



**HAL**  
open science

## Paramètres de composition des mélanges de particules de chènevotte pour l'élaboration de béton de chanvre

Hanaa Fares, André Lecomte

### ► To cite this version:

Hanaa Fares, André Lecomte. Paramètres de composition des mélanges de particules de chènevotte pour l'élaboration de béton de chanvre. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. hal-01144417

**HAL Id: hal-01144417**

**<https://enpc.hal.science/hal-01144417v1>**

Submitted on 21 Apr 2015

**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.

Public Domain

# Paramètres de composition des mélanges de particules de chènevotte pour l'élaboration de béton de chanvre

Hanaa Fares\*<sup>1</sup>, André Lecomte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, Institut Jean Lamour, UMR CNRS 7198, CP2S  
Matériaux pour le Génie-Civil, IUT de Nancy-Brabois, F-54600 Villers-lès-Nancy

\* [hanaa.fares@univ-lorraine.fr](mailto:hanaa.fares@univ-lorraine.fr)

**RESUME** : L'étude se place dans une démarche d'éco-construction avec pour principal axe la conception d'éco-matériau et de complexes constructifs innovants destinés à l'isolation des bâtiments de basse consommation (BBC) notamment. La chènevotte issue du chanvre est un co-produit de plus en plus appréciée pour cet usage. Afin d'établir la composition de bétons incorporant ces fibres végétales, trois niveaux de broyage ont été appliqués sur une même chènevotte, et ces fractions ont été analysées du point de vue de la morphologie et de la compacité des particules. Deux méthodes sont employées pour la caractérisation granulométrique : l'analyse par tamisage et l'analyse d'images. Compte tenu de l'élançement élevé de la plupart des fibres, le tamisage ne donne qu'une description partielle de la distribution granulaire. L'analyse d'images complète l'identification, et ses paramètres (diamètre de Féret, élançement, etc.) sont utiles à l'optimisation du squelette végétal, sous l'aspect de sa compacité notamment. Des mesures de compacité individuelles et des mesures complémentaires sur des mélanges apportent des éléments nouveaux pour comprendre les relations contrôlant l'empilement granulaire des fibres végétales.

**ABSTRACT**: This study is located in a green building approach axed on the eco-materials and innovative construction complexes for building insulation and sustainable development. The shive (a co-product of hemp) may be one of the first used plants for this purpose. To determine the concrete mix with vegetable fibers, three levels of milling were applied to the same shives and these fractions were analyzed in terms of size and packing densities. Two methods are used to characterize the particle size: sieve analysis and image analysis. Grain size analysis by sieving gives only a partial description of the distribution. Image analysis completes the grain size distribution and its parameters (Féret diameter, throbbing, etc.) are useful in optimizing plant skeleton. Packing densities (on individual shive and on a series of mixture) bring new elements to understand the relationship controlling the granular stack of vegetable fibers.

**MOTS-CLÉS** : Chènevotte, granulométrie, tamisage, analyse d'image, compacité

**KEYWORDS**: shive hemp, grain size, sieve analysis, image analysis, packing density

## 1. INTRODUCTION

La France est le premier producteur européen de chanvre (*Cannabis Sativae*) [1]. Aujourd'hui, ce matériau est de plus en plus utilisé dans le domaine de l'habitat, pour des raisons écologiques et de confort de vie principalement. Il peut y être mis en œuvre sous différentes formes : panneaux, laines, isolation en vrac ou encore béton de chanvre.

Rappelons que le défilage du chanvre par battage mécanique fournit plusieurs produits :

- la fibre (partie externe), utilisée principalement pour le papier et la laine isolante : ~ 32 %
- la chènevotte (partie interne), employée pour la litière animale et le béton de chanvre: ~ 42 %

- la poudre, issue du processus du défibrage et assimilable à de la poussière : ~ 18 %
- le chènevis, correspondant aux graines : ~ 8%

Après l'étape de broyage/défibrage, la paille de chanvre subit généralement encore un hachage qui transforme la chènevotte en un granulats végétal léger réputé stable chimiquement, notamment s'il est conservé à l'abri de l'humidité.

Toutefois, les grains de ce granulats singulier ont des formes plus ou moins parallélépipédiques ou élancées, ce qui constitue une réelle difficulté pour former le squelette compact d'un béton. La structure du composite ainsi formé nécessite alors généralement un volume de pâte élevé, au détriment le plus souvent des propriétés recherchées.

