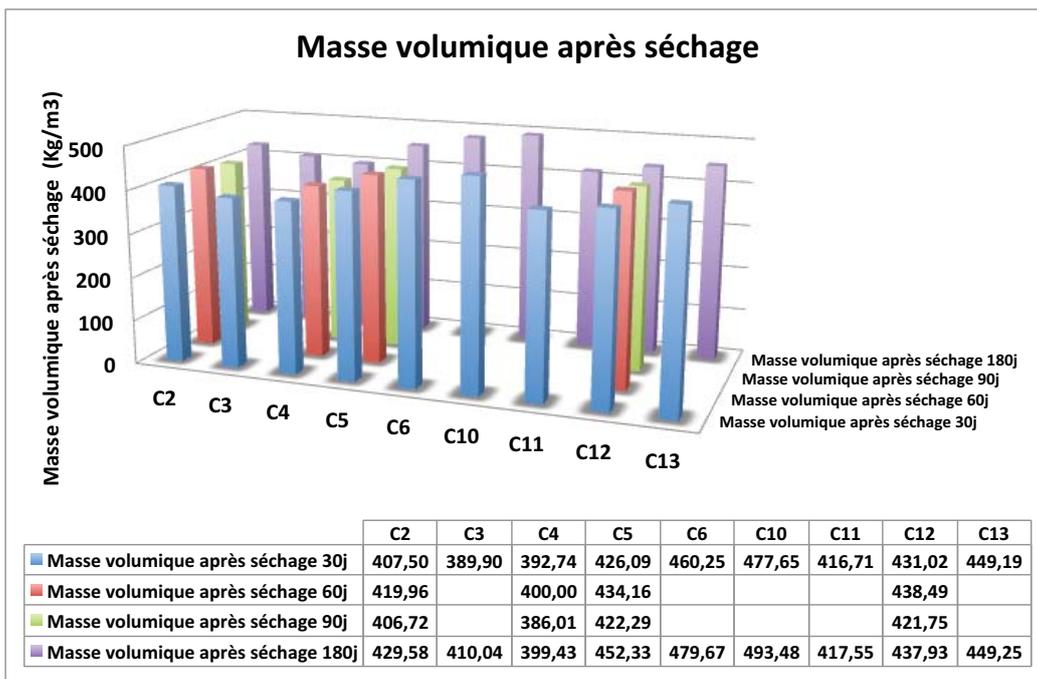


Figure 5-16: Masse volumique après séchage à l'étuve

La masse volumique initiale a un CV inférieur à 2% quelle que soit l'échéance, (tableaux 5-18, 5-20 à 5-22). L'intervalle de confiance est inférieure à 20 kg/m³ tous critères confondus (type de chanvre, échéance, etc.), ce qui montre dans quelle mesure les résultats de la masse volumique sont peu dispersés. Notons que l'intervalle de confiance d'environ 32 kg/m³ constaté à 30j pour le chanvre C13 est un cas isolé, probablement associée au compactage. En effet, une différente énergie de compactage donne lieu à des masses différentes ; malgré le contrôle lors du compactage au moment de la confection des éprouvettes, on observe un écart-type d'environ 13 kg/m³ pour le chanvre C13.

Après séchage à l'étuve, nous constatons une diminution de l'ordre de 40% environ de la masse volumique liée à la perte en eau de gâchage. Contrairement à la masse volumique initiale, nous observons la dispersion dans le temps pour la masse volumique après séchage. Nous avons un CV supérieur à de 2% dans certains cas, comme pour le C4 par exemple, et un intervalle de confiance allant de 3 à 23kg/m³. Non seulement la masse de l'éprouvette diminue, mais aussi son volume suite à un phénomène de rétrécissement causé par le séchage naturel (à l'air libre) et forcé (à l'étuve). Ce qui entraîne une variation de volume difficile à mesurer avec précision et qui est probablement à l'origine de ces dispersions constatées.

5.4.2 Contrainte de compression (30 à 180j)

A cause des différents niveaux de déformabilité, notamment dans le cas de forte déformation, il n'est pas pertinent d'évaluer la résistance à la compression en considérant sa valeur maximale. Car comme nous l'avons vu précédemment, certains types de chanvre peuvent être comprimés de façon quasi-infinie sans rompre (5.2.1). De ce fait, le niveau de déformation atteint ne correspond pas forcément à la déformation admissible en pratique. C'est pourquoi, il est nécessaire d'analyser la contrainte de compression mais aussi le niveau de déformation qui lui est associé. D'une part, nous analysons les résultats de contrainte maximale (figure 5-17) et ceux correspondants à 5% de déformation (figure 5-18) et d'autre part, la déformation à la contrainte maximale (5.4.4).

Des différences significatives sont observées d'un type de chanvre à l'autre, les résultats montrent un facteur 8,23 entre la valeur moyenne de contrainte la plus élevée et la plus faible, cas des chanvre C6 et C13, respectivement. Le CV constaté varie de 1 à 25% tous critères confondus (type de chanvre, échéance, etc.) pour la contrainte de compression maximale et celle à 5% de déformation.

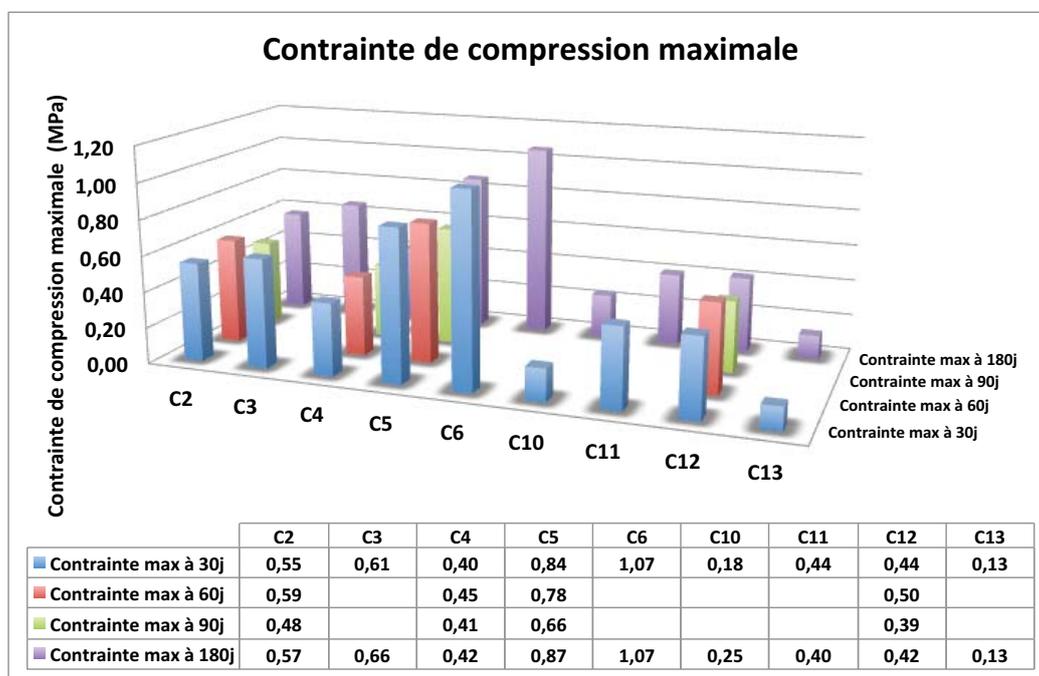


Figure 5-17: Contrainte de compression maximale

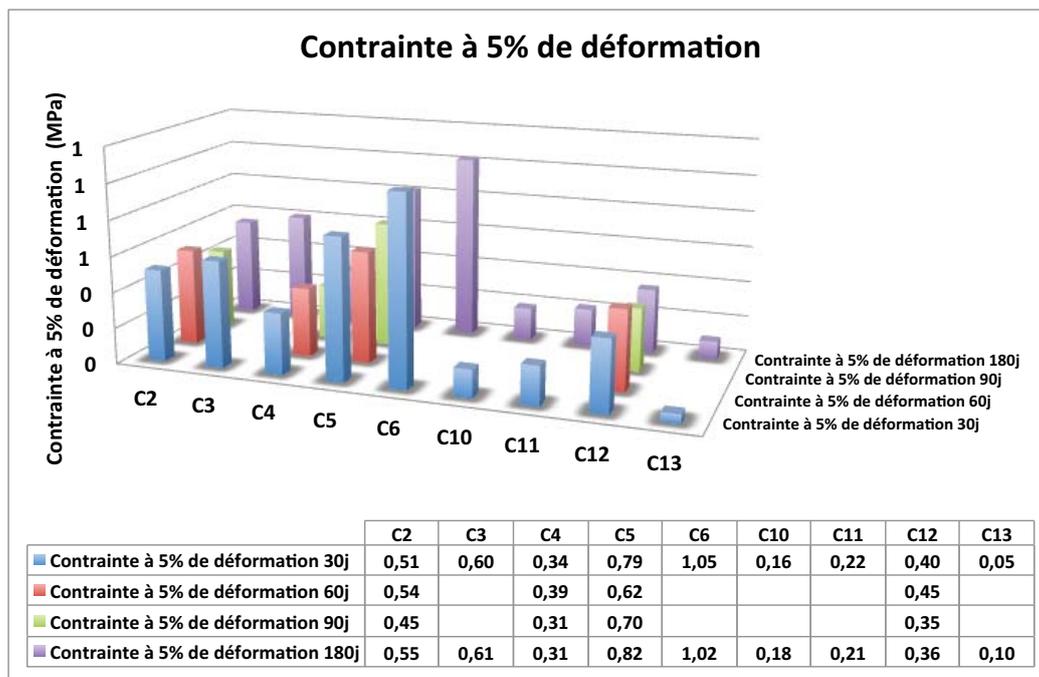


Figure 5-18: Contrainte de compression à 5% de déformation

Cependant, dans certains cas, nous observons les CV relativement élevés comme pour C13 avec 86,62% et 50,71% à 30 et 180j, respectivement ; ou encore C5 avec 49,90% à 60j. Dans ce dernier cas, ces dispersions sont observées pour la contrainte de compression à 5% de déformation. En effet, étant donné que C13 et C5 ont de faibles niveaux de déformation, il vient que les valeurs obtenues à 5 % sont trop dispersées. Pour rappel, la courbe de la figure 5-3 c illustre le faible niveau de déformation pour l'éprouvette S-C13-11-3.

Au cours du temps, nous observons les valeurs les plus faibles à 90j, dans le cas des contraintes maximales et à 5% de déformation. La cause à l'origine de cette variation n'est pas identifiée, mais elle est probablement liée au changement de la machine d'essai, en effet, à cette échéance, pour une raison liée à la gestion du planning, nous avons utilisé une machine différente de celle utilisée pour les autres échéances.

5.4.3 Module d'Young (30 à 180j)

L'analyse de corrélation en 5.5.5 entre les différentes propriétés montre d'importants coefficients de corrélation entre la contrainte de compression et les modules (apparent et élastique). Grâce à cette corrélation, nous pouvons a priori s'attendre à des dispersions comparables pour les résultats du module et de la contrainte de compression. Toutefois, l'analyse dans le cas des modules révèle que ces dispersions ne sont pas les mêmes.

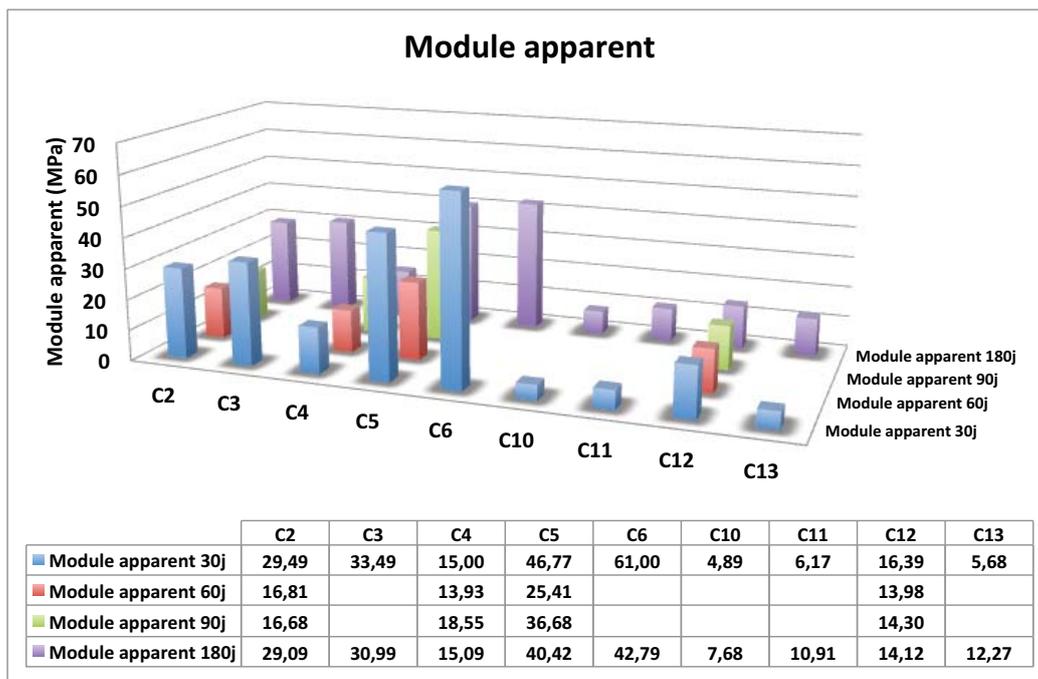


Figure 5-19: Résultats de module apparent

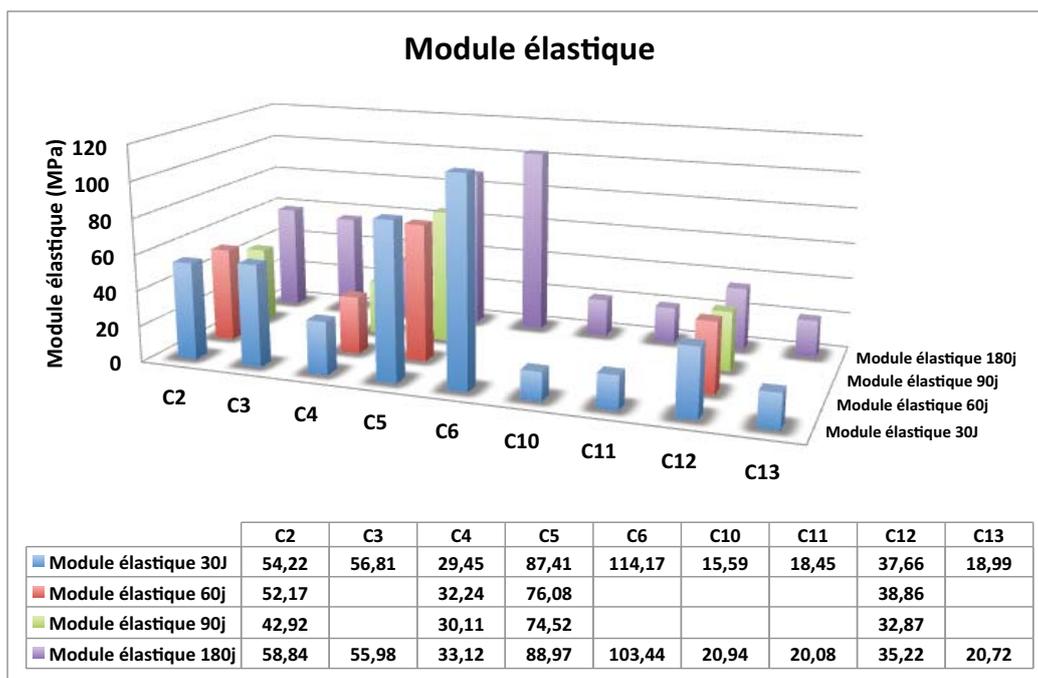


Figure 5-20: Résultat de module élastique

Les valeurs moyennes obtenues varient de 7,68 MPa à 42,79 MPa et de 15,59 MPa à 114,17 MPa pour le module apparent et élastique, respectivement. Ces dispersions sont obtenues en considérant à la fois les différents types de chanvre et les quatre échéances. De plus, dans ces mêmes configurations, on observe des CV variant de 2,4% à 50,1% et 1,9% à 22,7% pour le module apparent et élastique, respectivement. La valeur la plus élevée de CV, égale 50,1%, est obtenue à 60 jours pour le chanvre C4. En effet, l'écart-type de 6,98 MPa constaté provient de l'éprouvette P-C4-11-11 qui a une valeur élevée égale à 26,20 MPa. De plus, la 1^{ère} phase de chargement a été ratée pour l'éprouvette P-C4-11-13, d'où par ailleurs, un intervalle de confiance égale à 8,67 MPa suite à la diminution du nombre d'échantillons.

5.4.4 Niveau de déformation (30 à 180j)

Les niveaux de déformation obtenus peuvent être classés en trois intervalles : inférieur à 7%, entre 7% et 10% et supérieur à 10%. Au cours du temps, nous constatons une stabilité des valeurs moyennes obtenues pour différents types de chanvre.

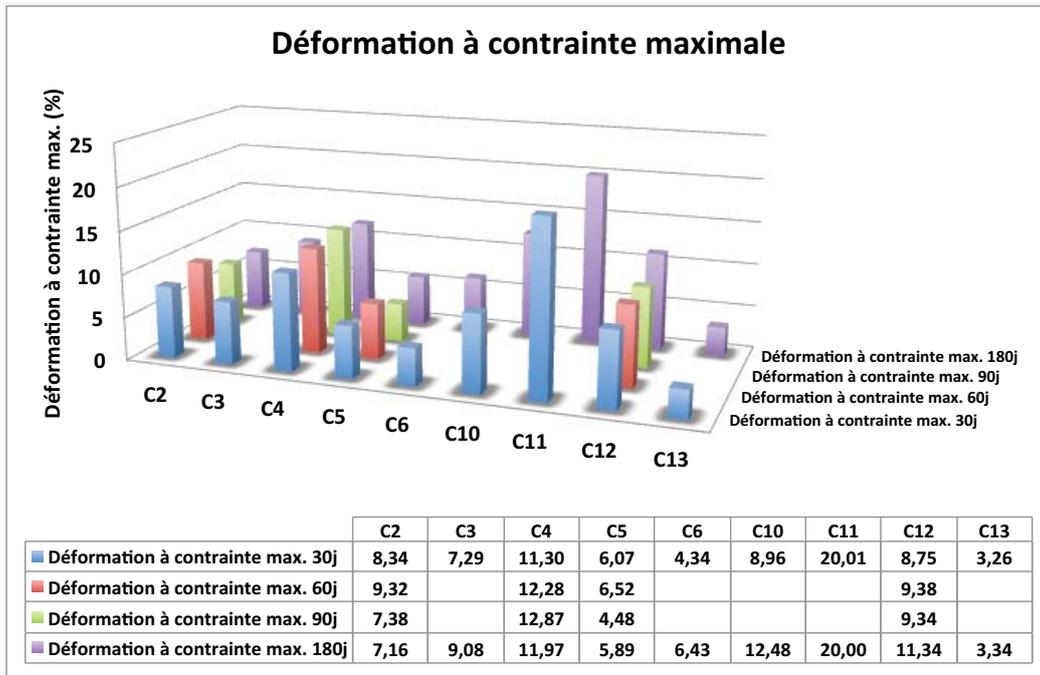


Figure 5-21: Valeurs de déformation à contrainte maximale

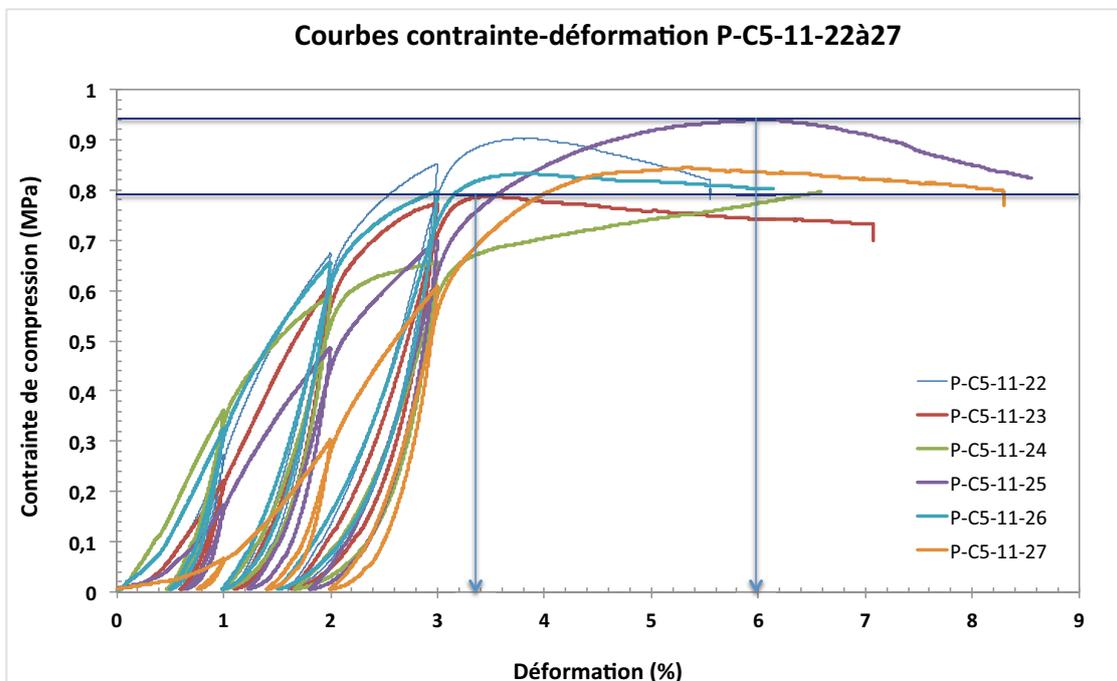


Figure 5-22: Illustration de l'amplitude du niveau de déformation à contrainte maximale

Par ailleurs, les CV allant de 31,6% à 61,2% résultent de la dispersion des différents échantillons du même type de chanvre. Ce dernier cas, correspond aux résultats du chanvre C5 à 180 jours ; les courbes de la figure 5-22 montrent le caractère aléatoire du chemin suivi

Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

par les courbes contrainte-déformation. On observe dans ce cas, une mauvaise répétabilité de l'essai de compression.

5.4.5 Conductivité thermique (30 à 180 jours)

La conductivité thermique a été mesurée par la méthode du « fil chaud » que nous avons détaillée dans le chapitre 1 (§1.2.4). Nous avons utilisé les mêmes éprouvettes que pour l'essai de compression. Ainsi, pour une mesure de conductivité thermique, deux éprouvettes sont utilisées (figure 5-23). Afin de s'assurer de la bonne répétabilité des résultats, trois mesures ont été réalisées en couplant les éprouvettes deux à deux. Par exemple pour les essais secondaires (S) avec trois éprouvettes 1 à 3 par échéance, le couplage est le suivant : (1 - 2), (2 - 3) et (1 - 3). Ensuite, une moyenne des trois mesures est effectuée. Les résultats des valeurs moyennes à différentes échéances sont présentés sur la figure 5-24.



Figure 5-23: Dispositif expérimental de mesure de la conductivité thermique

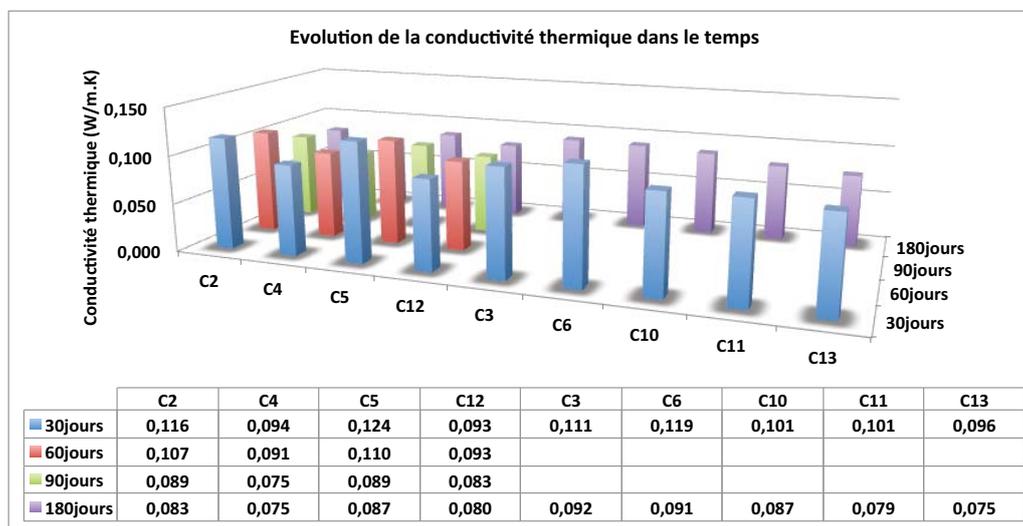


Figure 5-24: Evolution de la conductivité thermique dans le temps

Comme pour les propriétés mécaniques, la conductivité thermique varie d'un type de chanvre à l'autre. Nous observons à 30j un minimum de 0,093 W/m.K et un maximum de 0,124 W/m.K pour les chanvres C12 et C5, respectivement. Par ailleurs, à 180j, la conductivité thermique diminue en dessous de 0,1W/m.K. En effet, plus le matériau sèche, plus l'eau contenue dans les pores s'évapore ; ces pores sont alors vides ou remplies de l'air, ce qui augmente le pouvoir isolant du matériau. Nous observons ainsi à cette échéance, un

minimum de 0,075 W/m.K et un maximum de 0,092 W/m.K pour les chanvres C4, C13 et C3, respectivement. Plus loin dans ce chapitre (§5.6) une étude comparative entre les résultats d'entrée (chènevotte) et de sortie (béton de chanvre) nous permettra de comprendre en quoi ces valeurs obtenues diffèrent d'un type de chanvre à l'autre. Par ailleurs, la conductivité thermique peut également être différente selon l'orientation des particules ou encore la direction de compactage [19,35] mais aussi selon la forme de l'éprouvette. Dans ce dernier cas, nous parlons de l'effet de bord. L'analyse de la variabilité vis-à-vis de ces aspects est détaillée dans la section suivante.