Afin de mieux maîtriser les paramètres de composition des bétons de chanvre, il importe par conséquent d'avoir, d'une part, une bonne description morphologique des grains de chènevotte et, d'autre part, une évaluation de leur aptitude à former des empilements plus ou moins compacts, dans des conditions de mise en œuvre données.

Cette étude expérimentale s'intéresse à ces deux aspects.

## 2. MATERIAUX

La chènevotte utilisée dans cette étude a été fournie par une société de l'Est de la France. Elle correspond à l'étape finale du processus de défibrage industriel du chanvre par battage et broyage mécanique. A ce stade, la paille dépourvue de fibres est hachée, dépoussiérée et conditionnée en ballots. Un échantillon issu de ce processus a été utilisé comme matériaux de référence. Afin d'évaluer l'effet du hachage sur la morphologie des particules (i.e. obtenir des grains plus ou moins aptes à s'empiler), la même chènevotte a subi deux passages supplémentaires dans le hachoir, en prélevant à chaque fois un échantillon représentatif. Trois chènevotte différentes ont ainsi été pu être obtenues (voir tableau 1).

Tableau 1 : Repérage des échantillons de chènevotte utilisés

Référence	Nombre de cycle de hachage
C1	1
C2	2
C3	3

## 3. MORPHOLOGIE

La caractérisation morphologique de ces trois granulats de chènevotte a consisté à déterminer leur granularité et divers paramètres de leur forme déduits d'une technique d'analyse d'image.

### 3.1. GRANULARITE

Elle a été déterminée par tamisage selon le protocole de la norme NF EN 933-1 [2], avec des tamis à trous carrés (> 4mm) ou à mailles carrées ( $\leq$  4 mm).

Chaque échantillon de chènevotte a été lavé à 63 $\mu$ m (élimination de la poussière) et séché à 70°C jusqu'à masse constante, puis versé dans la colonne de tamis fixée sur un vibreur automatique. Les cycles de vibration alternée ont duré 20 minutes. La masse d'échantillon (200 grammes environ) a été

déterminée de façon à avoir un volume minimum normatif comparable à celui d'un granulats courant de même taille maximale D.

Les refus dans chaque tamis ont ensuite été pesés et rapportés à la masse de départ. La figure 1 présente les courbes granulométriques obtenues en termes de masse de passants cumulés, exprimée en pourcentage, en fonction de l'ouverture des tamis, selon les dispositions de la norme NF EN 933-1. Chaque courbe correspond à la moyenne de trois essais.

Bien que la granulométrie par tamisage soit la technique de référence pour les granulats minéraux, il faut reconnaître qu'elle est ici d'un intérêt plutôt limité car elle est tributaire du fort élancement des grains de chènevotte [3]. En effet, dans l'opération, les grains allongés sont difficilement sollicités dans le sens de leur grosseur (i.e. la dimension de la maille qui laisse théoriquement passer le grain), en raison de leur inertie propre qui les maintient en position d'équilibre stable, c'est-à-dire à plat dans les tamis. Ces grains restent alors dans le ou les tamis supérieurs, faussant ainsi la représentativité de l'essai.

Néanmoins, comme les essais ont été faits dans les mêmes conditions, l'observation comparée de leur résultat apporte déjà des informations. Par exemple, les cycles de hachage supplémentaires ont un certain effet sur la granularité ainsi mesurée, en réduisant la "grosseur" des grains. Après chaque cycle, les particules deviennent plus petites et/ou trapues, ce qui est plutôt logique en soi.

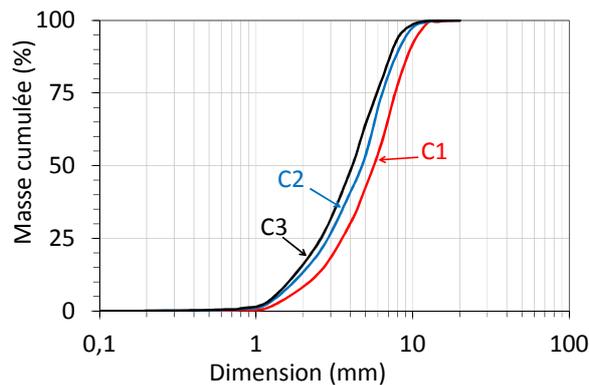


Figure 1 : Granulométrie par tamisage des quatre chènevotte.