5.5 Variabilité selon le type d'éprouvette et la direction de compactage

Les mesures expérimentales peuvent aboutir à différentes valeurs des propriétés du béton de chanvre selon la taille et la forme d'éprouvette utilisée ou selon la direction considérée [19,35]. Dans cette partie, nous nous intéressons à la forme de l'éprouvette (cylindrique ou cubique) et à son impact sur la masse volumique, la contrainte de compression, le module et la conductivité thermique.

5.5.1 Masse volumique

Dans la mesure où le matériau testé est le même (formulation, type de liant, etc.), la masse volumique obtenue doit être la même quelle que soit la forme ou la taille d'éprouvette utilisée. C'est bien évidemment à la seule condition que le volume de l'éprouvette utilisée soit assez représentatif. D'après les résultats, les valeurs de la masse volumique sont plus élevées dans le cas des éprouvettes cylindriques (figure 5-25). Elles varient de 392,74 kg/m³ à 452,33 kg/m³ pour les éprouvettes cylindriques et de 365,26 kg/m³ à 423,80 kg/m³ pour les éprouvettes cubiques.

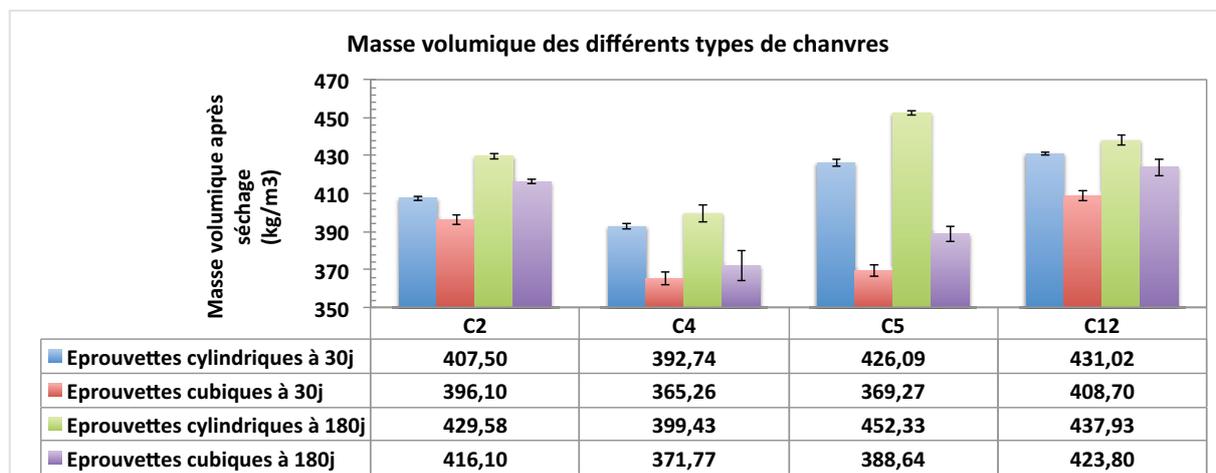


Figure 5-25: Masse volumique après séchages des différents types de chanvre en fonction du type d'éprouvette.

L'analyse vis-à-vis de la forme de l'éprouvette révèle des différences non significatives à l'exception du chanvre C5, avec une variation d'environ 14% entre les résultats des éprouvettes cylindriques et cubiques. Ces légères différences obtenues sont probablement associées à l'énergie de compactage. En effet, compte tenu de l'élancement de ces deux type d'éprouvettes, il faut plus de couches pour remplir l'éprouvette cylindrique que l'éprouvette cubique. Ainsi le remplissage en plusieurs couches peut conduire à une énergie de compactage supérieure et de ce fait, une masse volumique plus élevée. A énergie de

compactage égal, il est fort probable d'avoir la même masse volumique quelle que soit la forme de l'éprouvette.

5.5.2 Contrainte de compression

D'après la littérature, la résistance à la compression varie selon la direction de compactage. Ainsi, la contrainte de compression est élevée pour une force appliquée parallèlement à celle du compactage et faible dans le cas contraire [19,35]. L'objectif de nos essais était d'analyser la variabilité des résultats de compression vis-à-vis de ces deux directions. Ainsi les éprouvettes cubiques offrent en plus la possibilité de faire un essai de compression perpendiculairement à la force de compactage. Nous avons ainsi conduit les essais dans cette configuration. D'après les résultats (figure 5-26), nous distinguons deux cas. Dans le premier cas, les valeurs obtenues sont voisines avec notamment les chanvres C2 et C12. Même s'il est possible que cette contradiction vis-à-vis de la littérature soit liée à une erreur de mise en place des éprouvettes lors de l'essai (mauvaise orientation des éprouvettes cubiques), la probabilité de se tromper à toutes les échéances avec toujours les mêmes types de chanvre est moindre ; il doit donc y avoir une autre cause non encore identifiée. Mis à part cette contradiction, on obtient alors des valeurs élevées dans le cas des éprouvettes cubiques à cause de l'élançement faible.

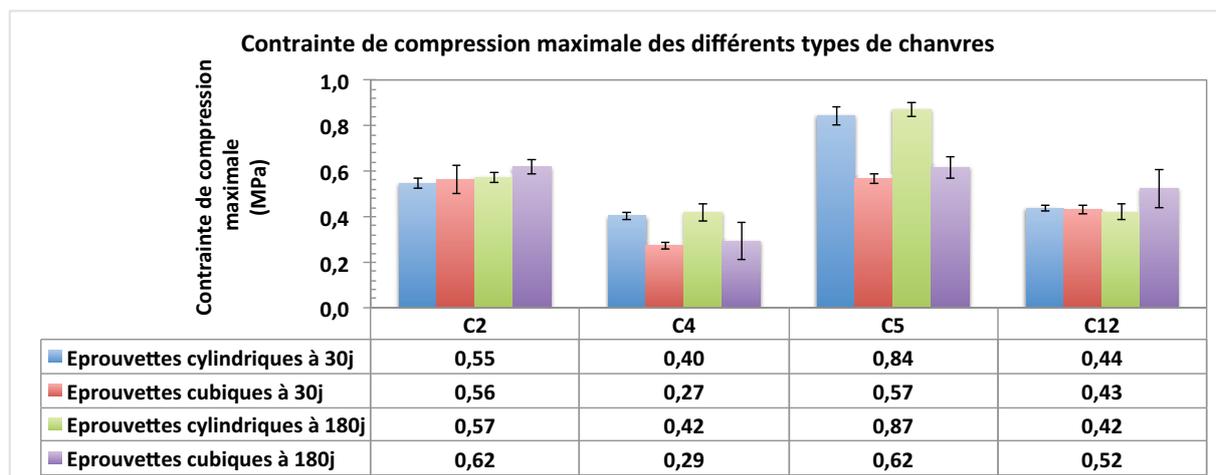


Figure 5-26: Contrainte maximale de compression des différents types de chanvre en fonction du type d'éprouvette.

Dans le second cas, les valeurs obtenues pour les éprouvettes cylindriques sont les plus élevées. On observe alors une perte de l'ordre de 30% pour les essais réalisés avec une force perpendiculaire à la direction de compactage. Par ailleurs, on observe des CV de l'ordre de 3% à 19% (tableaux 5-18 et 5-22), pour les éprouvettes cylindriques et de l'ordre de 2% à 12% (tableaux 5-19 et 5-23), pour les éprouvettes cubiques. Certes, la différence existe bel et bien pour les valeurs de contraintes obtenues selon les deux directions. Cependant, les variabilités constatées restent du même ordre de grandeur et sont faibles dans le cas des éprouvettes cubiques.

5.5.3 Module apparent et élastique

Les valeurs obtenues sont plus élevées dans le cas des éprouvettes cubiques quel que soit le type de module, à l'exception des résultats du chanvre C5 dans le cas du module élastique, (figure 5-28). Nous observons des différences significatives très marquées dans le cas des

modules apparent. Dans ce dernier cas, les écarts relatifs constatés sont de l'ordre de 50% voire même plus, comme par exemple le chanvre C12 à 180 jours avec 14,12MPa et 59 MPa (figure 5-27) pour les éprouvettes cylindriques et cubiques, respectivement. Ce qui représente un écart relatif de 76%.

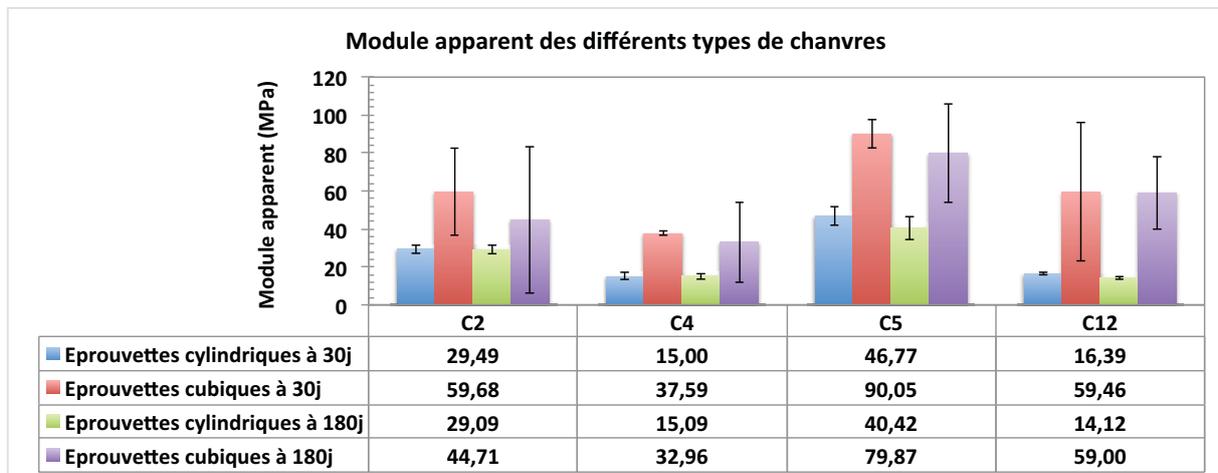


Figure 5-27: Module apparent des différents types de chanvre en fonction du type d'éprouvette.

Dans la mesure où l'élançement de l'éprouvette cubique est petit, elle subit de faibles déformations, conduisant après le calcul à des valeurs de module les plus élevées. Par ailleurs, nous constatons de fortes dispersions des résultats pour les éprouvettes cubiques avec un CV allant de 2 à 69,32% (tableaux 5-19 et 5-23) et un IC de 2 à 76,99 MPa. Ces dispersions sont encore plus grandes pour le module apparent. En effet, lors de l'essai cyclique, la phase 1 dans laquelle ce module est calculée est instable suite à des vides que contient l'échantillon mais aussi la mise en contact des plateaux de compression et l'éprouvette. Il est possible que la force de pré-charge appliquée au début de l'essai ne permette pas de rattraper les défauts de surfacage de l'échantillon. Ce qui probablement, amplifie la dispersion des résultats pendant la phase 1.

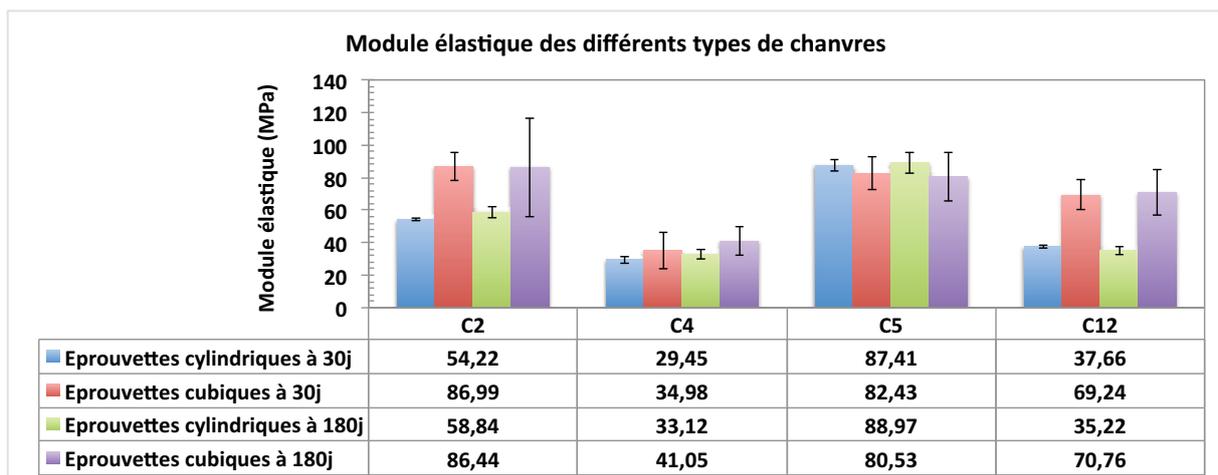


Figure 5-28: Module élastique des différents types de chanvre en fonction du type d'éprouvette.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu (§5.3) dans le cas du module, le nombre d'échantillons utilisés peut aussi amplifier les dispersions constatées ; or, pour les éprouvettes cubiques nous avons considéré seulement 3 échantillons au moment où 9 et 6 échantillons sont considérées pour les éprouvettes cylindriques à 30 et 180j, respectivement.

5.5.4 Conductivité thermique

Dans l'analyse des résultats de conductivité thermique, nous nous intéressons à deux aspects principaux : (1) l'effet de la direction du flux thermique (figure 5-29), et (2) l'influence de la forme de l'éprouvette (figure 5-30). Dans ce dernier cas, on s'intéresse essentiellement à l'effet de bord.

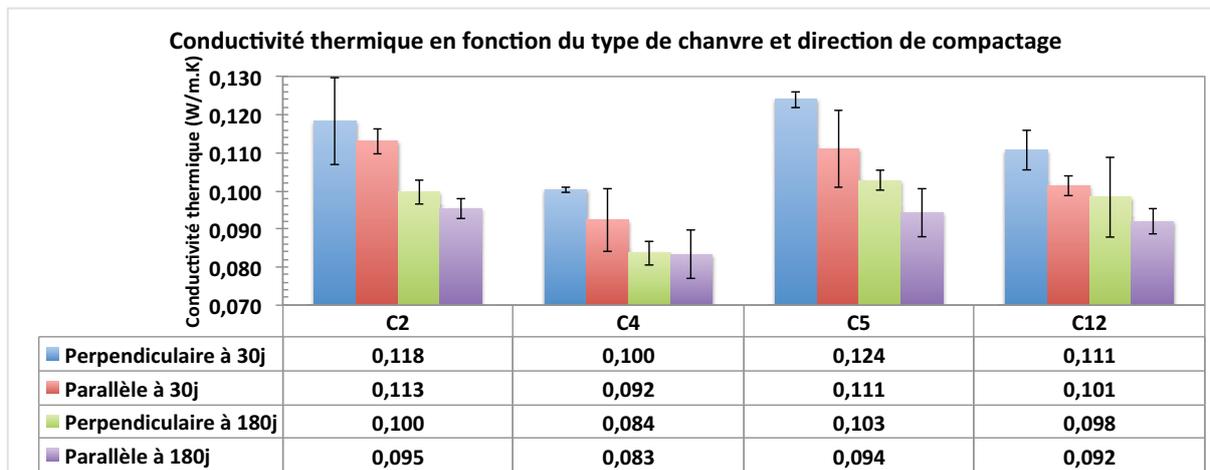


Figure 5-29: Conductivité thermique dans le temps des différents chanvres selon la direction du flux thermique

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique est plus grande dans le sens perpendiculaire à la direction de compactage avec de valeurs allant de 0,084 à 0,124 W/m.K quels que soient le type de chanvre et l'échéance. Dans le sens parallèle, les résultats varient de 0,083 à 0,113 W/m.K. Nos résultats sont en accord avec les résultats de la littérature [19].

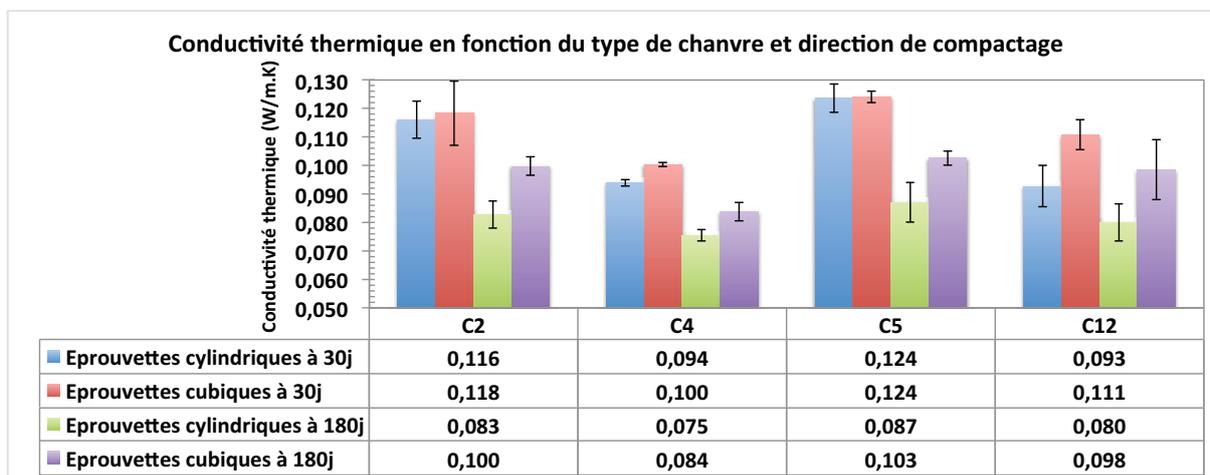


Figure 5-30: Conductivité thermique dans le temps des différents chanvres selon le type d'éprouvette

Afin d'analyser l'effet de la forme d'éprouvette, les essais sont réalisés avec le flux thermique parallèle à la direction de compactage quelle que soit la forme de l'éprouvette. On obtient alors de faible conductivité thermique pour les éprouvettes cylindriques. D'après le principe même de l'essai (cf. chapitre 1), les échantillons à tester sont chauffés par la sonde placée entre ces derniers. A cause de la forme arrondie de l'éprouvette cylindrique et de sa faible surface de contact (figure 5-31), il se produit probablement une perte de chaleur, ce qui conduit à une forte conductivité thermique.

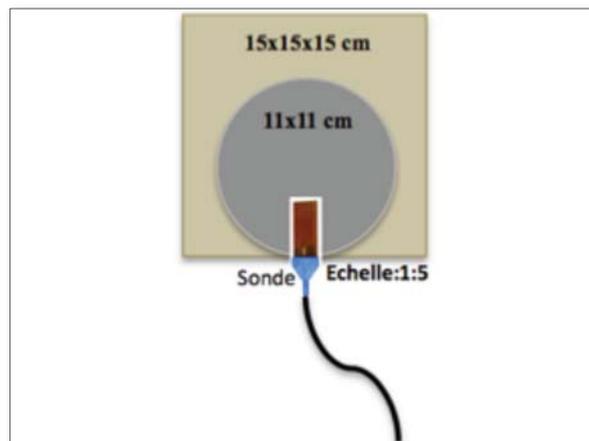


Figure 5-31: Surface de contact dans un essai de conductivité thermique, éprouvette cylindrique et cubique

On remarque par ailleurs, une diminution de la conductivité thermique dans le temps. Ceci est en effet lié au séchage du matériau, suite à l'évaporation de l'eau de gâchage (§5.4.5) d'où la diminution de la conductivité thermique. Par ailleurs, on remarque des différences d'un type de chanvre à l'autre avec un minimum de 0,094 W/m.K et un maximum de 0,124 W/m.K à 30 jours pour les chanvres C4 et C5, respectivement. Une étude comparative entre les données d'entrée (chènevotte) et celle de sortie (béton de chanvre) sera détaillée pour permettre de comprendre ces différences constatées, (§5.6).

5.5.5 Etude de corrélation

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de la corrélation entre les propriétés du béton de chanvre. Il s'agit de les comparer deux à deux grâce au coefficient de corrélation qui permet de savoir si elles sont linéairement liées ou pas. Dans les cas des propriétés totalement corrélées, nous pouvons calculer une propriété directement à partir d'une autre. Nous étudions par ailleurs, la dispersion des propriétés groupées deux-à-deux au moyen des ellipses de confiance. L'ellipse de confiance est basée sur une distribution normale bi-variée, et son orientation dépend du coefficient de corrélation entre les propriétés étudiées. Dans le cadre de cette étude, les ellipses de confiance sont tracées à 95%; autrement dit il existe une probabilité de 5% que la vraie valeur se situe en dehors de l'ellipse de confiance.

Les résultats synthétisés sous forme de matrices de corrélation dans les tableaux 5-7 à 5-10, révèlent de bonnes corrélations pour les propriétés de même nature. Nous observons des coefficients de corrélation entre 0,84 et 1,00 pour les différentes masses volumiques (initiale, avant séchage, etc.). S'agissant des propriétés mécaniques (modules et contrainte de compression), les coefficients de corrélation obtenus sont très élevés, entre 0,942 et 0,999.

Propriétés	ρ_{initiale}	$\rho_{\text{avant séchage}}$	$\rho_{\text{après séchage}}$	σ_{max}	$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	E_{apparent}	$E_{\text{élastique}}$	$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$
ρ_{initiale}	1	0,869	0,950	-0,347	-0,341	-0,306	-0,233	-0,157
$\rho_{\text{avant séchage}}$	0,869	1	0,978	0,075	0,121	0,157	0,230	-0,438
$\rho_{\text{après séchage}}$	0,950	0,978	1	-0,102	-0,066	-0,035	0,040	-0,336
σ_{max}	-0,347	0,075	-0,102	1	0,980	0,958	0,958	-0,214
$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	-0,341	0,121	-0,066	0,980	1	0,987	0,982	-0,364
E_{apparent}	-0,306	0,157	-0,035	0,958	0,987	1	0,995	-0,471
$E_{\text{élastique}}$	-0,233	0,230	0,040	0,958	0,982	0,995	1	-0,480
$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$	-0,157	-0,438	-0,336	-0,214	-0,364	-0,471	-0,480	1

Tableau 5-7: Matrice de corrélation des différentes propriétés à 30j

Propriétés	ρ_{initiale}	$\rho_{\text{avant séchage}}$	$\rho_{\text{après séchage}}$	σ_{max}	$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	E_{apparent}	$E_{\text{élastique}}$	$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$
ρ_{initiale}	1	0,867	0,903	0,123	0,158	0,160	0,112	-0,478
$\rho_{\text{avant séchage}}$	0,867	1	0,995	0,598	0,626	0,623	0,590	-0,852
$\rho_{\text{après séchage}}$	0,903	0,995	1	0,523	0,567	0,547	0,517	-0,804
σ_{max}	0,123	0,598	0,523	1	0,969	0,998	0,999	-0,926
$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	0,158	0,626	0,567	0,969	1	0,956	0,977	-0,933
E_{apparent}	0,160	0,623	0,547	0,998	0,956	1	0,995	-0,933
$E_{\text{élastique}}$	0,112	0,590	0,517	0,999	0,977	0,995	1	-0,924
$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$	-0,478	-0,852	-0,804	-0,926	-0,933	-0,933	-0,924	1

Tableau 5-8: Matrice de corrélation des différentes propriétés à 60j

L'analyse des résultats vis-à-vis des niveaux de déformation montre que cette propriété est corrélée négativement aux autres grandeurs. Ceci signifie que si le niveau de déformation augmente, la contrainte de compression ou encore le module diminue. Il convient de remarquer que cette tendance est homogène dans le temps. En revanche, on observe de faibles et bonnes corrélations selon la propriété analysée. D'une part, à 30 et 180j, (tableaux 5-7 et 5-10), on obtient des corrélations faibles à l'exception de certains cas, par exemple $\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$ et $E_{\text{élastique}}$ à 180j (tableau 5-10), avec un coefficient égal à -0,507. Toutefois, les coefficients obtenus restent d'une façon générale inférieurs à 0,55 en valeur absolue.

Propriétés	ρ_{initiale}	$\rho_{\text{avant séchage}}$	$\rho_{\text{après séchage}}$	σ_{max}	$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	E_{apparent}	$E_{\text{élastique}}$	$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$
ρ_{initiale}	1	0,872	0,860	0,004	0,151	-0,006	0,124	-0,353
$\rho_{\text{avant séchage}}$	0,872	1	0,997	0,469	0,604	0,393	0,571	-0,762
$\rho_{\text{après séchage}}$	0,860	0,997	1	0,460	0,600	0,360	0,561	-0,781
σ_{max}	0,004	0,469	0,460	1	0,985	0,952	0,993	-0,852
$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	0,151	0,604	0,600	0,985	1	0,910	0,996	-0,925
E_{apparent}	-0,006	0,393	0,360	0,952	0,910	1	0,942	-0,689
$E_{\text{élastique}}$	0,124	0,571	0,561	0,993	0,996	0,942	1	-0,890
$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$	-0,353	-0,762	-0,781	-0,852	-0,925	-0,689	-0,890	1

Tableau 5-9: Matrice de corrélation des différentes propriétés à 90j

Propriétés	ρ_{initiale}	$\rho_{\text{avant séchage}}$	$\rho_{\text{après séchage}}$	σ_{max}	$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	E_{apparent}	$E_{\text{élastique}}$	$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$
ρ_{initiale}	1	0,840	0,840	-0,335	-0,304	-0,368	-0,251	-0,029
$\rho_{\text{avant séchage}}$	0,840	1	1,000	0,131	0,195	0,121	0,250	-0,313
$\rho_{\text{après séchage}}$	0,840	1,000	1	0,133	0,195	0,118	0,248	-0,300
σ_{max}	-0,335	0,131	0,133	1	0,987	0,941	0,964	-0,276
$\sigma_{5\% \text{ de } \epsilon}$	-0,304	0,195	0,195	0,987	1	0,969	0,989	-0,413
E_{apparent}	-0,368	0,121	0,118	0,941	0,969	1	0,978	-0,536
$E_{\text{élastique}}$	-0,251	0,250	0,248	0,964	0,989	0,978	1	-0,507
$\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$	-0,029	-0,313	-0,300	-0,276	-0,413	-0,536	-0,507	1

Tableau 5-10: Matrice de corrélation des différentes propriétés à 180j

D'autre part, à 60 et 90j (tableaux 5-8 et 5-9), on obtient de fortes corrélations avec des coefficients de corrélation allant jusqu'à 0,933 en valeur absolue. Le fait d'avoir l'ordre de grandeur de ces coefficients de corrélation qui varient dans le temps est justifié en partie par le nombre d'échantillons pris en compte. D'après le tableau 5-3, les éprouvettes prises en compte sont 51 à 30j, 24 à 60 et 90j et 39 à 180j. Il convient de rappeler que seules les éprouvettes cylindriques sont prises en compte. D'après ces résultats, il convient de remarquer que, plus le nombre d'échantillons est faible, plus on a la valeur des coefficients de corrélation entre $\epsilon \text{ à } \sigma_{\text{max}}$ et les autres propriétés qui augmentent (bien entendue en valeur absolue).

Les masses volumiques avant séchage et après séchage à l'étuve étant fortement corrélées, il est alors possible lors de l'essai de la mesurer soit après séchage, soit avant séchage, et ainsi par calcul, on peut arriver à obtenir la masse volumique sèche de l'échantillon.

Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

De la même façon, la forte corrélation entre σ_{\max} et les autres propriétés ($\sigma_{5\%}$, E_{apparent} , $E_{\text{élastique}}$) montre qu'il est possible d'approximer les valeurs de ces propriétés l'une en fonction de l'autre. Dans le tableau 5-11, nous proposons les équations à utiliser. Elles ont été obtenues en considérant l'ensemble des résultats à toutes les échéances.

Propriétés	Equations
$\rho_{\text{avant séchage}}$ en fonction de la ρ_{initiale}	$\rho_{\text{av.s}} = 0,4108 * \rho_i + 156,83$
$\rho_{\text{après séchage}}$ en fonction de la ρ_{initiale}	$\rho_{\text{ap.s}} = 0,4305 * \rho_i + 123,13$
$\rho_{\text{après séchage}}$ en fonction de la $\rho_{\text{avant séchage}}$	$\rho_{\text{ap.s}} = 0,9834\rho_{\text{av.s}} - 12,564$
$\sigma_{5\%}$ de ϵ en fonction de la σ_{\max}	$\sigma_{5\%} = 0,9992 * \sigma_{\max} - 0,0574$
E_{apparent} en fonction de la σ_{\max}	$E_a = 51,635 * \sigma_{\max} - 4,9949$
$E_{\text{élastique}}$ en fonction de la σ_{\max}	$E_e = 106,82 * \sigma_{\max} - 8,0937$
$E_{\text{élastique}}$ en fonction de la E_{apparent}	$E_e = 1,5869 * E_a + 13,175$

Tableau 5-11: Les équations permettant de calculer une propriété en fonction d'une autre

Il convient de garder à l'esprit que malgré la forte corrélation constatée entre les propriétés, il existe des dispersions d'un type de chanvre à l'autre, dont la variation dépend des propriétés considérées. Dans la suite, nous intéressons à l'analyse de ces dispersions.

5.5.5.1 Contrainte de compression vs module

Les ellipses de confiance à 95% contenant les valeurs des échantillons testés montrent dans quelles mesures ces dernières sont dispersées. L'analyse des résultats de la contrainte de compression maximale en fonction du module apparent met en évidence l'augmentation de la dispersion lorsque les valeurs de module et de contrainte augmentent (figure 5-32).

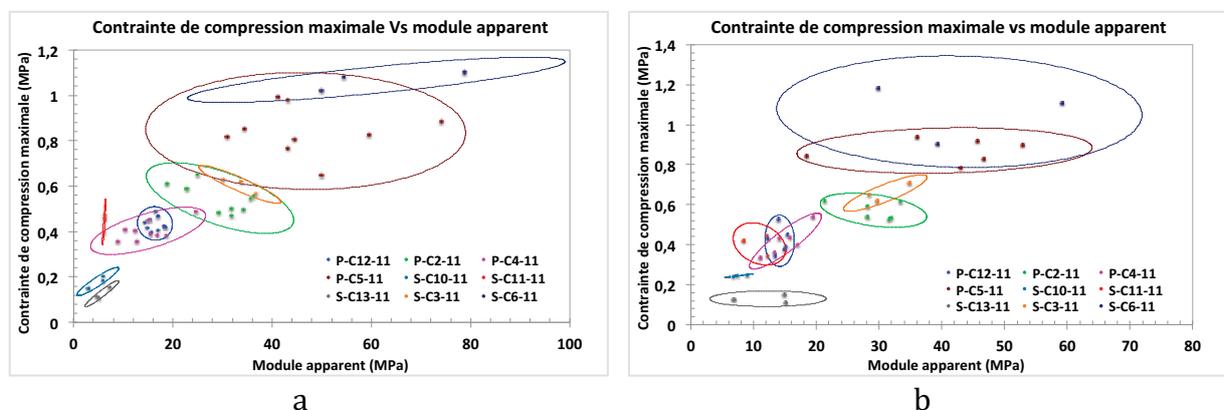


Figure 5-32: Contrainte de compression maximale en fonction du module apparent à 30 (a) et 180 jours (b)

La prise en compte de la contrainte de compression à 5% de déformation permet de réduire légèrement cette variabilité vis-à-vis de l'axe vertical, notamment pour le chanvre C6 (figure 5-33 a). Par ailleurs, elle augmente légèrement pour le chanvre C13 (figure 5-33 b) et ceci s'explique par son faible niveau de déformation comme nous l'avons vu précédemment en 5.2.1, (figure 5-3).

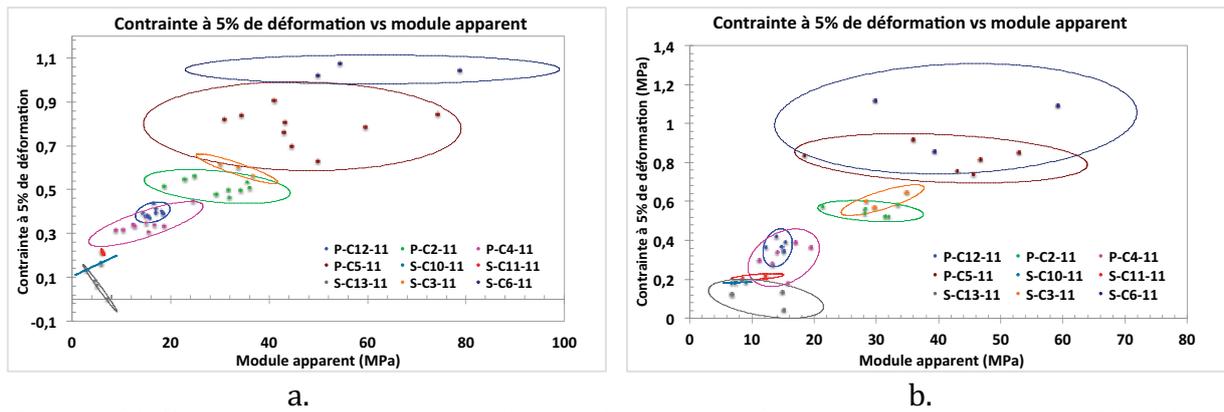


Figure 5-33: Contrainte de compression à 5% de déformation en fonction du module apparent à 30 (a) et 180 jours (b)

Par ailleurs, contrairement au module apparent, l'analyse des résultats du module élastique montre une diminution considérable de la dispersion des résultats avec des ellipses de confiance nettement petites. C'est le cas notamment des chanvres C5 et C6 (figure 5-34 a).

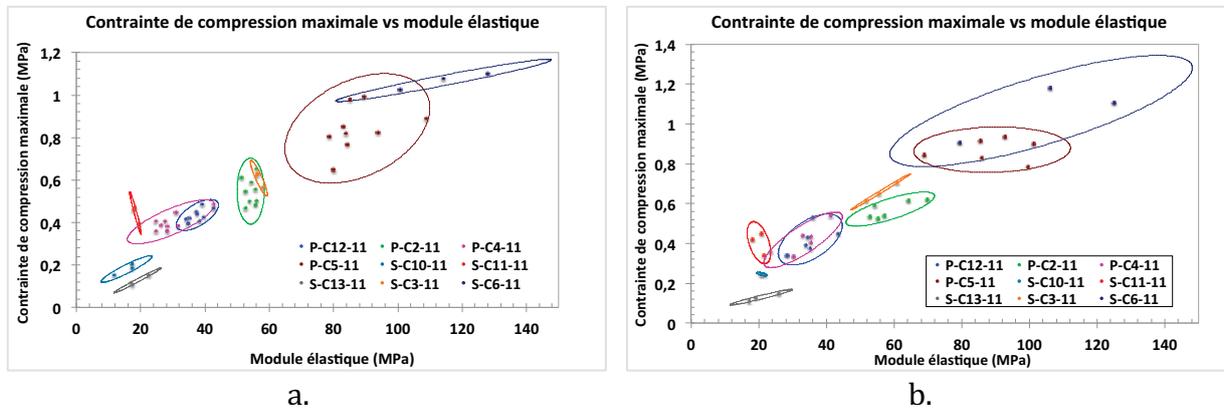


Figure 5-34: Contrainte de compression maximale en fonction du module élastique à 30 (a) et 180 jours (b)

Nous remarquons cependant, une absence de monotonie dans le temps, puisque la dispersion diminue puis augmente pour les chanvres C5 et C6 à 30 et 180j, respectivement (figures 5-34 a et b). Cette variabilité constatée est probablement liée au nombre d'échantillons, 9 à 30j et 6 à 180j avec 3 à 30 et 180j pour les chanvre C5 et C6, respectivement.

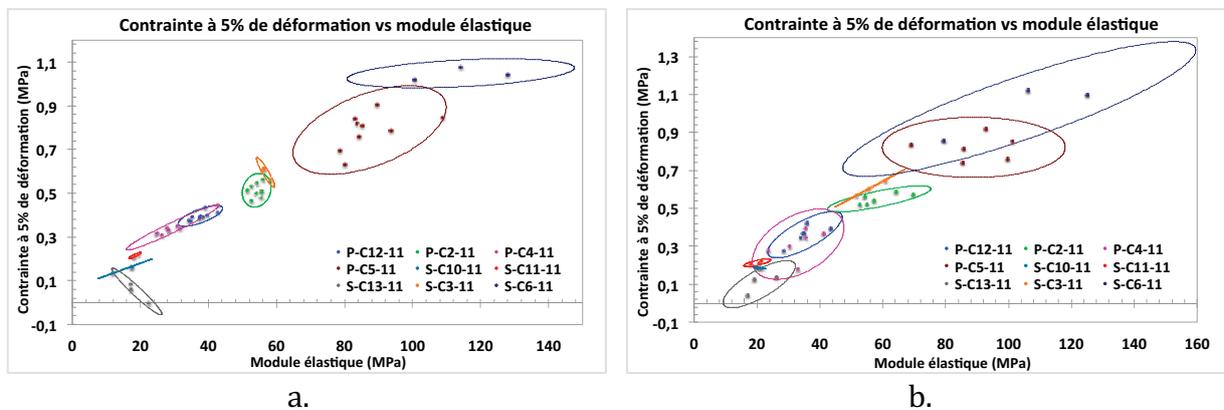


Figure 5-35: Contrainte de compression à 5% de déformation en fonction du module élastique à 30 (a) et 180 jours (b)

La prise en compte de la contrainte de compression à 5% de déformation avec le module élastique montre que les valeurs du module apparent sont trop dispersées par rapport à celles du module élastique. Par ailleurs, la prise en compte de la contrainte de compression à 5% permet de diminuer la dispersion à l'exception du chanvre C13 ayant un faible niveau de déformation.

L'absence de monotonie caractérisée par la diminution puis l'augmentation de la dispersion dans le temps a été observée. Elles sont vraisemblablement associées au nombre d'échantillons pris en compte.

5.6 Classification multicritère des bétons de chanvre

Au chapitre 2, l'analyse multicritère a permis de classer et de sélectionner les différents types de chènevotte avec la possibilité de prédire leurs impacts sur les propriétés du béton de chanvre. En conclusion de cette étude, il a été suggéré de mener une étude sur les bétons de chanvre dans le but de valider la classification qui a été proposée. Il s'agit en effet, de valider les hypothèses prises en compte lors de cette analyse. Par ailleurs, l'étude de corrélation entre les propriétés du béton de chanvre a révélé de très bonnes corrélations entre certaines propriétés (§5.5.5). De plus, l'analyse séparée des propriétés du béton de chanvre (l'une après l'autre ou encore deux à deux) a permis d'observer les premières tendances en ce qui concerne l'impact de la chènevotte. A ce niveau, il est possible d'apprécier la qualité du béton de chanvre en prenant compte une ou deux caractéristiques à la fois, §5.5.5.1.

Dans le but d'une analyse plus poussée, nous proposons une classification multicritère prenant en compte plusieurs caractéristiques du béton de chanvre à la fois. De cette analyse, il sera alors possible de comparer notre classification sur les chènevottes vue au chapitre 2 et celle du béton de chanvre. Le principe utilisé est le même que dans le cas de la chènevotte (§ 2.3.2).

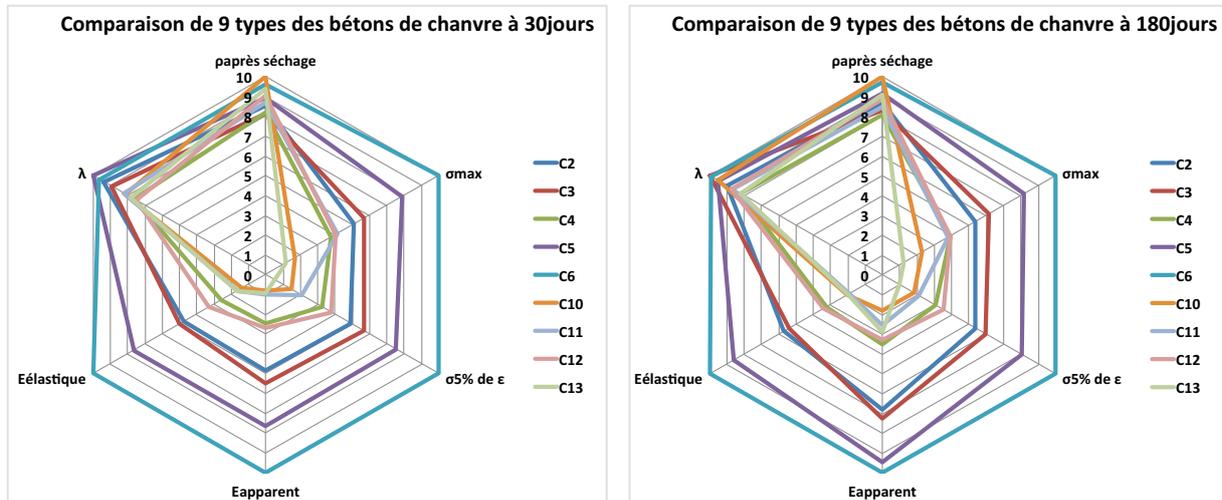
5.6.1 Classification de différents types de béton chanvre

Pour rappel, treize différents types de chènevottes ont été caractérisés et ont fait l'objet d'une étude de classification (cf. chapitre 2). Par la suite, neuf types ont été sélectionnés et utilisés pour la confection des éprouvettes de béton de chanvre. Lors de la sélection, nous avons pris en compte les trois groupes identifiés de telle sorte que chacune soit représentée. Pour rappel, les chanvres sélectionnés sont :

- groupe 1 : C10, C12 et C13 ;
- groupe 2 : C2, C3, C4 et C11 ;
- groupe 3 : C5 et C6.

L'analyse des résultats de l'étude met en évidence la sensibilité des propriétés du béton de chanvre vis-à-vis du type de chanvre utilisé. Certaines sont moins impactées par le type de chanvre alors que d'autres sont largement modifiées. Sur la même échelle de comparaison (détaillée en §2.3.2), les résultats de la figure 5-36 montrent des dispersions de l'ordre de 1 à 10, notamment pour les performances mécaniques. Nous observons par ailleurs, des dispersions de l'ordre de 8 à 10 pour la masse volumique sèche et la conductivité thermique. Pour ces dernières, les valeurs obtenues pour les différents types de bétons de chanvre sont proches les unes des autres. Ce qui confirme et justifie le choix fait au chapitre 2, qui consiste à baser notre démarche de prédiction sur les performances mécaniques, car ce sont ces dernières qui se trouvent les plus impactées par le type de la chènevotte. Au delà de la

représentation graphique (figure 5-36), il est important de procéder en une analyse approfondie pour comprendre les liens entre les différences constatées et le type de granulat utilisé. Une représentation séparée permet de mieux distinguer les bétons de chanvre occupant le centre, le milieu et la périphérie du diagramme radar, on distingue trois groupes qui sont détaillés dans les paragraphes suivants.

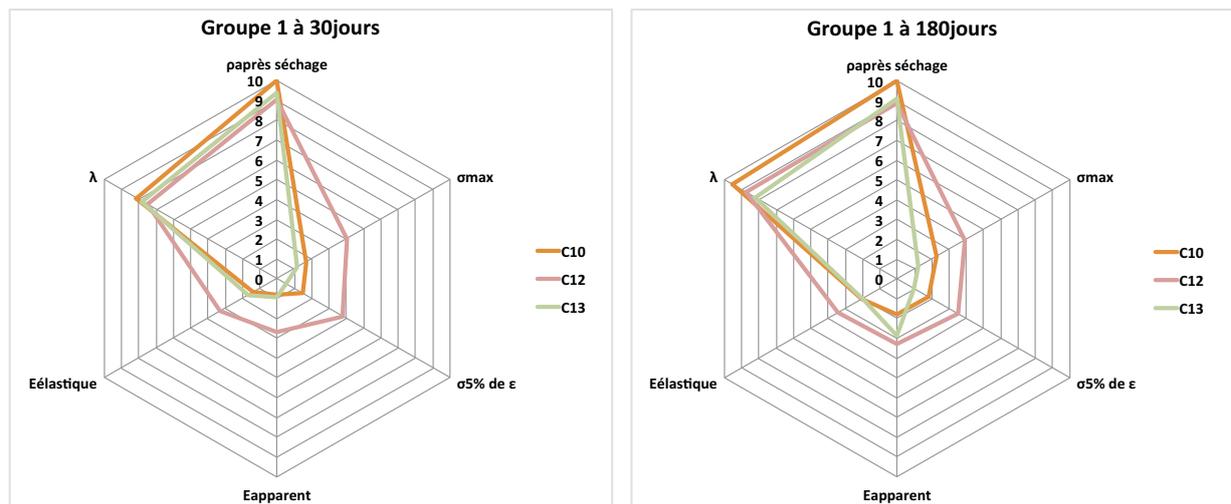


a. b.
Figure 5-36: Comparaison des différents bétons de chanvre prenant en compte différentes caractéristiques

5.6.1.1 Béton de chanvre de groupe 1

Les bétons de chanvre de ce groupe, sont ceux fabriqués avec les chènevottes qui on été classées en groupe 1. Pour rappel, les chènevottes de cette catégorie, sont caractérisées par la faible taille de particules, avec une faible et moyenne capacité d'absorption d'eau. D'après les hypothèses retenues, dans la mesure où ces propriétés avaient été considérées comme étant néfastes pour les performances mécaniques, et vu leurs faibles valeurs, il avait été conclu que ces chènevottes donneraient des bétons de bonnes performances mécaniques.

Contrairement à la prédiction, ces bétons de chanvre donnent de faibles performances mécaniques. En effet, la capacité d'absorption d'eau considérée comme néfaste ne l'est pas forcément en réalité. Le caractère bénéfique ou néfaste dépend probablement du type de liant utilisée. Dans une étude réalisée par Nguyen [19] sur quatre types de liant utilisés, ceux contenant en plus des pouzzolanes ont donné de meilleurs résistances mécaniques, et les liants hydrauliques à base de ciment conduit à de faibles résistances.



a. b.
Figure 5-37: Bétons de chanvre classés dans la catégorie 1

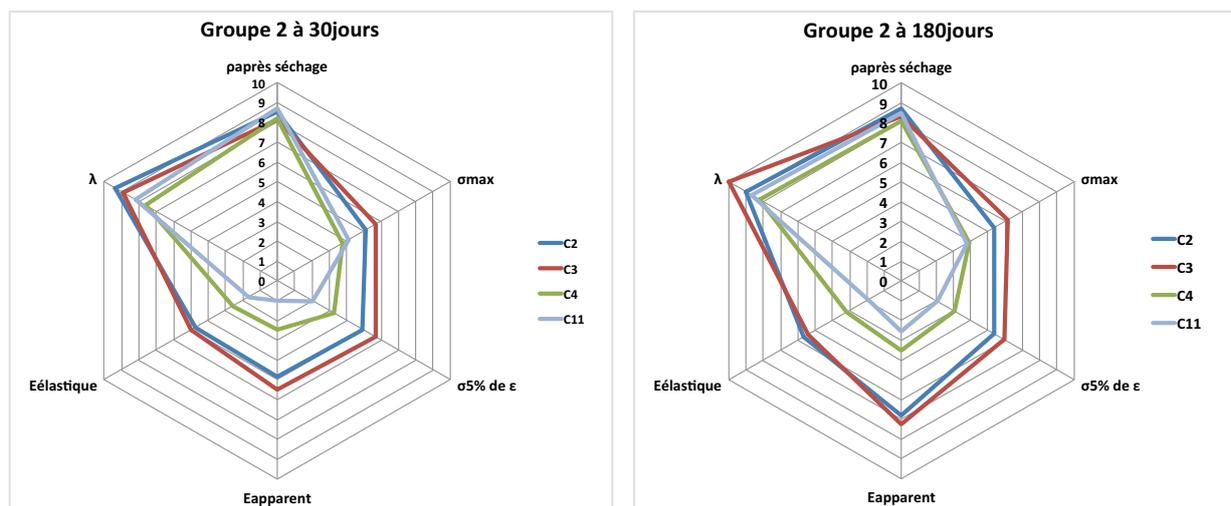
Par ailleurs, d'après l'étude de Arnaud et Gourlay [32] la diminution de la taille de particules était supposée améliorer la performance mécanique du béton de chanvre. Or ceci n'est pas le cas d'après nos résultats. D'ailleurs, cette constatation a été mise en évidence dans les travaux de Stevulova et al. [92]. D'après ces travaux, la diminution de la taille des particules entraîne une amélioration à condition que les chanvres soient de même origine. Il convient de souligner qu'en utilisant le liant Tradical PF70, Nguyen [19] avait également constaté une amélioration des performances mécaniques lorsque la taille augmente.

D'après nos résultats, et vis-à-vis de la taille des particules, il a été mis en évidence, le fait que plus la surface spécifique augmente, plus les performances mécaniques diminuent (§ 5.2.1). Cette constatation est en partie en accord avec les résultats d'Arnaud et Gourlay [32], car, plus la surface spécifique augmente, plus l'interface granulat/liant augmente. Or il a été démontré par Nozahic [35] que l'interface liant/granulat qui est naturellement mauvaise contribue à la mauvaise performance du béton de chanvre.