### 3.2. ANALYSE D'IMAGES

La granularité mesurée par tamisage mécanique n'est donc pas suffisante pour accéder à une caractérisation morphologie pertinente des particules de chènevotte. Dans le cas présent, l'analyse d'image a été choisie pour apporter des informations complémentaires en la matière.

#### 3.2.1. Méthodologie

Les images ont été prises avec un appareil numérique maintenu sur un trépied, sur les différents refus issus du tamisage mécanique. Pour chacune de ces "classes élémentaires", un nombre suffisant de grains (de 150 à 300, selon la taille des grains) a été étalé avec minutie sur une surface plane blanche, sans qu'ils ne se touchent ou ne se superposent. Un étalon est aussi disposé sur la vue afin d'établir la correspondance pixel - mm. Plusieurs clichés sont généralement nécessaires pour couvrir l'effectif. Au total, plus de 2 500 particules ont été ainsi photographiées par type de chènevotte.

Les images subissent ensuite un premier traitement permettant d'améliorer le contraste et d'effacer les artéfacts. Il faut aussi définir un seuillage permettant de couvrir le plus précisément les particules car une délimitation inadaptée peut fausser l'estimation de la taille des objets [3]. La surface minimale de particule à prendre en compte a été fixée ici à 0,1 mm<sup>2</sup>. Enfin, les images sont binarisées (elles passent alors de la couleur au noir et blanc). Ces opérations ont été réalisées avec le logiciel libre "Image J®" développé par Research Services Branch (RSB) du National Institut of Health [4]. La figure 2 montre, à titre d'exemple, une image initiale et sa version binarisée.



Figure 2 : Avant/après binarisation : exemple de particules de la "classe 10/12,5".

Le logiciel Image J® permet de compter les objets et d'analyser individuellement leurs paramètres de forme (à deux dimensions). Ceux retenus dans cette étude sont les suivants :

- l'aire  $A$  de la particule, obtenue par comptage des pixels,
- les diamètres de Féret minimum et maximum, égaux aux distances entre deux plans parallèles tangents au contour de l'objet,
- les dimensions des axes majeur et mineur, égales aux longueurs la plus grande et la plus petite des axes de l'ellipse ajustée,
- le périmètre  $P$  de la particule,
- l'élongation, définie comme le rapport entre l'axe majeur et l'axe mineur,
- la circularité, calculée selon la relation (1), comprise entre 0 (particules infiniment allongée) et 1 (cercle parfait) :

$$Circ = 4 \cdot \pi \frac{A}{P^2} \quad (1)$$

L'étude statistique des résultats de l'analyse d'image consiste à comparer les paramètres mesurés à un ou des critères d'observation particuliers. Par analogie avec l'analyse granulométrique, le choix s'est porté sur l'aire des particules qui peut être considérée comme une approximation de leur masse. Cette assimilation suppose cependant que la masse volumique est uniforme et que l'épaisseur est constante ou proportionnelle à la surface des particules analysées. Ces hypothèses ont été globalement vérifiées par des mesures physiques complémentaires (volume et masse volumique par

la méthode de la paraffine, épaisseur/surface au pied à coulisse), non présentées ici. Elles permettent de prétendre que la dérive commise par cette approche n'est pas rédhibitoire dans le cas présent.

Pour une classe  $i$  de grains, le pourcentage  $P_{Ai}$  de grains appartenant à cette classe est alors donné par la relation suivante :

$$P_{Ai} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_T} \quad (2)$$

où  $A_i$  est l'aire projetée de la particule  $i$  et  $A_T$  l'aire cumulée de l'ensemble des particules étudiées.

### 3.2.2. Granularité

Pour déterminer la granularité des échantillons de chènevotte par analyse d'images, il faut choisir un paramètre dimensionnel caractérisant la taille des grains, comparable à l'ouverture des tamis. Les diamètres de Féret ou les dimensions des axes de l'ellipse ajustée sont les mieux désignés à priori. Ces paramètres ont alors été corrélés deux-à-deux pour l'ensemble des mesures réalisées. La figure 3 présente, à titre d'exemple, le cas de la chènevotte C1. Les deux paramètres de longueur ont un "poids" comparable. La largeur de l'ellipse est a priori plus discriminante que le diamètre de Féret.