De ces résultats, il est clair que le caractère bénéfique ou néfaste de la taille des particules et de la capacité d'absorption d'eau, dépend du type de liant utilisé.

5.6.1.2 Béton de chanvre de groupe 2

Dans ce groupe, nous avons les bétons de chanvre caractérisés par une amélioration des performances mécaniques vis-à-vis de ceux du groupe 1. La différence constatée pour les performances mécaniques de ce groupe donne lieu à deux sous-groupes. Il s'agit du sous-groupe A composé de C2 et C3 et du sous-groupe B composé de C4 et C11. Le sous-groupe B semble appartenir au groupe 1 (5.6.1.1). Ces sous-groupes résultent des caractéristiques des chènevottes comme nous l'expliquons dans la suite.



a. b.
Figure 5-38: Bétons de chanvre classés dans la catégorie 2

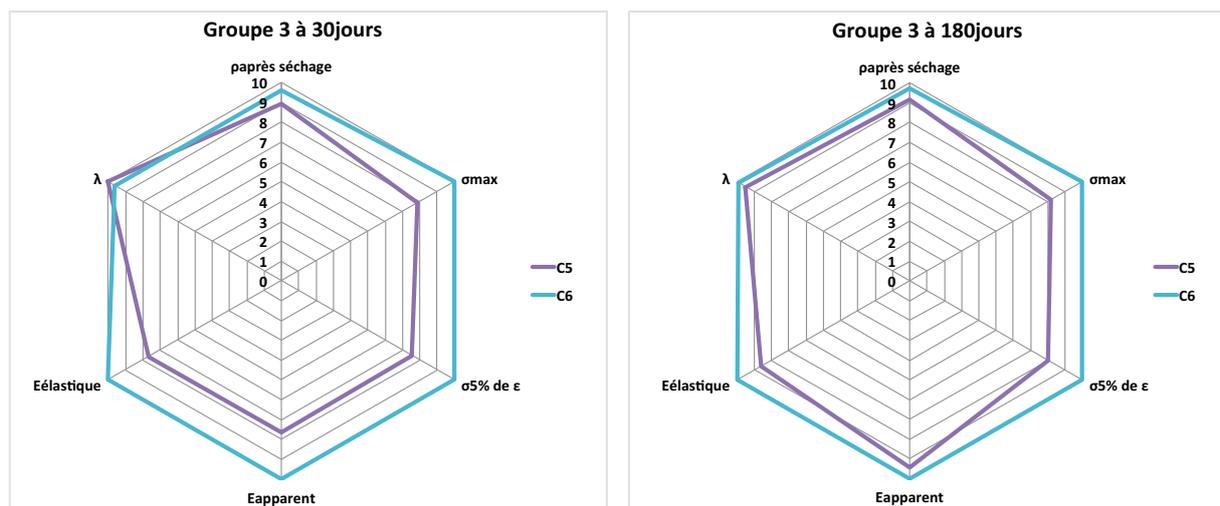
D'une part, il convient de remarquer que le béton de chanvre C11 peut passer du groupe 1 au groupe 2 ; par ailleurs, le chanvre C12 classé en groupe 1 peut également passer au groupe 2. En effet, lors de la classification de ces chènevottes (cf. chapitre 2), leurs positions sur le diagramme radar pouvaient conduire à les mettre dans le groupe 1 ou 2. L'analyse de leurs caractéristiques géométriques a alors permis de trancher. Le C11 est caractérisé par une géométrie plus élevée que le C12, raison pour laquelle il a été classé en groupe 2.

D'autre part, dans ce même sous-groupe, le chanvre C4 est d'après les résultats de classification (§ 2.3.3) à la frontière des deux groupes 1 et 2. Sa taille légèrement plus grande et sa capacité d'absorption d'eau relativement plus petite vis-à-vis des chanvres du groupe 1 ont permis de le classer en groupe 2.

Au moment où les chanvres du groupe 1 ont des valeurs de performance mécanique de l'ordre de 1 à 4 sur l'échelle de comparaison, on observe une amélioration dans le groupe 2, cette fois-ci, avec des valeurs de l'ordre de 4 à 7 notamment pour la contrainte maximale de compression.

5.6.1.3 Béton de chanvre de catégorie 3

Les bétons de chanvre de cette catégorie sont issus des chènevottes qui elles-aussi se trouvaient positionnées à l'extérieur du diagramme radar. D'après nos hypothèses, ces chènevottes étaient censées donner les résultats avec de faibles performances. Néanmoins, une réserve avait été émise quant aux chènevottes de cette catégorie suite à la bonne corrélation entre les résultats de leurs caractéristiques. Ce qui n'était pas le cas pour les chènevottes de catégories 1 et 2.



a. b.
Figure 5-39: Bétons de chanvre classés dans la catégorie 3

La compréhension des causes à la base de cette bonne corrélation entre ces caractéristiques peut permettre de mieux comprendre pourquoi ces chènevottes donnent les bétons de bonnes performances mécaniques. Parmi les pistes se trouve l'analyse de la structure interne à l'échelle microscopique de ces chènevottes. Ceci permettra de mieux comprendre leurs porosités et de faire le lien entre la taille des particules et la capacité d'absorption d'eau. Comparativement aux autres groupes 1 et 2, ces bétons de chanvre ont des performances de l'ordre de 8 à 10 toujours sur la même échelle de comparaison.

5.6.1.4 Conclusion

En conclusion, d'après notre étude, il est clair que seule la taille (longueur, largeur, etc.) de la chènevotte ne suffit pas pour prédire les performances du béton de chanvre à la sortie. Il faut prendre en compte d'autres caractéristiques (teneur en eau, etc.) en plus, le type de chanvre qui optimise ces caractéristiques donne un béton de bonnes performances. Cependant, il est fort possible qu'en changeant le type de liant, les tendances observées changent également. Il existe vraisemblablement des interactions chimique liant-chènevotte qui affectent les performances mécaniques.

5.7 Conclusions et perspectives

5.7.1 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les trois grands types de réponse mécanique lors de l'essai de compression sur le béton de chanvre. Il s'agit principalement des comportements caractérisés par une faible, moyenne et forte déformation. La grande surface spécifique de la chènevotte a été identifiée comme étant à l'origine de la faible liaison interface liant-granulat, conduisant ainsi à une rupture totale de l'échantillon. Par ailleurs, la grande capacité d'absorption d'eau, cause probable de « l'effet de fausse prise » associé à la taille des particules, a été identifiée comme étant à l'origine des grandes déformabilités constatées. Il a été souligné que dans ce dernier cas, les éprouvettes se comportent comme un empilement de strates, ce qui induit de grandes déformations.

L'étude sur le nombre d'éprouvettes nécessaire pour un résultat statistiquement significatif nous a permis de mettre en évidence l'impact du nombre d'éprouvettes sur les résultats obtenus. En général, plus on augmente le nombre d'éprouvettes plus on obtient un résultat précis avec un faible intervalle de confiance. Cependant, l'augmentation de ce nombre entraîne l'augmentation du coût et du temps de fabrication des éprouvettes. D'après cette étude, l'utilisation de trois éprouvettes représente un bon compromis entre la précision des résultats et le coût associé aux essais. Cependant, dans le cas du module apparent, ce choix n'est pas judicieux et il est préconisé de passer à quatre éprouvettes au minimum.

Le type de chanvre utilisé a été identifié comme étant à l'origine des dispersions significatives constatées dans les résultats obtenus, notamment dans le cas des performances mécaniques. Les résultats obtenus diffèrent d'un type de chanvre à l'autre quelle que soit la propriété analysée, mais le plus remarquable est le module ainsi que la résistance maximale à la compression, avec des facteurs de l'ordre de 1 à 10 entre les valeurs minimales et maximales.

Le type d'éprouvette utilisé a permis de mettre en évidence des valeurs de masse volumique légèrement élevées pour l'éprouvette cylindrique. En effet, à cause de leur élancement, l'énergie de compactage est difficile à contrôler. Elle est probablement plus grande pour l'éprouvette cylindrique (nécessitant plus de couches lors du remplissage) ce qui conduit à une masse volumique plus élevée. Par ailleurs, il a été mis en évidence, la conductivité thermique élevée dans le cas de l'éprouvette cylindrique. Elle est associée à sa forme arrondie et à sa surface de contact faible ce qui conduit à une fuite de chaleur du fil chaud et donc une conductivité thermique élevée. Par rapport à l'orientation de la force de compression, les résultats obtenus sont en accord avec la littérature et présentent des variabilités du même ordre de grandeur dans le cas de la contrainte de compression.

Nous avons mis en évidence la faible variabilité des résultats vis-à-vis de la masse volumique. Par ailleurs, les résultats obtenus pour la contrainte de compression et pour le module ont révélé de fortes dispersions. Une étude de corrélation des résultats deux-à-deux a permis de mettre en évidence la dispersion des propriétés du béton de chanvre grâce à des ellipses de confiance. Grâce à ces ellipses, nous avons mis en évidence la faible variabilité des résultats de contrainte de compression à 5% et du module élastique vis-à-vis de ceux de la contrainte de compression maximale et du module apparent.

Une analyse multicritère sur les résultats du béton de chanvre nous a permis de les classer en trois groupes. Elles correspondent à celles obtenues lors de la classification multicritère sur les chènevottes. Ces résultats ont permis d'aboutir à une conclusion que les hypothèses retenues lors de la prédiction de l'effet de la chènevotte sur les bétons de chanvre ne sont pas vérifiées. D'après les résultats, les chènevottes avec de faibles tailles des particules et de fortes capacités d'absorption d'eau ne donnent pas forcément les meilleures performances. De ces conclusions découlent quelques propositions pour mieux cerner les causes à l'origine des contradictions constatées.

5.7.2 Perspectives

Les caractéristiques prises en compte lors de l'analyse multicritère sur la chènevotte n'ont pas permis de tout comprendre sur la variabilité observée dans les résultats du béton de chanvre. Dans la mesure où, d'une part, la nature de la chènevotte a été soulignée comme étant à l'origine des différences constatées [92], et compte tenu de l'effet des composés chimiques de la chènevotte sur la prise et le durcissement du béton de chanvre [38], nous proposons :

(1) d'effectuer une analyse microscopique pour la compréhension de la structure interne (porosité de la chènevotte). Elle permettra de mieux comprendre le lien entre les caractéristiques physiques, géométriques et la capacité d'absorption d'eau des chènevottes.

Mise en évidence de l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre.

Concrètement, il sera possible de comprendre le compromis constaté pour les chènevottes de groupe 3 aux meilleures performances mécaniques.

(2) d'utiliser d'autres types de liant pour se rendre compte du rôle de l'interaction liant-chènevotte sur les propriétés observées.

(3) d'analyser la composition chimique de la chènevotte et surtout de son interaction avec le liant pour une meilleure compréhension de la liaison liant-granulat qui contribue significativement à la résistance mécanique du matériau.

Conclusion générale et perspective

Dans cette étude, la variabilité du matériau béton de chanvre a été abordée en s'intéressant essentiellement aux trois aspects : variables d'entrée, modèle de comportement et grandeurs de sortie. Il est à noter que la chènevotte était au cœur de l'étude avec pour objectif principal d'analyser son impact sur les performances du béton de chanvre.

En entrée du modèle, le choix effectué consiste à utiliser les méthodes de caractérisation de la chènevotte ayant déjà fait l'objet d'une étude inter-laboratoire, ce qui garantit leur validité. Ce choix a pour avantage d'une part, de valoriser ces méthodes, et d'autre part, de permettre d'étudier la grande variabilité des types de chènevotte. En conséquence, treize types de chènevottes ont été étudiés. L'analyse des résultats est effectuée à deux niveaux : monocritère et multicritère. Dans le premier cas, nous avons étudié l'ensemble des chanvres par rapport à chaque caractéristique. Les résultats à ce niveau ont révélé des variabilités considérables pour chacune des caractéristiques, à savoir :

- une masse volumique en vrac allant de 70,8 kg/m³ à 158,8 kg/m³ ;
- une capacité d'absorption d'eau initiale entre 112,2% et 242,5%, et une capacité d'absorption d'eau finale entre 293,1% et 432,5% ;
- une taille de particules allant de 2,27 à 5,52 pour l'élongation et de 0,32 mm à 2,78 mm pour le diamètre équivalent.

Toutefois, les analyses à ce niveau n'ont pas permis de classer les chanvres. C'est pourquoi dans un second temps, une analyse multicritère prenant en compte l'ensemble des caractéristiques a été conduite. En se basant sur les éléments de la bibliographie, cette étude a permis de proposer une échelle de comparaison, ce qui a conduit à mettre en évidence trois catégories distinctes de chènevottes. Cette échelle permet en outre de prédire les performances mécaniques du béton de chanvre, à noter que la prédiction reste relative aux chènevottes de l'étude. En résumé, il est possible de mener une analyse relative entre les chènevottes et prédire ainsi quelle chènevotte conduirait à de meilleures propriétés par rapport aux autres ; cette chènevotte doit présenter un bon compromis entre les différentes caractéristiques. Cependant, pour un type de chanvre particulier, il est moins évident de prédire ses performances mécaniques à la sortie. De plus, il est important de rappeler que le caractère bénéfique ou néfaste lors de nos analyses a été identifié sur la base des éléments de la littérature, avec quelques contradictions, notamment pour la taille des particules. Or, comme nous l'avons discuté au dernier chapitre, l'effet du type de chènevotte ne dépend pas seulement de ses caractéristiques, mais aussi du type de liant utilisé. Il est alors possible que les caractéristiques considérées comme néfastes soient bénéfiques et vice-versa, et cela pourrait justifier pourquoi notre classification des chènevottes s'est inversée.

Par conséquent, vis-à-vis de l'entrée du modèle, les travaux futurs doivent s'intéresser d'une part, (i) à l'amélioration de l'échelle multicritère et d'autre part (ii) à l'étude d'une démarche de prédiction des performances d'un type de chanvre isolé. Cette amélioration peut passer par deux étapes clés, à savoir : (1) la prise en compte d'autres types de chanvre (à forte teneur en fibre, par exemple), associée à l'intégration d'autres caractéristiques, comme la composition chimique, la porosité interne des particules et la résistance mécanique (de l'échantillon ou d'une particule), et (2) la confrontation de l'échelle multicritère dans un contexte différent (autre type de liant, adjuvantation, formulation différente, etc.), étant donné que ces conditions modifient les tendances observées ; à titre d'exemple, comme nous l'avons constaté, la prédiction faite peut s'inverser suivant le type de liant utilisé.

Avant de proposer les pistes pour la prédiction des performances d'un type de chanvre isolé, il convient de rappeler qu'en considérant la chènevotte comme donnée d'entrée, dans certains

cas, la faible taille a été identifiée comme étant à l'origine des faibles performances constatées. Néanmoins, il a été mis en évidence que l'augmentation de la taille n'entraîne pas forcément une amélioration des performances mécaniques. En réalité, le résultat à la sortie du modèle est conditionné par l'interaction de plusieurs caractéristiques en entrée.

Mis à part le fait que d'autres caractéristiques, comme par exemple la capacité d'absorption d'eau, influent également sur la réponse mécanique, il est fort possible qu'une taille optimale existe ou encore une distribution granulométrique optimale. Son identification reste un élément clé pour garantir une bonne maîtrise de la qualité de chènevotte. Car, il est plus simple et pratique de jouer sur ce paramètre lors du processus de transformation que d'adopter d'autres solutions proposées aujourd'hui, qui consistent à faire le traitement de la chènevotte et qui restent plus coûteuses et moins écologiques.

Cette identification peut passer par l'étude comparative des différentes tailles issues du même type de chènevotte, ou encore en mélangeant différentes tailles dans des proportions différentes pour arriver à identifier la distribution optimale. Il est d'ailleurs fort possible que la taille optimale ou la distribution granulométrique optimale puisse conduire à un bon compromis avec d'autres caractéristiques.

En ce qui concerne le modèle, bien que le choix effectué consiste à adopter les méthodes et protocoles déjà validés dans des études antérieures, il a été mis en évidence, la nécessité d'une étude sur certains éléments contribuant à la variabilité des propriétés du matériau étudié. Il s'agit de : (1) l'impact du laboratoire ayant réalisé les essais, (2) l'effet de la gâchée, (3) la taille et la forme des éprouvettes, (4) l'impact de la méthode de calcul du module sur les résultats obtenus, et (5) le nombre d'échantillons utilisés pour un résultat significatif. Notre étude met en évidence ce qui suit :

- les résultats obtenus par différents laboratoires montrent une bonne répétabilité pour la masse volumique et la contrainte maximale de compression, mais des variabilités considérables ont été observées dans le cas du module d'Young ;
- d'après les résultats, nous avons vu que la gâchée peut entraîner quelques variabilités ; en conséquence, la fabrication du béton en plusieurs gâchées doit être soigneusement réalisée ;
- la sensibilité du module vis-à-vis de sa méthode de calcul : la méthode flottante est ainsi préconisée ;
- l'éprouvette cylindrique donne des valeurs de masse volumique légèrement élevées et une conductivité thermique élevée ; sa forme arrondie et sa surface de contact faible conduisent à une fuite de chaleur du fil chaud et donc une conductivité thermique élevée ;
- d'après l'analyse effectuée sur le nombre d'échantillons à utiliser pour un résultat significatif, nous avons abouti à la conclusion que trois éprouvettes sont suffisantes. Cependant, dans le cas du module, la prise en compte de quatre éprouvettes représente un bon compromis entre le coût et la précision des résultats.

Par ailleurs, nous avons proposé une loi de comportement mécanique du béton de chanvre. Grâce à cette loi, il est possible d'exploiter la courbe expérimentale contrainte-déformation et d'obtenir les différents modules (apparent, élastique, etc.). Elle permet également de déterminer la courbe enveloppe correspondant à la courbe expérimentale issue du chargement monotone.

Vis-à-vis du modèle, pour les travaux futurs, compte tenu de la difficulté d'évaluer l'impact de chaque paramètre (interférence statistique), il est nécessaire de proposer une étude pour

dissocier l'impact de chaque paramètre ou encore faire appel à des méthodes de probabilité et statistiques comme les réseaux bayésiens par exemple. Au-delà des paramètres traités dans l'étude, d'autres aspects se sont avérés nécessaires pour une étude ultérieure. D'une part, suite à un problème de malaxage que nous avons rencontré lors de cette étude, il a été constaté que la qualité et la bonne homogénéité du mélange dépend du type de malaxeur utilisé. Il a été mentionné qu'à ce jour, il manque des méthodes communes pour évaluer la qualité ou l'homogénéité du béton de chanvre à l'état frais. Il serait intéressant d'étudier et d'analyser l'impact du type de malaxeur sur les propriétés du béton de chanvre, mais également de proposer des méthodes pour un contrôle de la qualité du béton de chanvre à l'état frais. Par ailleurs, bien que l'énergie de compactage n'ait pas été étudiée lors de cette étude, la démarche adoptée pour son contrôle, qui consiste à remplir un moule modèle pour chaque type de chanvre a montré ses limites lorsqu'il s'agit de faire le contrôle de cette énergie d'un type de chanvre à l'autre. Il est alors nécessaire de mettre au point un procédé de remplissage/compactage de moule à énergie contrôlée.

En sortie du modèle, il est clair que les propriétés du matériau sont sensibles, les résultats mettent en évidence les variabilités de deux origines distinctes : celles dues aux paramètres d'entrée d'une part et celles dues au modèle lui-même d'autre part. Une étude prenant en compte ces deux sources de variabilité (type de chanvre, laboratoire d'essai, etc.) a permis grâce à des tests d'ajustement de montrer que les valeurs expérimentales s'ajustent bien à trois lois de distribution, à savoir les lois normale, log-normale et Weibull. Sur la base de la loi normale, nous avons proposé les valeurs caractéristiques suivantes :

- 415 kg/m³ pour la masse volumique ;
- 0,30 MPa pour la contrainte maximale de compression ;
- 22,5 MPa pour le module d'Young.

Par ailleurs, il a été mis en évidence que seule la chènevotte peut faire varier les propriétés du béton de chanvre avec un facteur d'environ 10, en particulier pour les caractéristiques mécaniques. De plus, trois différents comportements du béton de chanvre ont été mis en évidence, ils sont caractérisés par de faibles (<7%), moyens (7 à 10%) et forts (>10%) niveaux de déformation.

A part les performances mécaniques, les valeurs des propriétés comme la masse volumique ou la conductivité thermique obtenues, bien qu'elles soient différentes d'un type de chanvre à l'autre, elles restent néanmoins du même ordre de grandeur. Sur la même échelle de comparaison, elles varient de 8 à 10 pour la masse volumique et de 7 à 10 pour la conductivité thermique.

Par conséquent, vis-à-vis de la sortie, et en ce qui concerne l'impact de la chènevotte sur les propriétés du béton de chanvre, les travaux à venir doivent s'intéresser également aux propriétés hygrothermiques et acoustiques, à la qualité de l'air et à la durabilité de ce matériau.

Certes, la variabilité constatée sur la chènevotte est présente chez d'autres granulats d'origine végétale (tournesol, balle de riz, etc.) dans des proportions soit comparable, soit plus ou moins différentes. Dans la mesure où ces ressources présentent un intérêt commun (écologiques, renouvelables, gestion de fin de vie facile, etc.), et à plus forte raison que des agrobétons issus de ces granulats sont d'actualité et pour lesquels on a moins de recul, il est intéressant d'analyser leur variabilité vis-à-vis de leurs granulats respectifs. La démarche adoptée dans cette thèse peut être ainsi utilisée comme référence dans le cas de ces matériaux.

Annexe A

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (phases)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	VM
B-11-1	6,26	15,84	22,17	23,34	20,45	4,97	15,03	20,39	21,78	19,07	12,81	14,06	13,62	13,50
B-11-2	15,15	23,95	28,05	28,00	26,67	8,87	22,27	26,14	26,10	24,84	16,22	16,14	15,42	15,93
B-11-3	13,02	15,92	23,59	28,93	22,81	5,17	14,76	21,62	26,48	20,95	12,64	14,19	15,43	14,09
B-11-4	10,96	23,98	29,60	30,86	28,14	7,67	23,09	28,32	29,04	26,82	17,90	18,77	18,26	18,31
B-11-5	19,17	28,35	31,27	30,42	30,01	10,19	26,73	30,00	28,56	28,43	19,81	19,72	17,76	19,10
VM	12,91	21,61	26,93	28,31	25,62	7,37	20,38	25,29	26,39	24,02	15,88	16,58	16,10	16,18
ET	4,80	5,53	3,90	3,01	3,92	2,29	5,28	4,17	2,88	3,93	3,14	2,59	1,90	2,48
CV	37,17	25,58	14,50	10,62	15,29	30,99	25,90	16,49	10,90	16,37	19,81	15,65	11,82	15,35
IC	5,96	6,86	4,85	3,73	4,86	2,84	6,55	5,18	3,57	4,88	3,90	3,22	2,36	3,08

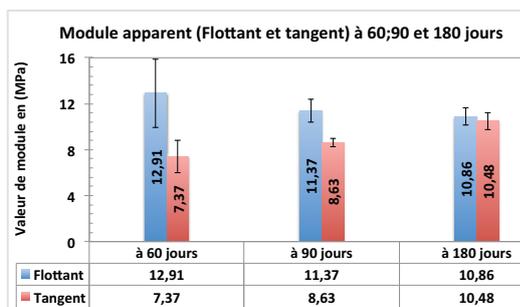
Tableau 5-12: Résultats de modules avec les méthodes flottant, tangent et cyclique à 60 jours

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (phases)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	3 ^è	N°	1 ^{ère}	2 ^è
B-11-6	10,45	40,41	40,56	40,79	40,59	8,96	38,03	38,21	38,31	38,18	40,95	36,05	33,65	36,88
B-11-7														
B-11-8	13,81	38,40	42,26	39,90	40,18	8,36	37,89	38,19	38,29	38,12	39,84	35,61	32,95	36,13
B-11-9	10,61	39,38	39,56	37,58	38,84	7,93	38,45	38,53	35,06	37,35	38,10	35,25	31,77	35,04
B-11-10	10,59	39,27	40,95	39,14	39,79	9,27	38,70	39,28	37,54	38,51	38,60	35,61	32,61	35,61
VM	11,37	39,37	40,83	39,35	39,85	8,63	38,27	38,55	37,30	38,04	39,37	35,63	32,75	35,92
ET	1,63	0,82	1,12	1,36	0,75	0,60	0,37	0,51	1,54	0,49	1,28	0,33	0,78	0,78
CV	14,35	2,09	2,73	3,46	1,88	6,96	0,98	1,32	4,12	1,29	3,25	0,92	2,39	2,18
IC	2,03	1,02	1,38	1,69	0,93	0,75	0,46	0,63	1,91	0,61	1,59	0,41	0,97	0,97

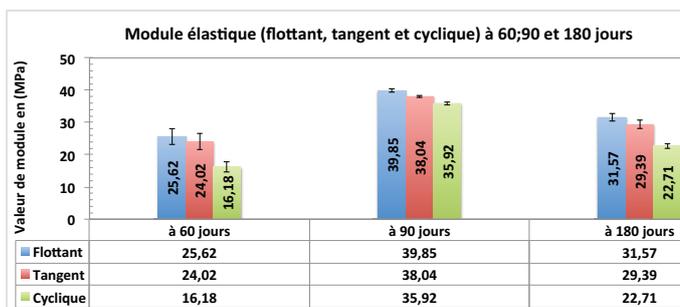
Tableau 5-13: Résultats de modules avec les méthodes flottant, tangent et cyclique à 90 jours

N°	Flottante (phases)					Tangente (phases)					Cyclique (phases)			
	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	4 ^è	VM	1 ^{ère}	2 ^è	3 ^è	VM
A-11-11	9,65	44,48	30,23	31,38	35,36	9,46	26,68	28,36	30,26	28,43	23,81	22,61	21,25	22,56
A-11-12	11,28	29,41	33,98	33,24	32,21	10,79	28,69	32,10	32,06	30,95	24,56	23,64	21,83	23,34
A-11-13	11,43	31,51	32,61	31,42	31,85	11,17	28,94	30,52	30,18	29,88	25,08	23,04	20,94	23,02
A-11-14	12,35	32,27	33,46	33,40	33,04	11,89	30,45	31,62	31,83	31,30	26,09	23,42	21,95	23,82
A-11-15	9,58	27,60	27,75	28,41	27,92	9,08	26,31	26,44	26,37	26,37	22,59	20,82	18,95	20,79
VM	10,86	33,05	31,61	31,57	32,08	10,48	28,21	29,81	30,14	29,39	24,43	22,71	20,98	22,71
ET	1,20	6,64	2,59	2,01	2,70	1,18	1,71	2,37	2,28	2,02	1,32	1,12	1,21	1,17
CV	11,09	20,10	8,20	6,37	8,40	11,25	6,07	7,95	7,56	6,88	5,40	4,95	5,77	5,14
IC	1,50	8,25	3,22	2,50	3,35	1,46	2,13	2,94	2,83	2,51	1,64	1,40	1,50	1,45

Tableau 5-14 : Résultats de modules avec les méthodes flottant, tangent et cyclique à 180 jours



a



b

Figure 5-40: CV de module apparent et élastique par les méthodes flottant, tangent et cyclique à 60, 90 et 180 jours, formulation B.

N°	Écrouissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5									
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e							
B-11-1	5,76	6,30	6,16	6,07	27,87	43,84	55,74	42,48	13,44	15,75	16,06	15,08	8,40	9,57	8,47	7,15	8,40	12,92	14,27	14,30	13,83	12,18	14,10	13,96	13,41
B-11-2	8,78	8,45	6,34	7,86	43,04	61,80	70,86	58,57	18,54	18,22	17,59	18,12	8,69	9,96	8,60	7,50	8,69	16,37	16,46	16,04	16,29	16,07	16,16	15,71	15,98
B-11-3	5,40	7,66	7,77	6,94	25,69	49,80	68,23	47,91	13,21	15,99	17,68	15,63	8,42	9,58	8,05	7,63	8,42	12,72	14,60	15,46	14,26	12,18	13,76	15,32	13,75
B-11-4	7,85	10,06	7,98	8,63	38,85	63,78	79,58	60,74	20,29	21,04	20,34	20,56	10,57	12,22	10,52	8,98	10,57	18,27	18,35	18,50	18,37	18,13	18,39	17,99	18,17
B-11-5	9,20	8,56	6,33	8,03	50,95	63,41	76,54	63,63	20,80	21,38	20,11	20,76	10,52	11,78	10,43	9,35	10,52	18,95	19,27	17,92	18,71	19,13	19,58	17,69	18,80
VM	7,40	8,21	6,92	7,51	37,28	56,53	70,19	54,67	17,26	18,48	18,36	18,03	9,32	10,62	9,21	8,12	9,32	15,85	16,59	16,44	16,29	15,54	16,40	16,13	16,02
ET	1,73	1,37	0,88	1,00	10,55	9,14	9,24	9,04	3,69	2,68	1,83	2,66	1,13	1,28	1,17	0,98	1,13	2,92	2,22	1,74	2,26	3,26	2,57	1,69	2,46
CV	23,45	16,75	12,75	13,37	28,31	16,17	13,17	16,53	21,36	14,49	9,94	14,76	12,09	12,02	12,69	12,03	12,09	18,43	13,36	10,59	13,86	20,97	15,66	10,48	15,38
IC	2,15	1,71	1,09	1,25	13,10	11,35	11,47	11,22	4,58	3,33	2,27	3,30	1,40	1,59	1,45	1,21	1,40	3,63	2,75	2,16	2,80	4,05	3,19	2,10	3,06

Tableau 5-15: Résultats du module par la méthode d'écrouissage et 5 stratégies à 60 jours

N°	Écrouissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5									
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e							
B-11-6	8,71	8,55	7,40	8,22	49,76	69,53	94,31	71,20	40,80	39,85	37,17	39,27	33,44	38,91	32,85	28,56	33,44	39,53	34,70	32,18	35,47	39,44	35,16	32,43	35,68
B-11-7																									
B-11-8	8,12	7,94	6,41	7,49	44,30	60,61	78,65	61,19	40,70	36,68	36,25	37,88	32,07	36,29	31,80	28,11	32,07	34,94	33,68	31,37	33,33	38,96	35,37	33,05	35,79
B-11-9	8,42	7,55	5,69	7,22	50,74	68,76	73,17	64,22	44,94	39,14	35,62	39,90	33,47	37,49	32,42	30,49	33,47	39,49	34,35	31,27	35,04	41,11	35,45	31,97	36,18
B-11-10	9,55	9,29	4,26	7,70	54,49	60,49	72,22	62,40	47,67	36,13	35,79	39,86	33,05	37,46	32,22	29,47	33,05	39,18	34,38	29,04	34,20	39,61	34,47	31,35	35,14
VM	8,70	8,33	5,94	7,66	49,82	64,85	79,59	64,75	43,53	37,95	36,21	39,23	33,01	37,54	32,32	29,16	33,01	38,29	34,28	30,97	34,51	39,78	35,11	32,20	35,70
ET	0,62	0,76	1,32	0,42	4,21	4,97	10,22	4,48	3,40	1,82	0,69	0,95	0,65	1,07	0,44	1,05	0,65	2,24	0,43	1,35	0,95	0,93	0,45	0,72	0,43
CV	7,08	9,11	22,24	5,53	8,45	7,67	12,84	6,91	7,80	4,80	1,92	2,41	1,98	2,86	1,35	3,61	1,98	5,84	1,25	4,35	2,74	2,33	1,27	2,23	1,20
IC	0,76	0,94	1,64	0,53	5,23	6,17	12,68	5,56	4,22	2,26	0,86	1,17	0,81	1,33	0,54	1,31	0,81	2,78	0,53	1,67	1,18	1,15	0,55	0,89	0,53

Tableau 5-16: Résultats du module par la méthode d'écrouissage et 5 stratégies à 90 jours

N°	Ecroûissage			Stratégie 1			Stratégie 2			Stratégie 3			Stratégie 4			Stratégie 5								
	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e	1 ^{ère}	2 ^e	3 ^e						
B-11-11	9,47	8,24	7,97	8,56	44,67	59,23	76,96	60,29	26,35	24,86	23,75	24,99	18,23	15,59	13,60	15,81	23,03	21,98	20,69	21,90	24,88	22,38	21,44	22,90
B-11-12	11,02	9,87	7,85	9,58	43,84	73,72	79,85	65,80	27,63	25,38	24,33	25,78	12,77	7,89	5,85	8,84	24,48	22,61	21,09	22,73	24,59	23,08	21,36	23,01
B-11-13	10,67	8,81	6,81	8,76	51,01	77,89	86,75	71,88	27,01	24,98	23,61	25,20	19,04	15,47	13,72	16,08	24,49	21,94	20,58	22,34	25,13	22,54	20,35	22,67
B-11-14	11,38	9,34	7,76	9,49	57,67	66,18	92,16	72,00	28,64	25,85	24,20	26,23	19,85	15,66	13,29	16,27	25,65	22,30	20,89	22,95	25,87	22,69	20,99	23,18
B-11-15	8,49	7,50	6,28	7,42	42,15	55,00	68,89	55,35	24,04	22,68	21,15	22,62	16,67	14,23	12,21	14,37	22,47	19,94	18,33	20,25	22,69	20,34	18,45	20,49
VM	10,21	8,75	7,33	8,76	47,87	66,40	80,92	65,06	26,73	24,75	23,41	24,96	17,31	13,77	11,73	14,27	24,02	21,75	20,32	22,03	24,63	22,21	20,52	22,45
ET	1,20	0,93	0,75	0,87	6,42	9,58	8,97	7,29	1,73	1,22	1,30	1,40	2,80	3,34	3,34	3,13	1,27	1,05	1,13	1,07	1,18	1,07	1,23	1,11
CV	11,74	10,58	10,20	9,94	13,42	14,43	11,09	11,20	6,46	4,93	5,54	5,60	16,16	24,24	28,49	21,92	5,29	4,83	5,55	4,88	4,81	4,84	6,01	4,95
IC	1,49	1,15	0,93	1,08	7,98	11,89	11,14	9,05	2,14	1,52	1,61	1,73	3,47	4,14	4,15	3,88	1,58	1,30	1,40	1,33	1,47	1,33	1,53	1,38

Tableau 5-17: Résultats du module par la méthode d'écroûissage et 5 stratégies à 180 jours

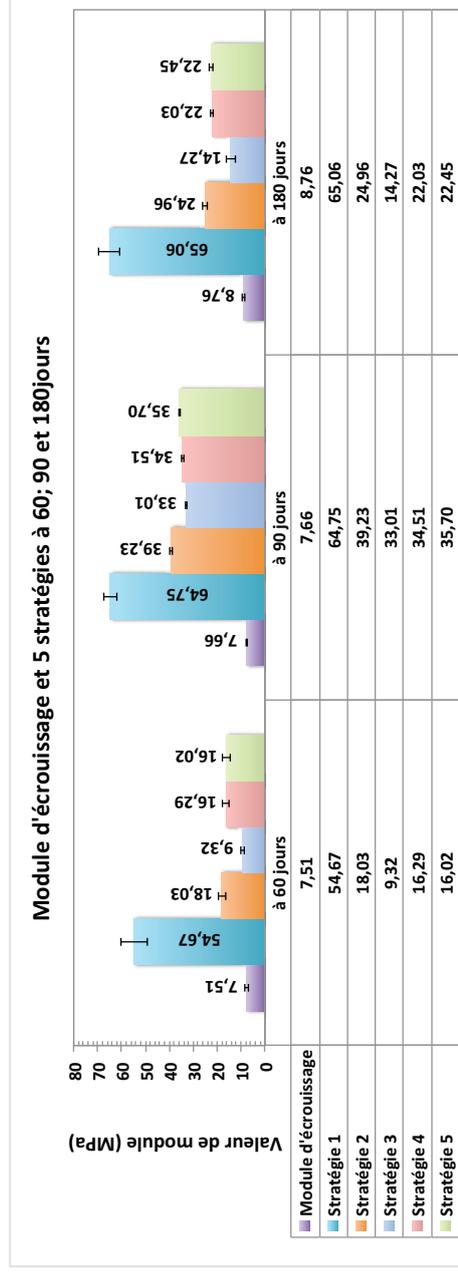


Figure 5-41: Valeurs du module d'écroûissage et élastique par la méthode d'écroûissage et 5 stratégies à 60, 90 et 180 jours, formulation

Annexe B

	N° éprouvette	MV initiale	MV avant séchage	Après séchage	Contrainte max	Contrainte à 5% de déformation	Module apparent	Module élastique	Déformation à contrainte max.
Moyenne	P-C2-11	672,30	436,08	407,50	0,55	0,51	29,49	54,22	8,34
	P-C4-11	654,58	411,50	392,74	0,40	0,34	15,00	29,45	11,30
	P-C5-11	694,61	455,73	426,09	0,84	0,79	46,77	87,41	6,07
	P-C12-11	722,75	451,49	431,02	0,44	0,40	16,39	37,66	8,75
	S-C3-11	639,73	411,02	389,90	0,61	0,60	33,49	56,81	7,29
	S-C6-11	765,58	490,74	460,25	1,07	1,05	61,00	114,17	4,34
	S-C10-11	837,31	493,74	477,65	0,18	0,16	4,89	15,59	8,96
	S-C11-11	733,12	430,64	416,71	0,44	0,22	6,17	18,45	20,01
	S-C13-11	796,85	465,07	449,19	0,13	0,05	5,68	18,99	3,26
Ecartype	P-C2-11	5,04	3,19	2,89	0,06	0,03	6,06	1,73	4,80
	P-C4-11	5,21	3,59	3,55	0,04	0,04	4,74	5,53	2,03
	P-C5-11	3,72	4,81	4,39	0,11	0,08	13,17	9,20	2,95
	P-C12-11	3,58	3,71	2,65	0,03	0,02	1,43	2,67	1,27
	S-C3-11	4,64	2,82	3,51	0,03	0,03	3,38	1,08	0,40
	S-C6-11	5,56	2,49	2,27	0,04	0,03	15,53	13,66	0,69
	S-C10-11	5,94	5,77	5,64	0,03	0,02	1,72	3,22	1,82
	S-C11-11	4,47	2,11	1,81	0,04	0,01	0,15	0,74	0,01
	S-C13-11	12,93	5,32	4,67	0,02	0,04	1,42	3,00	0,39
CV	P-C2-11	0,75	0,73	0,71	11,59	6,15	20,56	3,19	57,53
	P-C4-11	0,80	0,87	0,90	10,53	12,19	31,63	18,78	17,98
	P-C5-11	0,54	1,06	1,03	12,48	10,47	28,17	10,53	48,54
	P-C12-11	0,49	0,82	0,61	6,90	4,92	8,75	7,09	14,52
	S-C3-11	0,73	0,69	0,90	5,62	4,66	10,10	1,91	5,54
	S-C6-11	0,73	0,51	0,49	3,82	2,59	25,46	11,96	15,90
	S-C10-11	0,71	1,17	1,18	14,18	11,77	35,26	20,64	20,32
	S-C11-11	0,61	0,49	0,43	9,21	2,80	2,42	3,99	0,03
	S-C13-11	1,62	1,14	1,04	19,05	86,62	24,92	15,79	11,88
IC	P-C2-11	3,87	2,45	2,22	0,05	0,02	4,66	1,33	3,69
	P-C4-11	4,01	2,76	2,73	0,03	0,03	3,65	4,25	1,56
	P-C5-11	2,86	3,70	3,38	0,08	0,06	10,13	7,07	2,27
	P-C12-11	2,75	2,85	2,04	0,02	0,01	1,10	2,05	0,98
	S-C3-11	11,54	7,02	8,72	0,08	0,07	8,40	2,69	1,00
	S-C6-11	13,82	6,18	5,65	0,10	0,07	38,58	33,93	1,71
	S-C10-11	14,75	14,33	14,01	0,06	0,05	4,28	7,99	4,52
	S-C11-11	11,12	5,23	4,48	0,10	0,02	0,37	1,83	0,01
	S-C13-11	32,12	13,23	11,60	0,06	0,11	3,52	7,45	0,96

Tableau 5-18: Récapitulatifs des résultats à 30 jours, éprouvettes cylindriques

Moyenne	P-C2-15	654,27	431,21	396,10	0,56	0,55	59,68	86,99	2,73
	P-C4-15	602,99	385,58	365,26	0,27	0,26	37,59	34,98	2,00
	P-C5-15	599,07	399,05	369,27	0,57	0,31	90,05	82,43	1,62
	P-C12-15	679,23	433,78	423,80	0,52	0,45	59,46	69,24	2,49
Ecartype	P-C2-15	1,98	2,01	1,89	0,05	0,05	51,81	7,05	0,19
	P-C4-15	3,54	3,34	2,66	0,01	0,01	0,92	8,88	0,00
	P-C5-15	2,07	1,19	2,26	0,02	0,27	5,94	8,16	0,13
	P-C12-15	1,26	1,95	2,02	0,01	0,01	8,15	7,46	0,43
CV	P-C2-15	0,30	0,47	0,48	8,77	8,91	8,63	8,10	7,14
	P-C4-15	0,59	0,87	0,73	4,54	4,73	2,46	25,40	0,12
	P-C5-15	0,35	0,30	0,61	2,93	86,33	6,59	9,89	8,07
	P-C12-15	0,19	0,45	0,48	2,83	1,30	13,71	10,78	17,17
IC	P-C2-15	4,93	5,00	4,70	0,12	0,12	46,26	17,51	0,48
	P-C4-15	8,80	8,29	6,60	0,03	0,03	2,29	22,07	0,01
	P-C5-15	5,14	2,97	5,61	0,04	0,67	14,75	20,26	0,32
	P-C12-15	3,13	4,84	5,03	0,04	0,01	20,24	18,54	1,06

Tableau 5-19: Récapitulatifs des résultats à 30 jours, éprouvettes cubiques

	N° éprouvette	MV initiale	MV avant séchage	Après séchage	Contrainte max	Contrainte à 5% de déformation	Module apparent	Module élastique	Déformation à contrainte max.
Moyenne	P-C2-11	671,00	435,92	419,96	0,59	0,54	16,81	52,17	9,32
	P-C4-11	653,34	415,20	400,00	0,45	0,39	13,93	32,24	12,28
	P-C5-11	688,19	454,79	434,16	0,78	0,62	25,41	76,08	6,52
	P-C12-11	722,87	455,07	438,49	0,50	0,45	13,98	38,86	9,38
Ecartype	P-C2-11	4,33	2,05	8,21	0,02	0,02	5,09	6,52	1,29
	P-C4-11	6,63	5,42	4,96	0,05	0,04	6,98	6,60	3,42
	P-C5-11	3,58	2,39	2,63	0,09	0,31	4,51	10,74	3,36
	P-C12-11	2,24	2,92	2,28	0,04	0,03	5,81	6,03	1,41
CV	P-C2-11	0,65	0,47	1,95	4,04	4,48	30,31	12,49	13,83
	P-C4-11	1,01	1,31	1,24	10,83	11,65	50,09	20,48	27,82
	P-C5-11	0,52	0,53	0,61	11,54	49,90	17,76	14,11	51,54
	P-C12-11	0,31	0,64	0,52	7,77	5,61	41,59	15,52	15,03
IC	P-C2-11	4,54	2,15	8,61	0,02	0,03	5,35	6,84	1,35
	P-C4-11	6,96	5,69	5,20	0,05	0,05	8,67	6,93	3,59
	P-C5-11	3,76	2,51	2,76	0,09	0,33	4,74	11,27	3,52
	P-C12-11	2,35	3,06	2,39	0,04	0,03	6,10	6,33	1,48

Tableau 5-20: Récapitulatifs des résultats à 60 jours, éprouvettes cylindriques

	N° éprouvette	MV initiale	MV avant séchage	Après séchage	Contrainte max	Contrainte à 5% de déformation	Module apparent	Module élastique	Déformation à contrainte max.
Moyenne	P-C2-11	667,89	433,93	406,72	0,48	0,45	16,68	42,92	7,38
	P-C4-11	653,27	414,23	386,01	0,41	0,31	18,55	30,11	12,87
	P-C5-11	689,92	454,25	422,29	0,66	0,70	36,68	74,52	4,48
	P-C12-11	720,63	453,07	421,75	0,39	0,35	14,30	32,87	9,34
Ecartype	P-C2-11	8,76	5,37	4,92	0,06	0,04	4,48	5,15	1,14
	P-C4-11	4,63	3,25	3,03	0,05	0,07	6,41	2,92	3,60
	P-C5-11	6,17	3,55	3,13	0,16	0,07	7,75	5,17	1,42
	P-C12-11	2,62	2,14	2,01	0,05	0,05	1,58	2,53	2,41
CV	P-C2-11	1,31	1,24	1,21	12,83	9,42	26,87	12,00	15,47
	P-C4-11	0,71	0,78	0,78	12,44	22,22	34,56	9,71	27,96
	P-C5-11	0,89	0,78	0,74	24,36	9,88	21,13	6,94	31,61
	P-C12-11	0,36	0,47	0,48	13,12	13,85	11,07	7,69	25,80
IC	P-C2-11	21,77	13,34	12,22	0,15	0,11	11,13	12,80	2,84
	P-C4-11	11,51	8,06	7,53	0,13	0,17	15,93	7,26	8,94
	P-C5-11	15,33	8,82	7,78	0,40	0,17	19,25	12,84	3,52
	P-C12-11	6,50	5,30	4,98	0,13	0,12	3,93	6,28	5,98

Tableau 5-21: Récapitulatifs des résultats à 90 jours, éprouvettes cylindriques

Annexe B

	N° éprouvette	MV initiale	MV avant séchage	Après séchage	Contrainte max	Contrainte à 5% de déformation	Module apparent	Module élastique	Déformation à contrainte max.
Moyenne	P-C2-11	669,23	441,64	429,58	0,57	0,55	29,09	58,84	7,16
	P-C4-11	649,14	410,05	399,43	0,42	0,31	15,09	33,12	11,97
	P-C5-11	695,49	464,69	452,33	0,87	0,82	40,42	88,97	5,89
	P-C12-11	718,57	449,31	437,93	0,42	0,36	14,12	35,22	11,34
	S-C3-11	636,56	420,15	410,04	0,66	0,61	30,99	55,98	9,08
	S-C6-11	765,30	493,04	479,67	1,07	1,02	42,79	103,44	6,43
	S-C10-11	843,76	506,46	493,48	0,25	0,18	7,68	20,94	12,48
	S-C11-11	728,49	428,04	417,55	0,40	0,21	10,91	20,08	20,00
	S-C13-11	794,01	462,48	449,25	0,13	0,10	12,27	20,72	3,34
Ecartype	P-C2-11	3,84	2,48	2,57	0,04	0,03	4,36	6,72	1,20
	P-C4-11	6,19	8,25	8,29	0,07	0,08	2,95	5,95	2,90
	P-C5-11	3,58	2,65	2,52	0,06	0,06	12,09	11,90	3,61
	P-C12-11	4,73	5,13	4,89	0,07	0,05	1,21	4,84	3,53
	S-C3-11	4,69	2,16	2,03	0,05	0,04	3,42	4,54	1,46
	S-C6-11	3,68	9,75	9,63	0,14	0,15	14,94	22,93	2,00
	S-C10-11	4,56	8,12	7,58	0,00	0,00	1,15	0,78	0,50
	S-C11-11	5,25	3,01	2,80	0,05	0,01	2,15	1,78	0,00
	S-C13-11	0,71	1,13	1,39	0,02	0,05	4,76	4,70	0,79
CV	P-C2-11	0,57	0,56	0,60	7,68	5,08	14,99	11,42	16,79
	P-C4-11	0,95	2,01	2,08	17,16	24,32	19,52	17,97	24,25
	P-C5-11	0,51	0,57	0,56	6,72	7,90	29,90	13,38	61,21
	P-C12-11	0,66	1,14	1,12	15,68	13,82	8,58	13,75	31,11
	S-C3-11	0,74	0,51	0,49	7,15	6,69	11,05	8,11	16,13
	S-C6-11	0,48	1,98	2,01	13,45	14,18	34,92	22,17	31,06
	S-C10-11	0,54	1,60	1,54	1,96	0,91	15,00	3,72	4,01
	S-C11-11	0,72	0,70	0,67	13,40	3,92	19,67	8,85	0,00
	S-C13-11	0,09	0,24	0,31	15,41	50,71	38,77	22,67	23,62
IC	P-C2-11	4,03	2,60	2,69	0,05	0,03	4,57	7,05	1,26
	P-C4-11	6,50	8,65	8,70	0,08	0,08	3,09	6,24	3,05
	P-C5-11	3,76	2,78	2,64	0,06	0,07	12,68	12,49	3,78
	P-C12-11	4,96	5,39	5,13	0,07	0,05	1,27	5,08	3,70
	S-C3-11	11,65	5,37	5,04	0,12	0,10	8,50	11,28	3,64
	S-C6-11	9,14	24,22	23,93	0,36	0,36	37,12	56,97	4,96
	S-C10-11	11,32	20,16	18,82	0,01	0,00	2,86	1,94	1,24
	S-C11-11	13,05	7,47	6,94	0,13	0,02	5,33	4,41	0,00
	S-C13-11	1,76	2,80	3,45	0,05	0,13	11,82	11,67	1,96