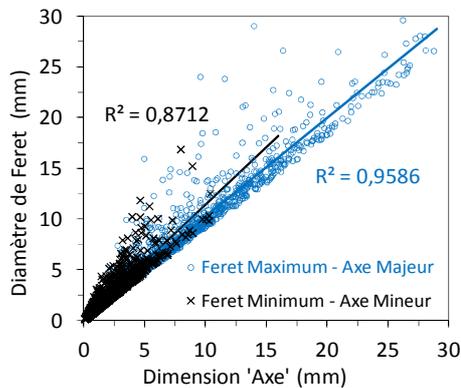


Figure 3 : Corrélation entre diamètres de Féret et dimensions des axes de l'ellipse ajustée. Exemple de la chènevotte C1.

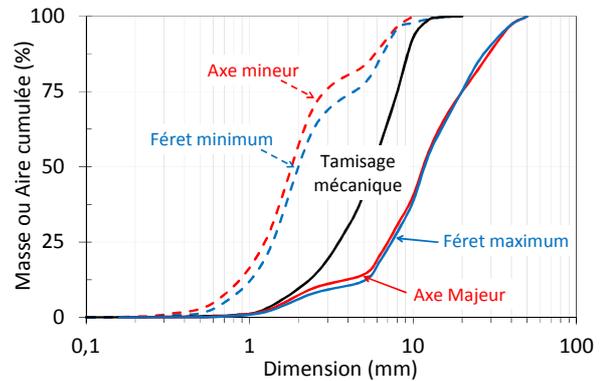


Figure 4: Comparaison de la granulométrie selon la dimension considérée. Exemple de la chènevotte C1.

La figure 4, établie elle aussi pour la chènevotte C1, confirme cette analyse. Elle présente l'aire cumulée des grains (relation 2) en fonction des quatre paramètres précédents, discrétisés selon les mêmes classes dimensionnelles que pour le tamisage mécanique [5], lui aussi repris sur cette figure.

On constate tout d'abord, comme on pouvait s'y attendre, que les grains de chènevotte ont une forme très élancée (voir plus loin), puisque les courbes établies selon les longueurs et selon les largeurs sont particulièrement éloignées les unes des autres. On vérifie aussi que le tamisage mécanique ne trie pas bien les grains selon leur grosseur, car la granularité déterminée par cette méthode se situe entre les deux séries de courbes précédentes, alors qu'elle devrait être proche de celle associée à la largeur (qui est la dimension la plus proche de la grosseur pour des grains élancés). Enfin, la dimension de l'axe mineur de l'ellipse est effectivement plus discriminante que le diamètre de Féret minimum (courbe décalée vers les petites tailles), alors que cette distinction

n'apparaît pas pour la longueur (courbes confondues). Par conséquent, la dimension des axes de l'ellipse (axe mineur et axe majeur) a été retenue pour la suite de l'étude.

La figure 5 compare l'aire cumulée (%) des 3 échantillons de chènevotte en fonction du mode d'analyse retenu (axe majeur et axe mineur). On constate, contrairement à l'analyse par tamisage mécanique (figure 1), que les hachages successifs ont un effet graduel nettement marqué sur les dimensions des particules, tant sur leur longueur (courbes pleines) que sur leur largeur (courbes en pointillés).

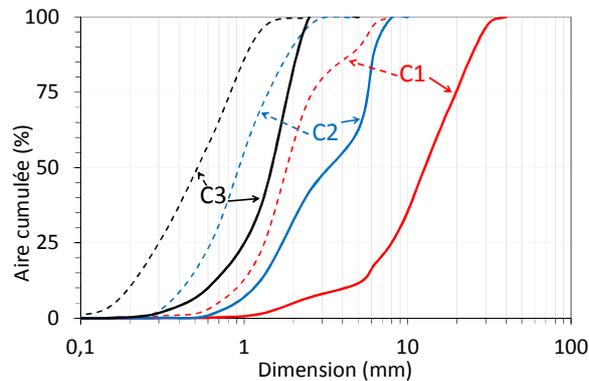


Figure 5: Comparaison de la granulométrie par analyse d'image des trois échantillons étudiés, selon l'axe majeur (courbes pleines) et l'axe mineur (courbes pointillées) des grains.