Tableau 5-22: Récapitulatifs des résultats à 180 jours, éprouvettes cylindriques

Moyenne	P-C2-15	650,76	427,07	416,10	0,62	0,58	44,71	86,44	2,37
	P-C4-15	599,43	382,27	371,77	0,29	0,28	32,96	41,05	2,62
	P-C5-15	596,53	398,37	388,64	0,62	0,48	79,87	80,53	1,57
	P-C12-15	679,23	433,78	423,80	0,52	0,45	59,00	70,76	2,49
Ecartype	P-C2-15	1,28	0,48	0,43	0,01	0,02	30,99	12,27	0,53
	P-C4-15	3,71	2,55	3,16	0,03	0,03	17,07	3,61	0,55
	P-C5-15	1,38	1,53	1,56	0,02	0,04	21,10	6,06	0,38
	P-C12-15	3,07	1,72	1,77	0,03	0,07	15,37	5,55	0,46
CV	P-C2-15	0,20	0,11	0,10	2,21	4,28	69,32	14,19	22,47
	P-C4-15	0,62	0,67	0,85	11,27	9,29	51,77	8,79	21,02
	P-C5-15	0,23	0,38	0,40	3,11	8,19	26,42	7,53	23,96
	P-C12-15	0,45	0,40	0,42	6,40	15,85	26,06	7,84	18,48
IC	P-C2-15	3,17	1,20	1,07	0,03	0,06	76,99	30,47	1,32
	P-C4-15	9,22	6,33	7,84	0,08	0,06	42,39	8,96	1,37
	P-C5-15	3,42	3,80	3,87	0,05	0,10	52,42	15,06	0,93
	P-C12-15	7,63	4,28	4,41	0,08	0,18	38,19	13,78	1,14

Tableau 5-23: Récapitulatifs des résultats à 180 jours, éprouvettes cubiques

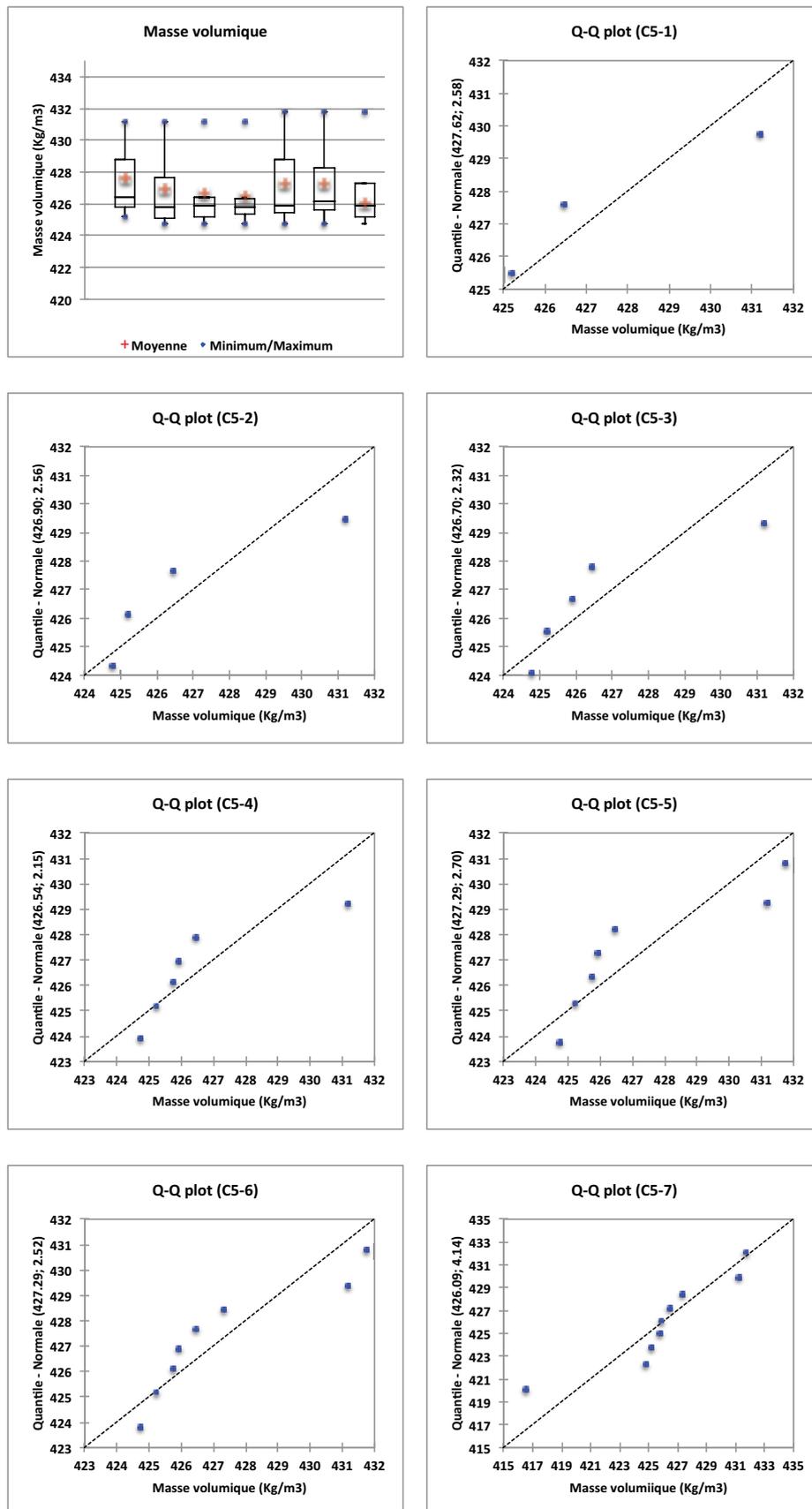


Figure 5-44: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour la masse volumique après séchage à 30j : C5

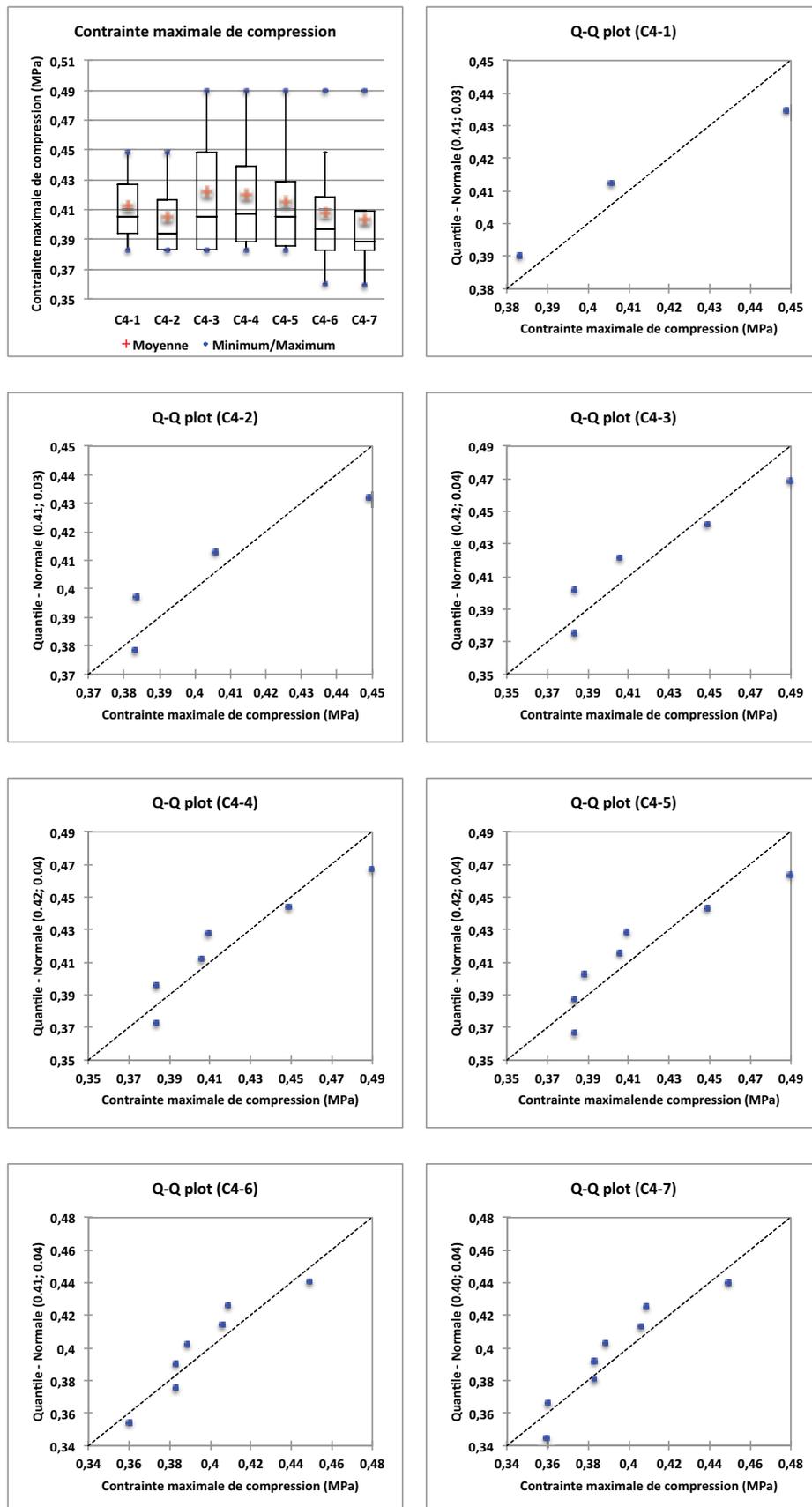


Figure 5-47: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour la contrainte de compression max. à 30j : C4

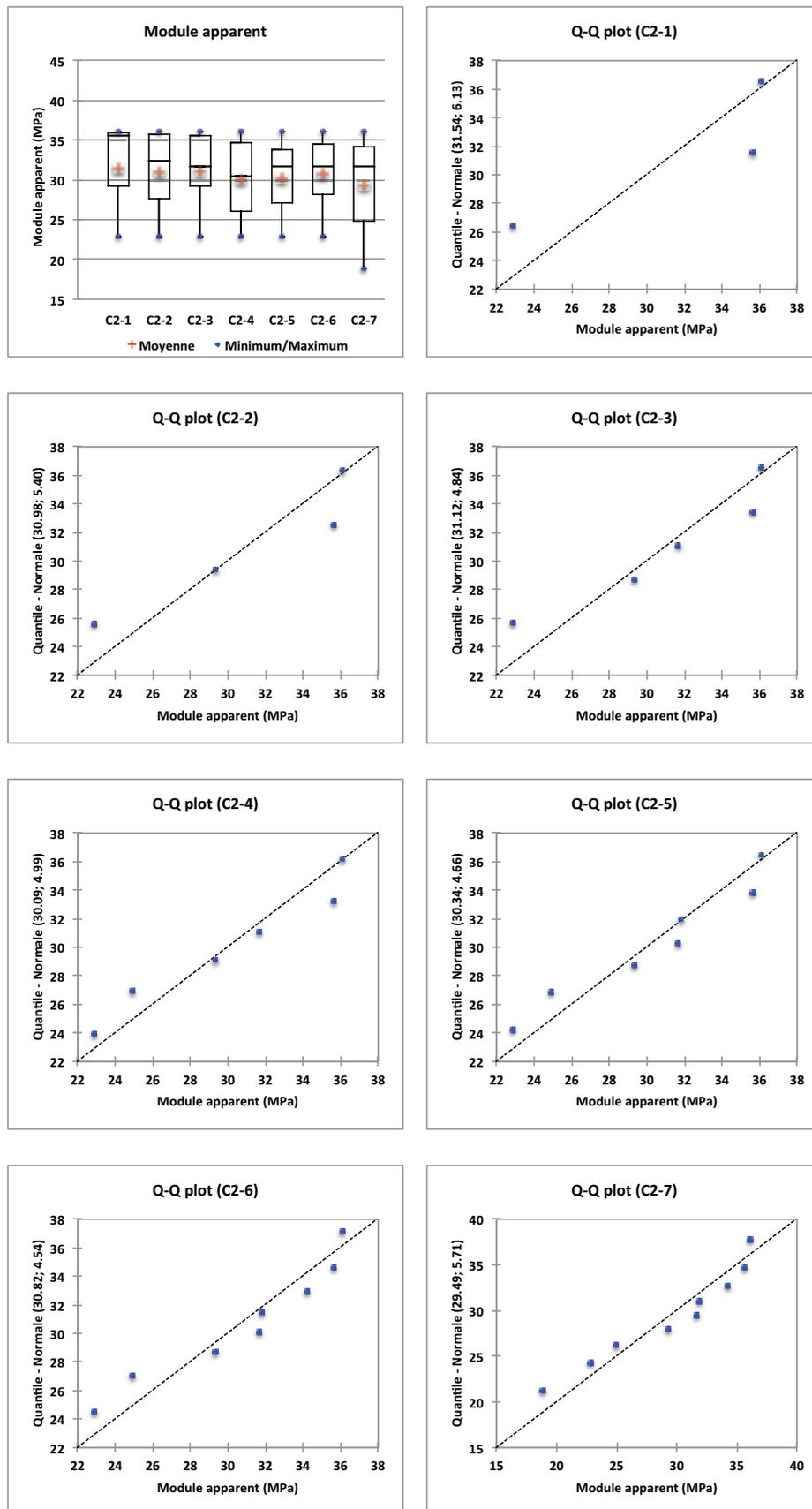


Figure 5-50: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour le module apparent à 30jours : C2

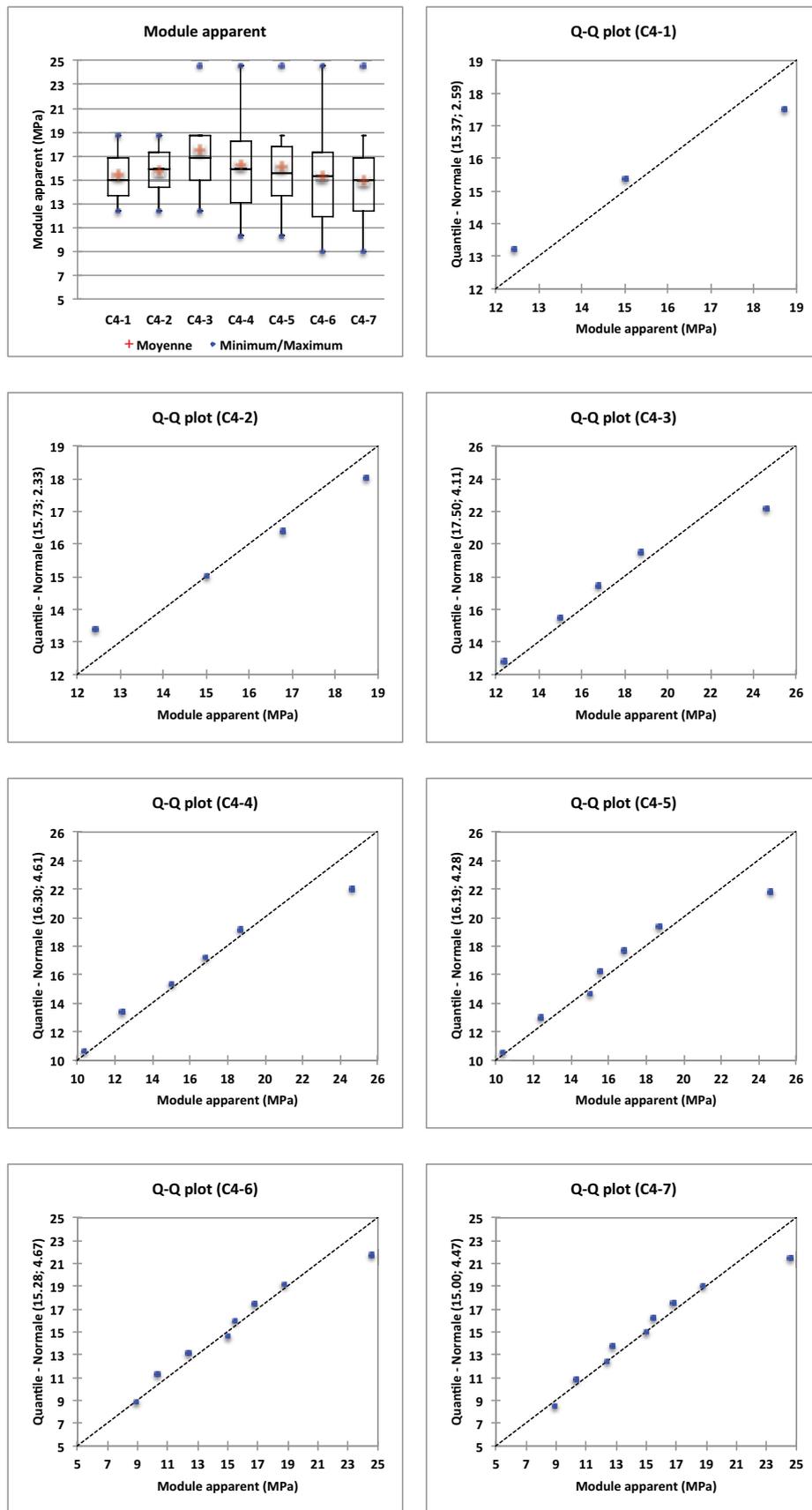


Figure 5-51: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour le module apparent à 30jours : C4

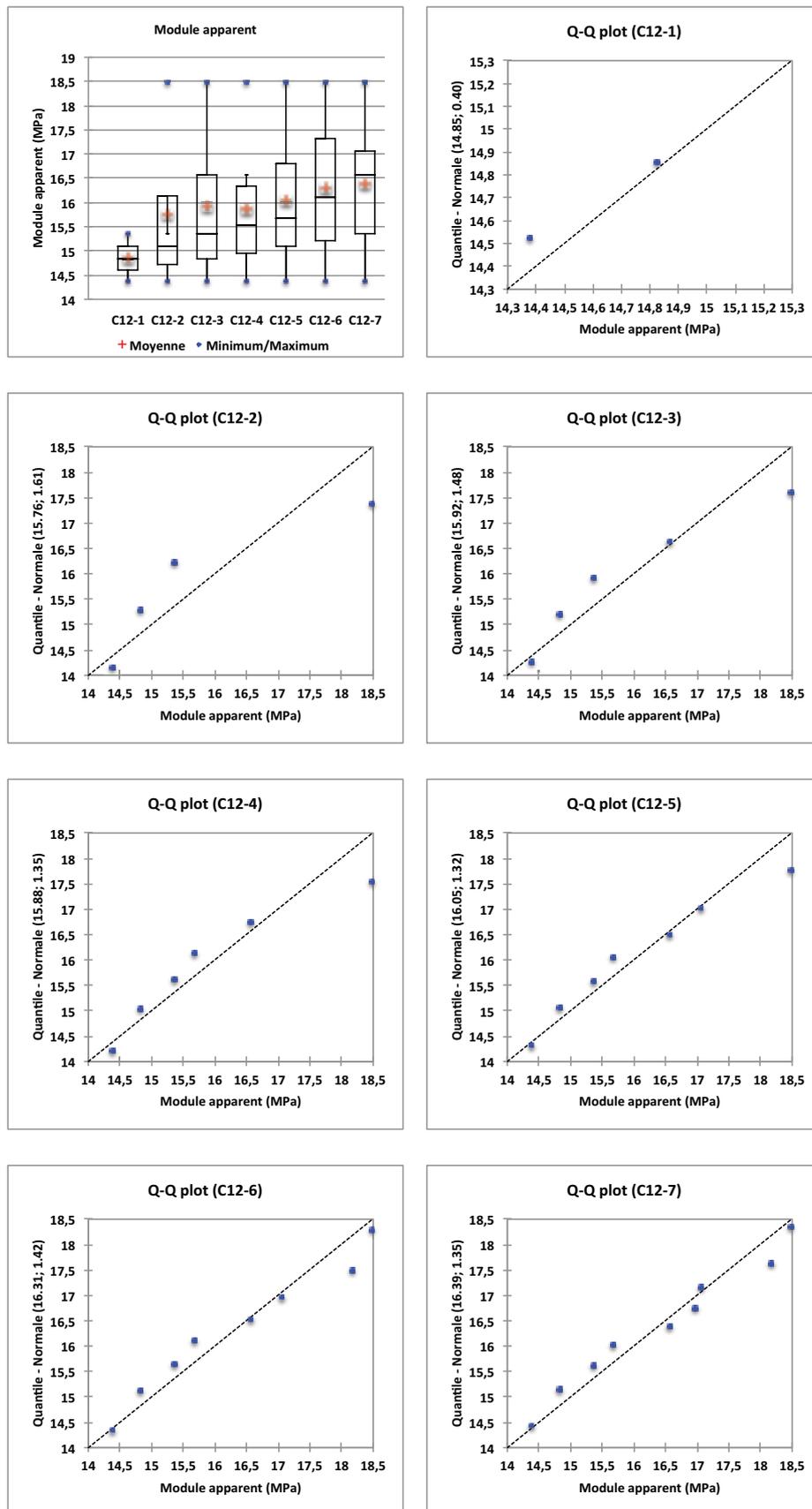
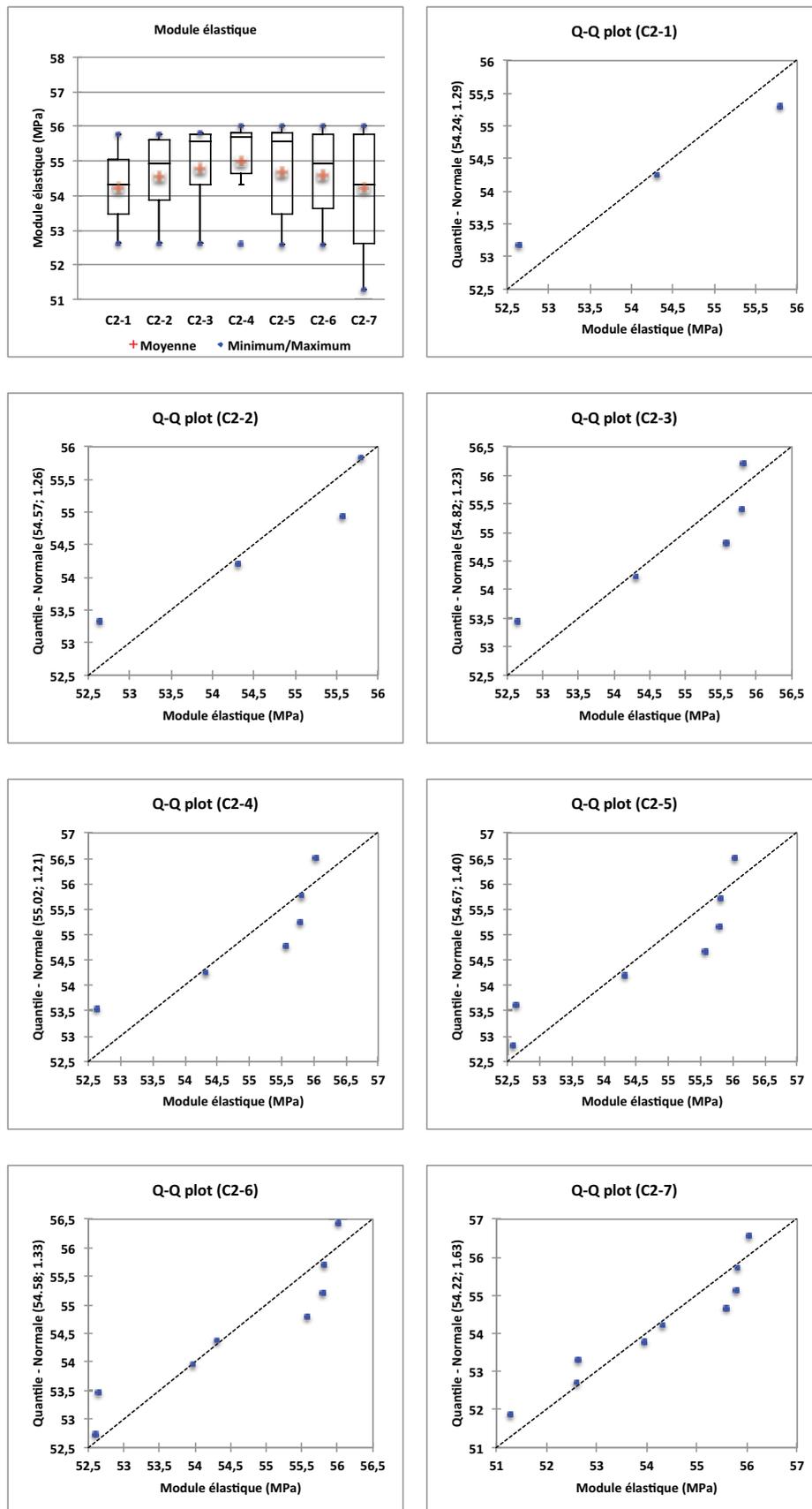


Figure 5-53: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour le module apparent à 30jours : C12



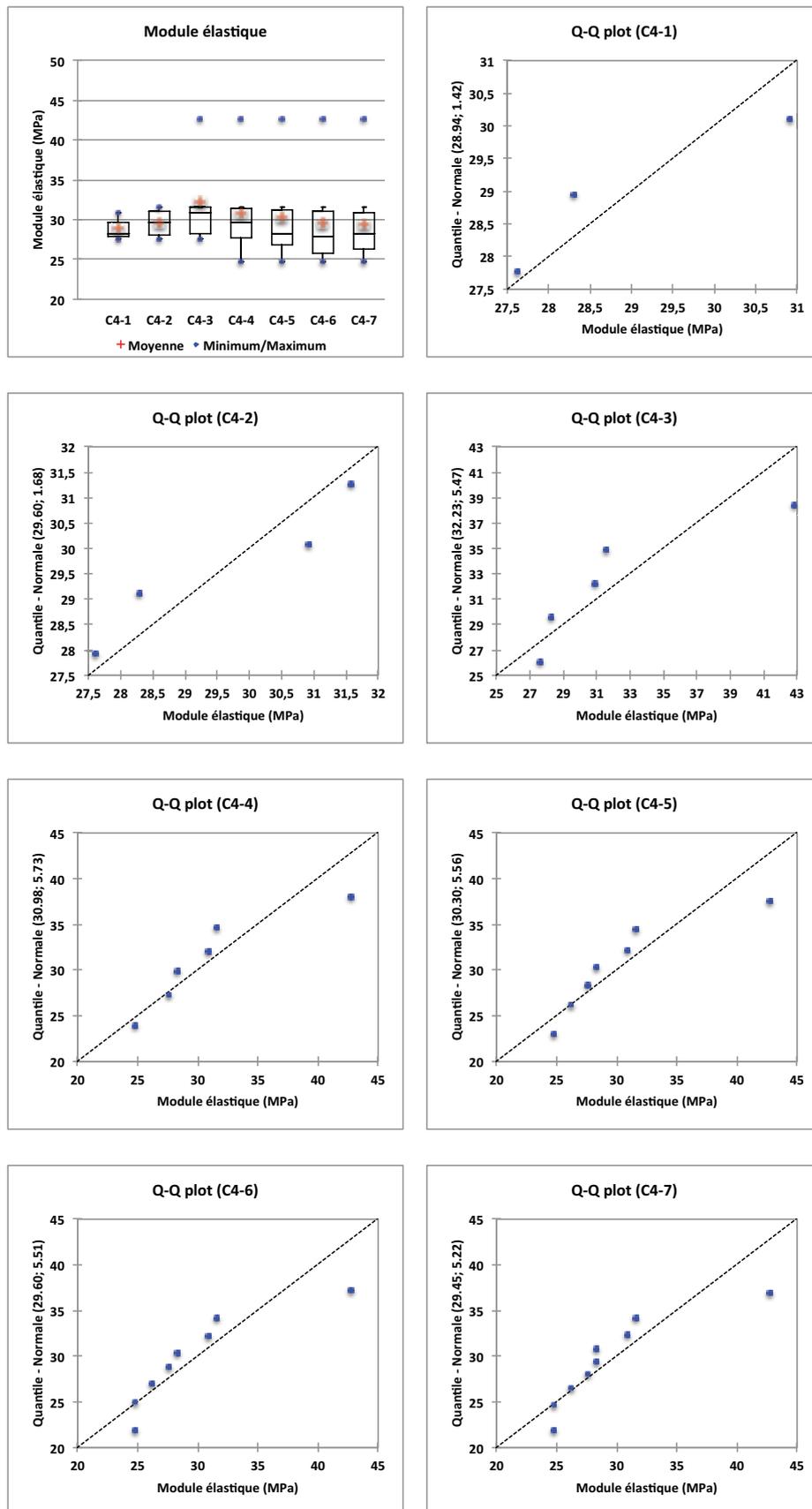


Figure 5-55: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour le module élastique à 30jours : C4

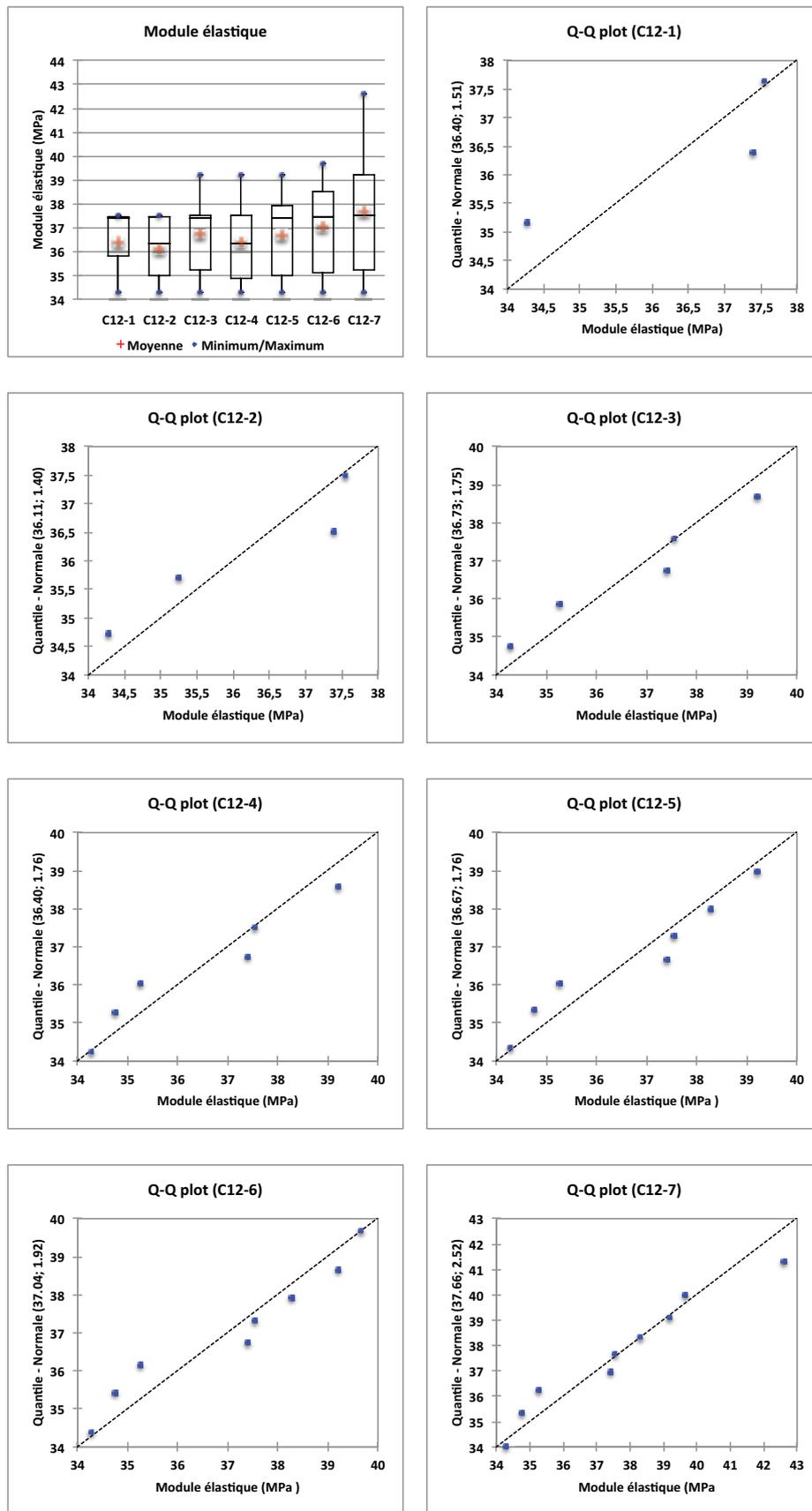


Figure 5-57: Analyse du nombre significatif d'échantillon pour le module élastique à 30jours : C12

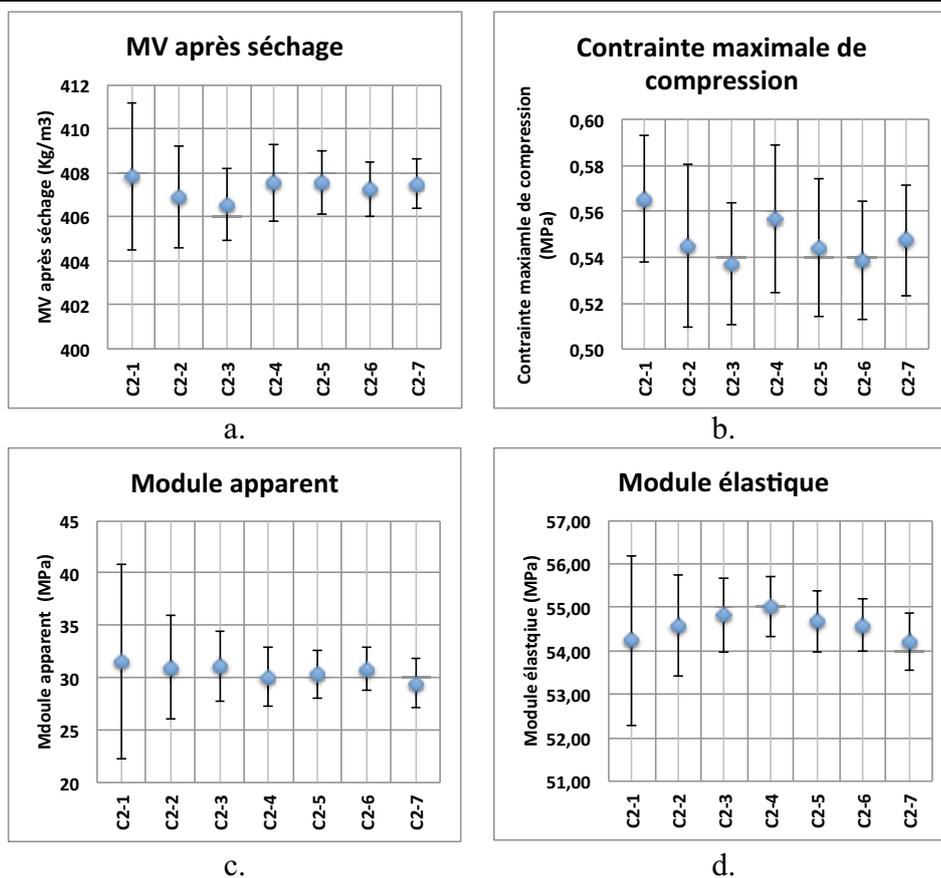


Figure 5-58: Moyenne et IC de la MV, la contrainte max. de compression, module apparent et élastique : C2

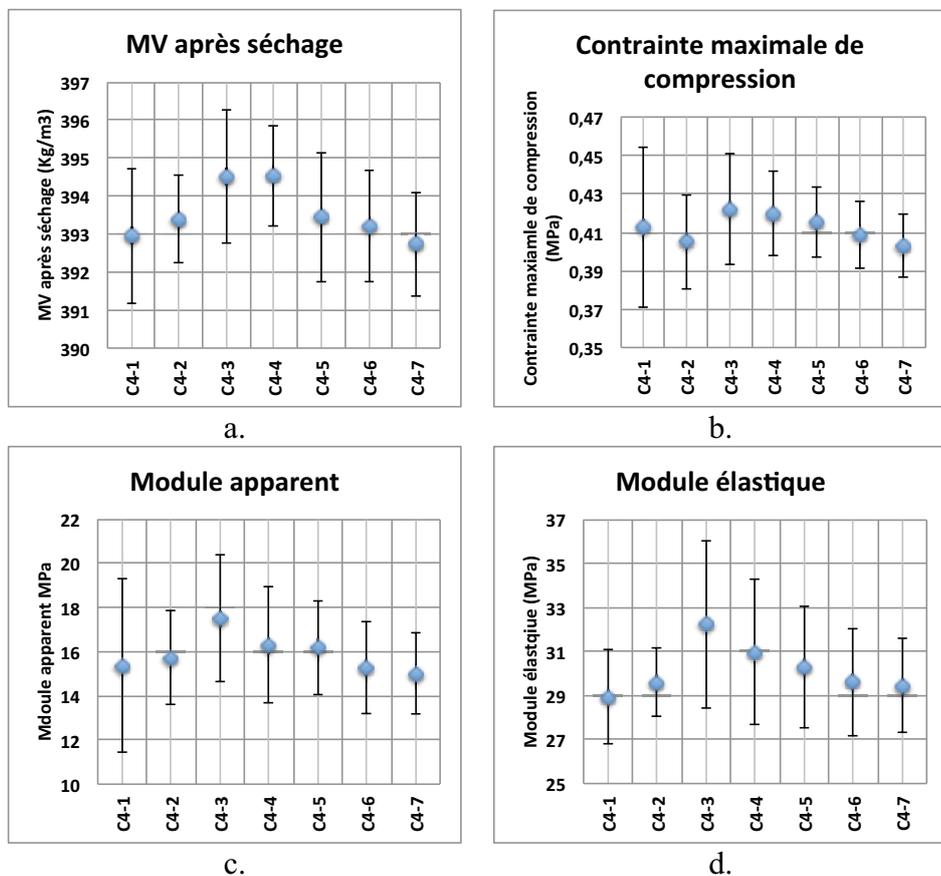


Figure 5-59: Moyenne et IC de la MV, la contrainte max. de compression, module apparent et élastique : C4

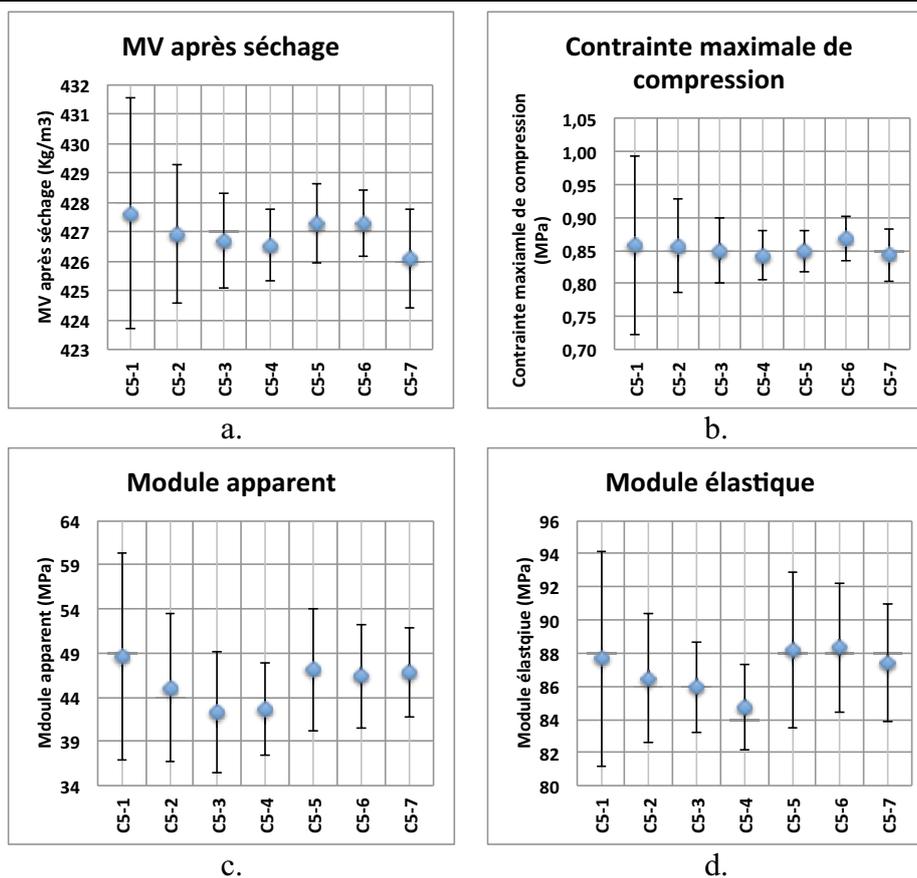


Figure 5-60: Moyenne et IC de la MV, la contrainte max. de compression, module apparent et élastique : C5

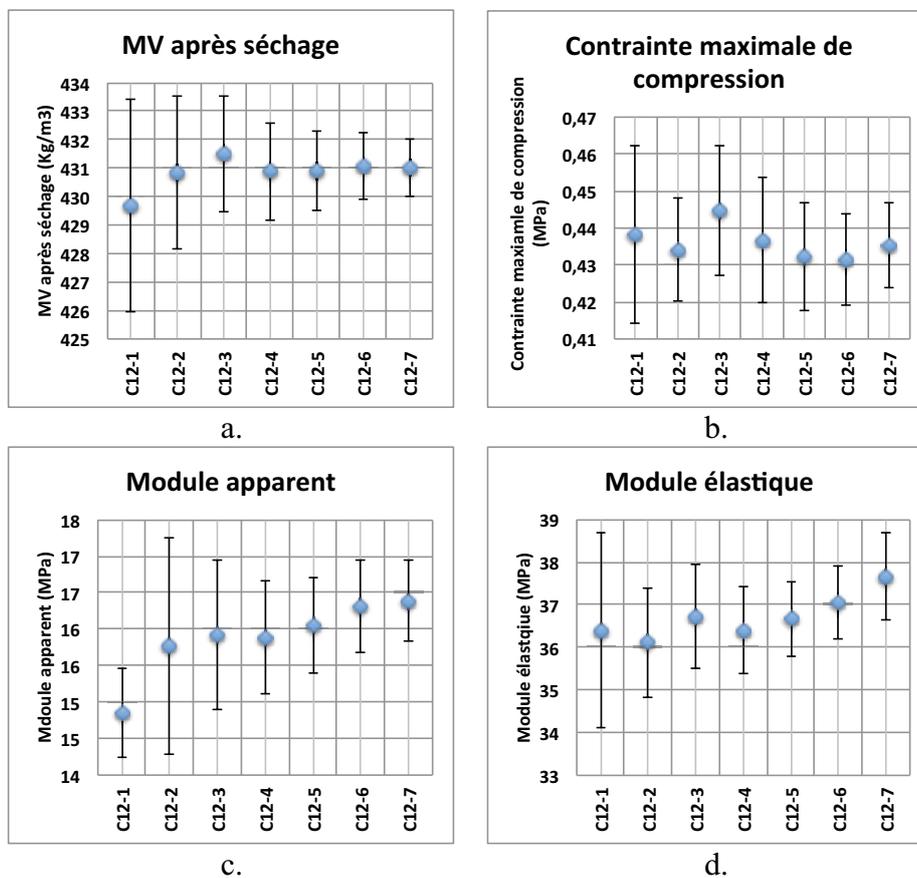


Figure 5-61: Moyenne et IC de la MV, la contrainte max. de compression, module apparent et élastique: C1

Annexe D

Dans cette annexe, nous avons repris les définitions des quelques notions de la statistique, principalement tirées de la référence [118]

1. Quantiles

Les quartiles sont des caractères de position partageant la série statistique ordonnée en k parties égales. Pour $k=4$, les quantiles, appelés quartiles, sont trois nombres Q_1 , Q_2 , Q_3 tels que :

- 25% des valeurs prises par la série sont inférieures à Q_1 ,
- 25% des valeurs prises par la série sont supérieures à Q_3 ,
- Q_2 est la médiane
- Q_3-Q_1 est l'intervalle interquartile, il contient 50% des valeurs de la série.

Pour $k=10$ et 100 on parle alors des déciles et centiles, respectivement.

1.1 Application

Le diagramme en boîte à moustache ou box-plot permet de représenter schématiquement les principales caractéristiques d'une distribution en utilisant les quartiles. La partie centrale de la distribution est représentée par une boîte de largeur arbitraire et de longueur la distance interquartile, la médiane est tracée à l'intérieur. La boîte rectangle est complétée par des moustaches correspondant aux valeurs suivantes :

- Valeur supérieure : $Q_3+1,5(Q_3-Q_1)$
- Valeur inférieure : $Q_1-1,5(Q_3-Q_1)$

Les valeurs extérieures « aux moustaches » sont représentées par des étoiles et peuvent être considérées comme aberrantes.

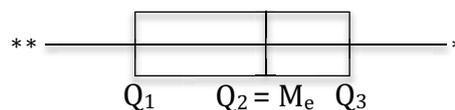


Figure 156: Exemple de la boîte à moustaches (les astérisques * représentent les valeurs aberrantes de la distribution)

2. Caractéristiques de distribution

Ces caractéristiques quantifient les fluctuations des valeurs observées autour de la valeur centrale et permettent d'apprécier l'étalement de la série. Les principales sont : l'écart-type ou son carré appelé variance, le coefficient de variation et l'étendue.

2.1 Variance et écart-type

La variance d'un échantillon est appelée aussi écart quadratique moyen ou variance empirique. Sa racine carrée est appelée l'écart-type. La moyenne \bar{x} et l'écart-type s s'exprime avec la même unité que les valeurs observées x_i . Son carré (variance) est donné par la formule :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2$$

La variance est donc égale à la moyenne des carrés moins le carré de la moyenne.

L'écart-type caractérise la dispersion d'une série de valeurs. Plus il est petit, plus les données sont regroupées autour de la moyenne et plus la population est homogène ; cependant avant de conclure, il faut faire attention à l'ordre de grandeur des données. L'écart-type permet aussi de trouver le pourcentage de la population appartenant à un intervalle centré sur l'espérance mathématique.

2.2 Coefficient de variation (CV)

Il s'exprime sous la forme d'un pourcentage, par l'expression suivante :

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

Le CV est adimensionnel. Il permet d'apprécier la représentativité de la moyenne par rapport à l'ensemble des données. Il permet aussi d'apprécier l'homogénéité de la distribution, une valeur du CV inférieure à 15% traduit une bonne homogénéité de la population. Il permet de comparer deux distributions, même si les données ne sont pas exprimées avec les mêmes unités ou si les moyennes des deux séries sont très différentes.

2.3 Estimation par intervalle de confiance

L'estimation ponctuelle d'un paramètre θ donne une valeur numérique unique à ce paramètre, mais n'apporte aucune information sur la précision des résultats, c'est-à-dire qu'elle ne tient pas compte des erreurs dues aux fluctuations d'échantillonnage par exemple. Pour évaluer la confiance que l'on peut avoir en une estimation, il est nécessaire de lui associer un intervalle qui contient, avec une certaine probabilité, la valeur du paramètre, c'est l'estimation par intervalle de confiance.

2.3.1 Intervalle de confiance

L'estimation par intervalle de confiance d'un paramètre θ consiste à associer à un échantillon, un intervalle aléatoire I , choisi de telle façon que la probabilité pour qu'il contienne la valeur inconnue du paramètre soit égale à un nombre fixé à l'avance, aussi grand que l'on veut. On écrit :

$$\Pr(\theta \in I) = 1 - \alpha$$

où $(1 - \alpha)$ est la probabilité associée à l'intervalle d'encadrer la vraie valeur du paramètre, c'est le seuil de confiance ou la quasi-certitude.

2.3.1.1 Propriétés des intervalles de confiance

- Un intervalle de confiance est un intervalle aléatoire car les bornes de cet intervalle sont des variables aléatoires, fonctions des observations.
- Le seuil α étant donné, il faut définir les nombres α_1 et α_2 . Leur choix dépend des problèmes à traiter, des risques encourus à négliger les petites ou les grandes valeurs du paramètre. Si on choisit $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/2$, on construit un intervalle de confiance

bilatéral à risques symétriques. On peut construire des intervalles de confiance unilatéraux, soit avec $\alpha_1 = 0$, soit avec $\alpha_2 = 0$.

- Le seuil α , les nombres α_1 et α_2 et la taille n étant fixés, on peut construire un intervalle de confiance associé à chaque échantillon. Cependant, parmi ces intervalles, une proportion égale à α % ne contiendra pas la valeur exacte du paramètre. Ce seuil α représente donc le risque que l'intervalle de confiance ne contienne pas la vraie valeur du paramètre. La situation la plus favorable correspond à choisir un risque α petit, associé à un intervalle de faible étendue.
- On peut diminuer la valeur du seuil α , et même à la limite, choisir $\alpha = 0$ pour avoir la certitude absolue. Dans ce cas, l'intervalle de confiance s'étend à tout le domaine de définition du paramètre, $]-\infty, +\infty[$ pour l'espérance mathématique ou $]0, +\infty[$ pour l'écart-type, par exemple ! Donc : diminuer la valeur de α revient à augmenter l'étendue de l'intervalle.
- Dans la pratique, on donne à α une valeur acceptable, de l'ordre de 5% puis, quand cela est possible, on augmente la taille de l'échantillon.
- La probabilité $(1 - \alpha)$ représente le niveau de confiance de l'intervalle ; ce niveau de confiance est associé à l'intervalle et non à la valeur de inconnue du paramètre.
- Pour définir un intervalle de confiance, il faut connaître un estimateur ponctuel du paramètre ainsi que sa loi de distribution.

3. Echantillon d'un couple de variables aléatoires

Soit un ensemble I de n individus décrits par deux variables quantitatives X et Y (ou caractères) ; les variables X et Y sont deux applications de I dans \mathbb{R} telles que :

$$I \xrightarrow{X} \mathbb{R} \qquad I \xrightarrow{Y} \mathbb{R}$$

$$i \xrightarrow{X} X(i) = x_i \qquad i \xrightarrow{Y} Y(i) = y_i$$

Un échantillon E du couple (X, Y) est donc l'ensemble des valeurs :

$$E = \{(x_i, y_i) \mid i \in I\}$$

Chaque individu est muni d'un poids p_i tel que :

$$\forall i \in I \quad p_i > 0 \qquad \sum_{i \in I} p_i = 1$$

Si les individus ont le même poids, alors $p_i = 1/n$.