Tableau 2 : Valeur médiane ( $D_{50}$ ) de la dimension [mm] issue de l'analyse d'image et du tamisage

Référence	Axe Majeur	Axe Mineur	Tamisage
C1	12,8	1,9	5,6
C2	3,5	1	4,7
C3	1,5	0,5	4,1

La valeur médiane de la distribution des grains ou  $D_{50}$  (taille qui correspond à 50% de l'aire cumulée des particules) permet d'avoir une comparaison numérique des résultats précédents. Les valeurs sont données dans le tableau 2. On mesure ainsi les différences entre axe majeur et axe mineur, pour les trois chènevottes. La chènevotte C1 est quatre fois plus longue et deux fois plus large en moyenne que la chènevotte C2, qui est elle-même deux fois plus longue et large que la chènevotte C3. Les hachages successifs réduisent donc efficacement la taille des grains, et donnent des produits significativement différents. Le  $D_{50}$  issu du tamisage mécanique complète le tableau. Il confirme les limites de cette méthode pour les granulats de chènevotte car les valeurs ne sont pas significativement différentes entre produits....

### 3.2.3. Elongation et circularité

Les paramètres issus de l'analyse d'image permettent d'exprimer d'autres critères morphologiques, comme l'élongation et la circularité.

L'élongation (ou élancement) correspond ici au rapport calculé entre la dimension des deux axes de l'ellipse (axe majeur / axe mineur). Comme précédemment, l'aire des particules des trois chènevottes a été rapprochée de ce paramètre adimensionnel discrétisé en classes allant de 1 à 10, par pas de 0,5 (figure 6).

La distribution observée est de type "log-normal". Plusieurs populations sont présentes dans la chènevotte C1, avec des grains ayant des élongations pouvant atteindre 10 et plus (faits de pailles). Ces grains disparaissent dans les chènevottes C2 et C3 où il n'y a quasiment plus de grains d'élongation supérieure à 5. Les valeurs médianes d'élongation sont données dans tableau 3, avec les écarts types associés. On constate que les hachages successifs réduisent significativement l'élongation de grains (médiane passant de 4,4 pour C1 à 2,4 pour C3) et limite la dispersion (écart type passant de 2,1 pour C1 à 1,4 pour C2).

Tableau 3 : Paramètres statistiques des critères d'élongation et de circularité

Référence	Elongation		Circularité	
	Médiane	Ecart type	Médiane	Ecart type
C1	4,4	2,1	0,38	0,16
C2	2,6	1,4	0,56	0,18
C3	2,4	1,8	0,55	0,22

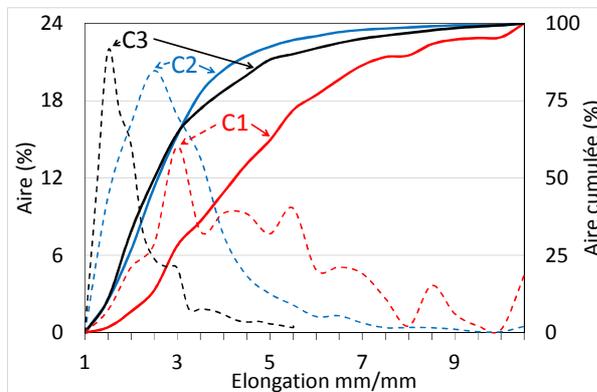


Figure 6: Elongation statistique des chènevottes étudiées.

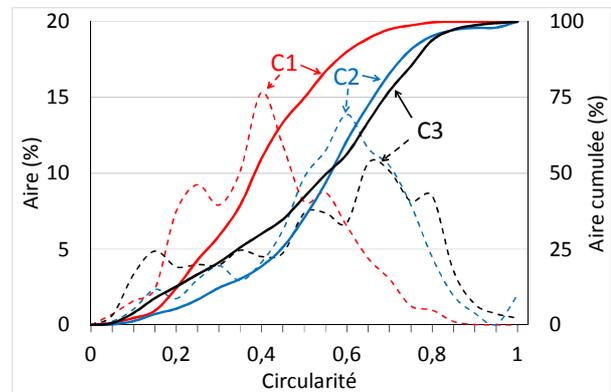


Figure 7: Circularité statistique des chènevottes étudiées.