A cet échantillon E , on peut associer deux échantillons d'une seule variable :

- un échantillon E_x de la variable X : $E_x = (x_i, i \in I)$
- un échantillon E_y de la variable Y : $E_y = (y_i, i \in I)$

L'étude des échantillons E_x et E_y ne suffit pas pour étudier l'échantillon E ; il faut mettre en évidence les liens ou l'absence de liens entre les deux variables X et Y .

3.1 Représentation de l'échantillon dans \mathbb{R}^2

- Nuage de points dans \mathbb{R}^2 .
- Centre de gravité \underline{G} ; en général, n'appartient pas au nuage.

3.2 Covariance et coefficient de corrélation

- Covariance des variables X et Y :

$$\text{Cov}(X, Y) = \sum_{i \in p} p_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

La covariance est sensible aux changements d'échelle sur les variables X et Y.

- Coefficient de corrélation linéaire (ou plus simplement « coefficient de corrélation ») entre les variables X et Y :

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Le coefficient de corrélation est sensible aux changements d'origine et d'échelle sur les variables X et Y.

La matrice de corrélation associée à l'échantillon E est:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r(X, Y) \\ r(X, Y) & 1 \end{pmatrix}$$

Dans le cas d'un échantillon de p variables aléatoires, on généralise facilement les résultats précédents au cas où n individus sont décrits par p caractères quantitatifs. A chaque caractère k, on associe une application \underline{X}^k , $k \in [1, p]$ telle que : $k \rightarrow X^k(i) = x_i^k$. Avec x_i^k la mesure du caractère k pour l'individu i. L'échantillon E des n individus décrits par p caractères est l'ensemble : $E = \{(x_i^1, \dots, x_i^p) / i = 1, \dots, n\}$, l'indice inférieur caractérise l'individu, l'indice supérieur le caractère. Dans ce cas, la matrice R de corrélation est la matrice suivante où r_{ij} est le coefficient de corrélation linéaire entre les variables \underline{X}^i et \underline{X}^j :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Il faut être très prudent dans l'interprétation d'un coefficient de corrélation. Si $r=1$ exactement, alors nous avons $y = ax + b$ (relation linéaire). Dans tous les cas, il faut commencer par examiner le nuage des points. En effet, selon la forme de ce nuage, ce coefficient n'a aucune signification : le nuage peut être très hétérogène ou bien la liaison n'est pas linéaire...



BATICHANVRE®



LIANT à la chaux naturelle NHL 5 de SAINT-ASTIER spécialement formulé pour la réalisation de mortiers et bétons en mélange avec du chanvre

POUR UN HABITAT SAIN ET ÉCOLOGIQUE

• CONDITIONNEMENT :

- Sac de 35 kg, palette de 11400

• PRÉCAUTIONS CLIMATIQUES :

- Utiliser entre 5 et 30°C

• COMPOSITION EN POIDS :

- Chaux hydraulique naturelle de Saint-Astier : 70%
- Liants hydrauliques et pouzzolaniques : 30%
- Adjuvants spécifiques



CHENEVOTTE : ISOCANNA

• CONSERVATION :

- 1 an à l'abri de l'humidité dans l'emballage d'origine

• ÉQUIVALENCE :

- 1 sac de 35 kg correspond à environ 40 litres de LIANT

Dosage pour le mélange en bétonnière CHAPES DE SOL ou MORTIER EN COLOMBAGES

OU	 BATICHANVRE®	+	 100 litres de chanvre	+	 3,5 à 4 35 à 40 litres d'eau	consommation moyenne par m ² pour 10 cm 40 kg de Batichanvre® + 115 litres de chanvre
	 10 litres de BATICHANVRE®	+	 25 litres de chanvre	+	 0,8 à 1 8 à 10 litres d'eau	

Dosage pour la réalisation D'ENDUITS ISOLANTS (3 à 8 cm d'épaisseur)

OU	 2 sacs de BATICHANVRE®	+	 100 litres de chanvre	+	 6 à 7 60 à 70 litres d'eau	consommation moyenne par m ² pour 5 cm 38,5 kg de Batichanvre® + 55 litres de chanvre
	 20 litres de BATICHANVRE®	+	 25 litres de chanvre	+	 1,5 à 1,7 15 à 17 litres d'eau	

Dosage pour la réalisation de MORTIER LÉGER EN SOUS-TOITURE (15 à 25 cm d'épaisseur)

OU	 BATICHANVRE®	+	 200 litres de chanvre	+	 3,5 à 4 35 à 40 litres d'eau	consommation moyenne par m ² pour 5 cm 9,7 kg de Batichanvre® + 55 litres de chanvre
	 10 litres de BATICHANVRE®	+	 50 litres de chanvre	+	 0,8 à 1 8 à 10 litres d'eau	

Avant tous travaux, consulter notre document "Le chanvre et les chaux naturelles de SAINT-ASTIER"

• NOTA

- Le BATICHANVRE® peut aussi être utilisé pour réaliser des mortiers de boutage de pierres et de briques ou des sous-enduits dans la restauration. Fiche prévisoire non contractuelle.

Bibliographie

- [1] G. Brundtland, Rapport Notre avenir à tous, 1987. http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/sites/odyssee-developpement-durable/files/5/rapport_brundtland.pdf.
- [2] F. Collet-Foucault, Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, (2004).
- [3] ONU, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. In: *Recueil des traités* vol. 1771 (1992), Nr. 30822.
- [4] GIE, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat, Seconde évaluation du GIEC - Changement de climat 1995, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, accessible est visité le 23/07/2014, 1995. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-fr.pdf>.
- [5] Kyoto, Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Nations Unies. 21 (1998).
- [6] R. Horton, Offline: France puts health at the centre of its climate vision. In: *The Lancet* vol. 385, Elsevier (2015), Nr. 9987, p. 2561.
- [7] M. Doelle, The Paris Agreement: Historic Breakthrough or High Stakes Experiment?, Available at SSRN. (2015).
- [8] Amisdelaterre, Transition écologique, (2014). <http://www.amisdelaterre.org/TRANSITION-ECOLOGIQUE.html>.
- [9] A.D. Tran Le, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Reims (2010).
- [10] P. Bouloc, *Le chanvre industriel: production et utilisations* : France Agricole Editions, 2006 — ISBN 2855571308.
- [11] P. Ranalli, *Advances in hemp research.* : Food Products Press, 1999 — ISBN 1560228725.
- [12] H. Godwin, Pollen-analytic evidence for the cultivation of *Cannabis* in England. In: *Review of Palaeobotany and Palynology* vol. 4, Elsevier (1967), Nr. 1, p. 71-80.
- [13] CenC, Chanvre, Production, Filière : Le Chanvre hier et aujourd'hui, (s. d.). http://www.construction-chanvre.asso.fr/chanvre,-production,-filiere_fr_50.html.
- [14] CETIOM, Chanvre / Cultiver du chanvre / Le chanvre et ses atouts, (2011). <http://www.cetiom.fr/chanvre/cultiver-du-chanvre/le-chanvre-et-ses-atouts/connaitre-le-chanvre/>.
- [15] M.R. Vignon, C. Garcia-Jaldon, D. Dupeyre, Steam explosion of woody hemp chenevotte. In: *International journal of biological macromolecules* vol. 17, Elsevier (1995), Nr. 6, p. 395-404.
- [16] Hara H., Study of the morphology of paper-making flax. In: *Japan Tappi*, vol. 30 (1976), p. 37-41.
- [17] Lohani B.K et B.Biswas, Examination of the bast fibre of *Cannabis sativa*, lin (wild variety). In: *The Textile Manufacturer* (1953), p. 329-332.
- [18] B.F. Tjeerdsma, F.H.A. Zomers, E.C. Wilkinson, R. Sierra-Alvarez, Modelling

- organosolv pulping of hemp. In: *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood* vol. 48 (1994), Nr. 5, p. 415-422.
- [19] T.T. Nguyen, Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Université de Bretagne Sud (2010).
- [20] D. Sedan, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite, Limoges (2007).
- [21] CANNABIS CLUB, Boissons au chanvre : Bière au chanvre certifiée biologique, (s. d.).
- [22] Le Cannabis, quoi et pourquoi., (s. d.). <http://www.feeduthe.com/content/19-cannabis>.
- [23] Roland R. Theimer, *Alimentation chanvre certifiée Biologique*. URL <http://www.rueduchanvre.com/Alimentation/graine.htm>. — La Maison du Chanvre.
- [24] LCDA, Chanvre un produit d'exception, la chènevotte, (s. d.). <http://www.chanvre.oxatis.com/PBCPPlayer.asp?ID=151425>.
- [25] L. Arnaud, *Bio-aggregate-based Building Materials: Applications to Hemp Concretes* : John Wiley & Sons, 2013 — ISBN 1118577043.
- [26] CenC, *Label Granulat Chanvre Bâtiment*. URL http://www.construction-chanvre.asso.fr/fic_bdd/pdf_fr_fichier/13572494190_2012-12-05Labelgranulatchanvreconstruction.pdf.
- [27] AFNOR, *Norme NF EN 1097-6-Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau*. AFNOR. éd. : Juin 2001.
- [28] AFNOR, *Norme NF EN 1097-3- Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-Partie 3: méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intragranulaire*. AFNOR. éd. : Août 1998.
- [29] R.M. Rowell, *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* : CRC Press, 2005 — ISBN 0203492439.
- [30] C. Magniont, Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources, Toulouse 3 (2010).
- [31] K.J. Niklas, H.-C. Spatz, Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. In: *American Journal of Botany* vol. 97, Botanical Soc America (2010), Nr. 10, p. 1587-1594.
- [32] L. Arnaud, E. Gourlay, Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. In: *Construction and Building Materials* vol. 28, Elsevier (2012), Nr. 1, p. 50-56.
- [33] V. Cérézo, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (2005).
- [34] D. SAMRI, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (2008).
- [35] V. Nozahic, Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal: application à des granulats de chènevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II (2012).

- [36] S. Liandrat, *Opération de recherche Matériaux Bio-sourcés Naturels*, Clermont-Ferrand, 2015.
- [37] T.M. DINH, *Développement et caractérisation d'éco-matériaux pour la construction*. Toulouse, 2014.
- [38] E. Gourlay, *Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre. Détermination de l'impact des matières premières et de la méthode de mise en oeuvre*. Lyon, 2014.
- [39] T. VERDIER, *Valorisation des granulats végétaux dans un matériau de construction à matrice minérale.*, Toulouse, 2012.
- [40] A. Evrard, *Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials*, (2008).
- [41] P. de Bruijn, P. Johansson, *Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete*. In: *Construction and Building Materials* vol. 47, Elsevier (2013), p. 1235-1242.
- [42] C. Cordier, *Caractérisation thermique et mécanique des bétons de chanvre.*, Vaulx-en-Velin, 1999.
- [43] S. Amziane, F. Collet, D. Mike Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, L. Arnaud, et al., *Round Robin Test for hemp shiv characterization : Committee report of TC - 236 Bio-Based Building Materials part II : bulk density and particle size distribution*, *Materials and Structures*. (En cours de soumission).
- [44] Y. Hustache, L. Arnaud, *Synthèse des connaissances sur les bétons et mortiers de chanvre*, *Construire en Chanvre*. (2008).
- [45] E. Gourlay, *Caractérisation de la chènevotte et influence des caractéristiques de la chènevotte sur celles des bétons de chanvre-chaux.*, Vaulx-en-Velin, 2008.
- [46] I. Couedel, *Le chanvre comme matériau de construction, première approche mécanique du béton de chanvre*, Vaulx-en-Velin, 1998.
- [47] E. Gourlay, *De la chènevotte au béton de chanvre, optimisation des propriétés mécaniques et hygrothermiques.*, Vaulx-en-Velin, 2009.
- [48] P. de Bruijn, *Hemp concretes: mechanical properties using both shives and fibres : Department of Rural Buildings, SLU/Sveriges Lantbruksuniversitet i Alnarp*, 2008 — ISBN 9185911879.
- [49] P.-Y. Bütschi, C. Deschenaux, B. Miao, N.K. Srivastava, *Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction : Département de génie civil, Faculté d'ingénierie, Université de Moncton*, 2004 — ISBN 061292789X.
- [50] C.A. Juárez, *Concretos base cemento portland reforzados con fibras naturales (Agave lecheguilla), como materiales para construcción en México*, Ph. D. thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León (2002).
- [51] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, L. Arnaud, et al., *Round Robin Test for hemp shiv characterization : Committee report of TC - 236 Bio-Based Building Materials part I: Evaluation of initial water content and water absorption*, *Materials and Structures*. (En cours de soumission).
- [52] V. Nozahic, S. Amziane, *Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder*. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* vol. 43, Elsevier (2012), Nr. 11, p. 1837-1849.
- [53] C. Groot, I. Larbi, *bond strength development in young*. In: *Heron* vol. 44 (1999), Nr. 0, p. 2.

- [54] J.-P. Laurent, Evaluation des paramètres thermiques d'un milieu poreux: optimisation d'outils de mesure « in situ ». In: *International journal of heat and mass transfer* vol. 32, Elsevier (1989), Nr. 7, p. 1247-1259.
- [55] S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, L. Arnaud, et al., Round Robin Test for hemp shiv characterization : Committee report of TC - 236 Bio-Based Building Materials part III : Thermal conductivity, Materials and Structures. (En cours de soumission).
- [56] A.M. Nazar, F.A. Silva, J.J. Ammann, Image processing for particle characterization. In: *Materials characterization* vol. 36, Elsevier (1996), Nr. 4, p. 165-173.
- [57] S. Liandrat, M. Trauchessec, S. Amziane, Characterization of hemp aggregates-comparison of several size analysis, in: First International Conference on Bio-based Building Materials « ICBBM », Clermont-Ferrand, Clermont Ferrand, 2015.
- [58] P.B. de Bruijn, K.-H. Jeppsson, K. Sandin, C. Nilsson, Mechanical properties of lime–hemp concrete containing shives and fibres. In: *Biosystems engineering* vol. 103, Elsevier (2009), Nr. 4, p. 474-479.
- [59] R. Bevan, T. Woolley, I. Pritchett, R. Carpenter, P. Walker, M. Duckett, *Hemp Lime Construction: a guide to building with hemp lime composites* : BRE Press, 2008 — ISBN 1848060335.
- [60] J. Lanas, J.I. Alvarez-Galindo, Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. In: *Cement and concrete research* vol. 33, Elsevier (2003), Nr. 11, p. 1867-1876.
- [61] A. Moropoulou, A. Bakolas, P. Moundoulas, E. Aggelakopoulou, S. Anagnostopoulou, Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. In: *Cement and Concrete Composites* vol. 27, Elsevier (2005), Nr. 2, p. 289-294.
- [62] A. Izaguirre, J. Lanas, J.I. Alvarez, Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars. In: *Construction and Building Materials* vol. 25, Elsevier (2011), Nr. 2, p. 992-1000.
- [63] A. Standard, C618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards. (2008).
- [64] N.F. EN, 197–1-Ciment—Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, AFNOR, Paris. (2001).
- [65] H. Pichon, Le système Pouzzolanes naturelles-Chaux–Eau à 38 et 100° C, Thèse de doctorat, Université de Grenoble I (1994).
- [66] R. Černý, A. Kunca, V. Tydlitát, J. Drchalová, P. Rovnaníková, Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. In: *Construction and Building Materials* vol. 20, Elsevier (2006), Nr. 10, p. 849-857.
- [67] R.D. Toledo Filho, K. Ghavami, G.L. England, K. Scrivener, Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. In: *Cement and Concrete Composites* vol. 25, Elsevier (2003), Nr. 2, p. 185-196.
- [68] P. Glé, Caractérisation acoustique des matériaux du bâtiment à base de particules végétales présentant plusieurs échelles de porosité, mémoire de Master Recherche, MEGA ENTPE. (2009).
- [69] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, C. Lanos, Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. In: *Energy and Buildings* vol. 62, Elsevier (2013), p. 294-303.

- [70] FFB, Construire en chanvre : Règles professionnelles d'exécution, Fédération Française du Bâtiment. Collection recherche développement métier, 2009.
- [71] C. Gross, P. Walker, Racking performance of timber studwork and hemp-lime walling. In: *Construction and Building Materials* vol. 66, Elsevier (2014), p. 429-435.
- [72] T.-T. Nguyen, V. Picandet, S. Amziane, C. Baley, Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* vol. 13, Taylor & Francis (2009), Nr. 9, p. 1039-1050.
- [73] J. Chamoin, Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation, INSA de Rennes (2013).
- [74] R. Walker, S. Pavia, R. Mitchell, Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes. In: *Construction and Building Materials* vol. 61, Elsevier (2014), p. 340-348.
- [75] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet, Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (« hempcrete ») manufactured by a projection process. In: *Construction and Building Materials* vol. 22, Elsevier (2008), Nr. 10, p. 2116-2123.
- [76] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateauneuf, L. Arnaud, B. Laetitia, F. Collet, et al., RRT3: Statistical analysis of hemp concrete mechanical properties variability, in: First International Conference on Bio-based Building Materials, ICBBM 2015, 2015.
- [77] E. GOURLAY, Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques et hygrothermiques du béton de chanvre. Détermination de l'impact des matières premières et de la méthode de mise en oeuvre, ENTPE, 2014.
- [78] V. Picandet, Biomaterials & Binders, European workshop in Darmstadt. (2011).
- [79] L. Arnaud, Comparative Study of Hygrothermal Performances of Building Materials, NOCMAT, Bath, UK. (2009) 6-9.
- [80] A.D. Tran Le, C. Maalouf, T.H. Mai, E. Wurtz, F. Collet, Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. In: *Energy and Buildings* vol. 42, Elsevier (2010), Nr. 10, p. 1797-1806.
- [81] A. Evrard, A. De Herde, Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies, *Journal of Building Physics*. (2009).
- [82] P. Mounanga, P. Poullain, G. Bastian, P. Glouannec, H. Khelifi, Influence de la composition et du mode de mise en oeuvre sur le développement des propriétés mécaniques du béton de chanvre, Rencontres de l'AUGC. (2009).
- [83] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, K. Saïdi, H. De Baynast, Design of green concrete made of plant-derived aggregates and a pumice–lime binder. In: *Cement and Concrete Composites* vol. 34, Elsevier (2012), Nr. 2, p. 231-241.
- [84] F. Murphy, S. Pavia, R. Walker, An assessment of the physical properties of lime-hemp concrete, Proceeding of the bridge and concrete research in Ireland, Cork. (2010).
- [85] G. Balčiūnas, S. Vėjelis, S. Vaitkus, A. Kairyte, Physical Properties and Structure of Composite Made by Using Hemp Hurds and Different Binding Materials. In: *Procedia Engineering* vol. 57, Elsevier (2013), p. 159-166.
- [86] H. Arbaoui, Mesure de la déformabilité des sols en place avec un pénétromètre,

- Clermont-Ferrand 2 (2003).
- [87] Daniel Llanca vargas, Caractérisation de tunnels anciens en maçonnerie par des techniques d'auscultation non conventionnelles - Application au réseau RATP, Clermont Ferrand 2, 2014.
- [88] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. In: *Journal of the European Ceramic Society* vol. 28, Elsevier (2008), Nr. 1, p. 183-192.
- [89] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, G. Sorrentino, Thermal and structural properties of a hemp–lime biocomposite. In: *Construction and Building Materials* vol. 48, Elsevier (2013), p. 745-754.
- [90] A.T. Le, A. Gacoin, A. Li, T.H. Mai, M. Rebay, Y. Delmas, Experimental investigation on the mechanical performance of starch–hemp composite materials. In: *Construction and Building Materials* vol. 61, Elsevier (2014), p. 106-113.
- [91] CONSTRUIRE, EN CHANVRE: Règles Professionnelles d'exécution, April (2007).
- [92] N. Stevulova, L. Kidalova, J. Cigasova, J. Junak, A. Sicakova, E. Terpakova, Lightweight composites containing hemp hurds. In: *Procedia Engineering* vol. 65, Elsevier (2013), p. 69-74.
- [93] Y. Diquelou, Interactions entre les granulats de chanvre et les liants à base de ciment et de chaux: Mécanismes de la prise et propriétés des interfaces formées dans les agrobétons., Reims (2013).
- [94] Y. Diquélou, E. GOURLAY, L. ARNAUD, B. KUREK, The impact of hemp shiv on cement setting and hardening: The influence of extracts and study of the interface. In: *IIBCC2012 Int. Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference Proceedings*, 2012, p. 41-50.
- [95] R. Bag, J. Beaugrand, P. Dole, B. Kurek, Viscoelastic properties of woody hemp core. In: *Holzforschung* vol. 65 (2011), Nr. 2, p. 239-247.
- [96] K. Bilba, M.-A. Arsene, A. Ouensanga, Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. In: *Cement and concrete composites* vol. 25, Elsevier (2003), Nr. 1, p. 91-96.
- [97] K. Luke, G. Luke, Effect of sucrose on retardation of Portland cement. In: *Advances in cement research* vol. 12, Thomas Telford (2000), Nr. 1, p. 9-18.
- [98] M.C. Garci Juenger, H.M. Jennings, New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. In: *Cement and concrete research* vol. 32, Elsevier (2002), Nr. 3, p. 393-399.
- [99] A. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, F. Benboudjema, N. Burlion, B. Capra, M. Carcasses, et al., Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. In: *Cement and concrete research* vol. 45, Elsevier (2013), p. 21-36.
- [100] S.A. Mirza, J.G. MacGregor, M. Hatzinikolas, Statistical descriptions of strength of concrete. In: *Journal of the Structural Division* vol. 105, ASCE (1979), Nr. 6, p. 1021-1037.
- [101] T. Chmielewski, E. Konopka, Statistical evaluations of field concrete strength. In: *Magazine of concrete research* vol. 51, Thomas Telford (1999), Nr. 1, p. 45-52.
- [102] J.M. Torrenti, Vers une approche probabiliste de la durabilité: application au cas de

- stockage de déchets nucléaires, in: Conférence GC, 2005.
- [103] F. Cussigh, V. Bonnard, C. Carde, O. Houdusse, Rion-Antirion bridge project concrete durability for prevention of corrosion risks, in: CONSEC'07 International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Tours, France, 2007.
- [104] F.M. Almeida Filho, B.E. Barragán, J.R. Casas, A.L.H.C. El Debs, Hardened properties of self-compacting concrete—a statistical approach. In: *Construction and Building Materials* vol. 24, Elsevier (2010), Nr. 9, p. 1608-1615.
- [105] R.E. Melchers, *Structural reliability* : Horwood, 1987 — ISBN 0853129304.
- [106] R. Atadero, L. Lee, V.M. Karbhari, Consideration of material variability in reliability analysis of FRP strengthened bridge decks. In: *Composite Structures* vol. 70, Elsevier (2005), Nr. 4, p. 430-443.
- [107] D. Breysse, *Maîtrise des risques en génie civil: Multiples dimensions des risques en génie civil; Volume 2, Maîtrise et gestion des risques dans l'aménagement et la construction; Volume 3, Sécurité des constructions et réglementation* : Hermès science publications-Lavoisier, 2009 — ISBN 2746224410.
- [108] A. Sellami, M. Merzoud, S. Amziane, Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetal fibers. In: *Construction and Building Materials* vol. 47, Elsevier (2013), p. 1117-1124.
- [109] C. Dehon, J.-J. Dreesbeke, C. Vermandele, *Éléments de statistique: 5e édition revue et augmentée*, Éditions de l'Université de Bruxelles (2008).
- [110] D. Ricotier, D. Vié, *Dimensionnement des structures en béton selon l'Eurocode 2 De la descente de charge aux plans de ferrailage*, Le Moniteur, 2012.
- [111] P. Jaffard, *Initiation aux méthodes de la statistique et du calcul des probabilités* : Masson, 1986 — ISBN 2225809410.
- [112] R. Journeaux, *Traitement des mesures : interprétation, modélisation, outil statistique*. Ellipses. éd. Paris, 2009.
- [113] B.J. Feir-Walsh, L.E. Toothaker, An empirical comparison of the ANOVA F-test, normal scores test and Kruskal-Wallis test under violation of assumptions. In: *Educational and Psychological Measurement* vol. 34, Sage Publications (1974), Nr. 4, p. 789-799.
- [114] S. Adinsoft, XLSTAT-software, version 10, Addinsoft, Paris, France. (2010).
- [115] T.L. Anderson, T.L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications* : CRC press, 2005 — ISBN 0849316561.
- [116] C. Niyigena, S. Amziane, A. Chateaneuf, L. Arnaud, L. Bessette, F. Collet, et al., Variability of the mechanical properties of hemp concrete, *Materials Today Communications*. (2016). doi:10.1016/j.mtcomm.2016.03.003.
- [117] D. Llanca-Vargas, *Caractérisation de tunnels anciens en maçonnerie par des techniques d'auscultation non conventionnelles. Application au réseau RATP*, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II (2014).
- [118] R. Veysseyre, *Aide-mémoire de statistique et probabilités pour l'ingénieur-2ème édition* : Dunod, 2006 — ISBN 2100527762.