La circularité des particules, calculée selon la relation 1, présente une distribution de type "normal", (figure 7). Sa valeur médiane est médiocre pour C1 (0,38), mais elle croît avec les hachages successifs (0,55 pour C3), traduisant ainsi la formation de particules de plus en plus parallélépipédiques (une population non négligeable de grains atteint même une circularité de 0,65 à 0,85). Mais il subsiste toujours quelques particules de faible circularité (comprise entre 0,1 et 0,3), c'est-à-dire des "aiguilles" à fort élancement. Les paramètres statistiques complètent le tableau 3.

#### 4. COMPACITE

Il paraît trivial de rappeler que la compacité du squelette granulaire d'un béton contrôle grandement ses propriétés (volume de pâte, maniabilité, résistance, etc.). Précisons cependant qu'elle dépend de la granularité du mélange (distribution, étendue), des propriétés propres des grains (forme, rugosité, etc.) et du mode de mise en place du système (serrage). Il existe aujourd'hui des outils prédictifs de la compacité, comme René LCPC [6] qui pourrait sans doute être utilisé à bon escient pour optimiser des mélanges de chènevottes. Cependant, outre les propriétés régulières (masse volumique, granularité, etc.), ce logiciel requière la détermination préalable de la compacité virtuelle des tranches élémentaires de chaque constituant granulaire du mélange - valeurs déduite de la

compacité réelle *mesurée sur le constituant* - et de l'indice de serrage associé au procédé de mesure de la compacité réelle - valeur déduite de mesures de compacité faites sur *différents mélanges de constituants* -. La compacité virtuelle correspond à la compacité maximale que peut atteindre la tranche considérée et elle "intègre" la morphologie des grains. L'indice de serrage est un marqueur de l'énergie du procédé de mise en place. Dans ce travail, seuls sont présentés les principes des mesures de compacité et les résultats obtenus (échantillons seuls et mélangés).

#### 4.1. MODE OPERATOIRE

Compte tenu du caractère tendre des grains de chènevotte, un procédé peu agressif a été adopté pour la mesure de la compacité. Son principe (figure 8) repose sur l'utilisation d'un moule cylindrique ( $\varnothing$  154,2 mm, h 145 mm) muni d'une hausse amovible, fixé au centre d'une table à chocs pour béton [7], dans lequel est déversé l'échantillon. Un certain nombre de petites accélérations est appliqué par soulèvement de 30 mm de l'un des côtés. La hausse est ensuite retirée et l'excédent est éliminé.

La compacité  $\Phi_m$  du matériau est déduite de la masse sèche  $M_s$  du contenu, du volume  $V$  du moule et de la masse volumique réelle  $\rho_r$ , du matériau, selon la relation suivante :

$$\Phi_m = \frac{M_s / \rho_r}{V} \quad (3)$$



Figure 8 : Moule et hausse amovible fixé sur une table à chocs pour béton.

#### 4.2. RESULTATS

Les résultats obtenus sur les trois granulats de chènevotte, pour un nombre croissant de chocs, sont présentés figure 9 (moyenne de trois mesures). L'application de 75 chocs conduit à une situation stabilisée pour ce procédé. Les compacités correspondantes sont très faibles, comparées à celles de granulats minéraux. Mais elles augmentent cependant sensiblement lorsque les particules ont des formes "améliorées" par les hachages successifs, en particulier pour la chènevotte C3. Dans ce cas, la compacité de l'empilement des grains augmente de plus de 4 points, par rapport à C1, ce qui correspond à un ajout de matière de 40 litres par  $m^3$ .

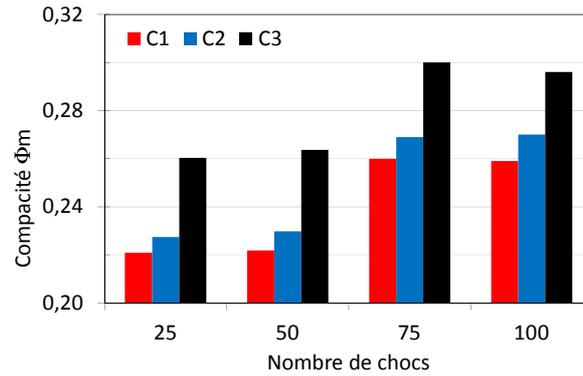


Figure 9 : Compacité réelle en fonction du nombre de chocs

Des mesures de compacité sur des mélanges de chènevotte ont aussi été effectuées avec ce procédé. La figure 10 présente, à titre d'exemple, les compacités obtenues pour le mélange de C1 et C3 en fonction du titre volumique  $C1/(C1+C3)$ , par pas de 0,2.

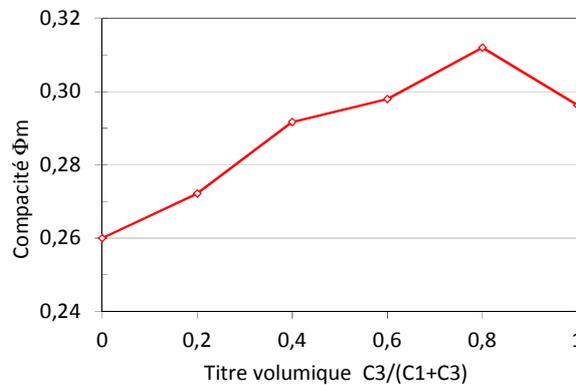


Figure 10 : Compacité expérimentale du mélange des chènevotte C1 et C3

On constate alors que la compacité expérimentale peut encore être améliorée, par rapport à l'effet du hachage seul, puisque les mélanges contenant plus de 60% de chènevotte C3 ont tous une compacité supérieure à celle de C3. La valeur maximale obtenue pour ces mesures montre une augmentation du volume solide de plus de 55 litres par  $m^3$ .

Rappelons par ailleurs que ces mesures, combinées aux granularités issues des analyses d'image, permettent de calibrer à la fois les compacités virtuelles des grains de chènevotte et l'indice de serrage du procédé (avec René LCPC). Il sera alors possible de chercher des mélanges de compacité maximale et/ou de contrôler la compacité de mélanges selon le niveau de serrage appliqué.

## 5. CONCLUSION

L'analyse granulométrique de la chènevotte par tamisage mécanique s'avère inadaptée, en raison de la présence majoritaire de grains élancés, qui sont retenus sur les tamis de tailles supérieures.

L'analyse d'image permet une description statistique plus pertinente, car elle s'appuie sur la morphologie réelle des grains (du moins à deux dimensions). Elle conduit par exemple à des courbes donnant l'évolution de l'aire des grains en fonction de leur largeur (axe mineur de l'ellipse ajustée), qui

peuvent être vraisemblablement assimilées aux courbes granulométriques plus classiques donnant l'évolution de la masse des grains en fonction de leur grosseur. D'autres paramètres morphologiques peuvent aussi être obtenus, telles l'élongation et la sphéricité des grains.

Ces paramètres peuvent alors être utilisés dans des modèles de prédiction de la compacité, et servir aussi, le cas échéant, à les améliorer (prise en compte par exemple de l'élongation et de sa distribution). Une méthode de mesure de la compacité des granulats de chènevottes ou de leurs mélanges est aussi proposée. Elle a pour but de compléter l'acquisition des données nécessaires à l'utilisation de ces modèles, qui doivent alors permettre de désigner les produits ou les mélanges répondant au mieux à des spécifications données, en termes de compacité notamment.

Dans le cas présent, les mesures expérimentales réalisées apportent aussi des informations intéressantes sur l'évolution de la morphologie des particules de chènevottes avec le nombre de hachages subis par la paille, et sur leur faculté à former des empilements plus compacts. Ce traitement réduit la taille des grains et améliore grandement leur forme. Il permet aussi d'augmenter substantiellement la compacité, en particulier si des mélanges de grains de morphologies différentes sont réalisés.

## 6. REFERENCES

1. Association Construire en Chanvre (CenC), <http://www.construction-chanvre.asso.fr/>.
2. NF EN 933-1, *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1 : Détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage*, Norme (P 18-622-1) (Mai 2012), AFNOR, Paris.
3. C. Igathinthane, L.O. Pordesimo, E.P. Columbus, W.D. Batcheloret, S. Sokhansanj, *Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision*, Computers and Electronics in Agriculture (Vol. 66) (2009) 147-158
4. W.S. Rasband, *Image J*, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA (<http://imagej.nih.gov/ij/>) (1997-2014)
5. V. Picandet, P. Tronet, C. Baley, *Caractérisation granulométrique des chènevottes*, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA (Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012) 10 pages
6. T. Sedran, F. De Larrard, *RENÉ-LCPC- Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil*, Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194, (1994).
7. A. Lecomte. *The measurement of real and virtual packing density of soft grains*, Materials and Structures Journal, 39, 1, (2006) 59-74.