

# ÉTUDE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DE PARTICULES DE CHANVRE: MÉTHODES PAR TAMISAGE ET ANALYSE D'IMAGE

RAPPORT DANS LE CADRE DU COMITÉ TECHNIQUE *BBM (Bio-aggregates based Building Materials)* DU RILEM

NOVEMBRE 2011

S. Dubois<sup>a,\*</sup>, F. Lebeau<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Département des Sciences et Technologies de l'environnement  
Passage des déportés 2, Gembloux, Belgium 5030

\*s.dubois@student.ulg.ac.be, Tel.: +32 496 96 52 84

**MOTS-CLÉS:** Distribution granulométrique, Chanvre, Chènevotte, Tamisage, Analyse d'image

**RÉSUMÉ:** Ce document présente une analyse de la répartition granulométrique d'une chènevotte commerciale. Deux techniques différentes sont étudiées. La première consiste à séparer les particules mécaniquement par tamisage. La diversité morphologique des particules de chanvre entraîne cependant des questions quant à l'interprétation des résultats obtenus, et plus particulièrement sur les paramètres physiques réellement discriminatoires dans cette séparation en classes granulométriques. Il est montré ici que l'analyse d'image permet de répondre à cette question et d'apporter des informations précieuses dans la description des particules. À cette fin, la performance de descripteurs issus d'algorithmes de calcul en analyse d'image est étudiée. Enfin, une représentation multi-classes de la distribution granulométrique de la chènevotte est proposée, regroupant les descriptions dimensionnelle et morphologique des particules.

# 1. GRANULOMÉTRIE SUR BASE DU POIDS PAR TAMISAGE

## 1.1 Matériel et méthodes

L'appareil utilisé est un tamis de laboratoire *Analysette 3 (Fritsch)* associé à des tamis cylindriques de diamètre 203mm à maille métallique tissée (**Fig. 1**).



**Figure 1 : Appareil de vibration mécanique et les 6 tamis de test**

Les échantillons sont passés au travers de 6 tamis dont les maillages respectifs ont comme dimensions nominales 0,5 - 0,8 - 1,25 - 2 - 3,15 - 5 et 8 mm. Suite à des tests préliminaires, ces ouvertures ont été choisies pour couvrir la majeure partie de la granulométrie du chanvre analysé. Il s'agit d'ouvertures standard conformes à la norme ISO 3310:2000 [1].

L'analyse granulométrique par tamisage est effectuée sur des échantillons de 50g avec cinq répétitions de mesure. Ces 50g permettent de maintenir un niveau de saturation correct des tamis tout en garantissant une quantité suffisante de chènevotte analysée (pour assurer la répétabilité des essais).

On prélève en premier lieu 500g de matière au sein d'un sac de 2kg de chènevotte à analyser, en prêtant attention à prélever en différents endroits du sac le contenant. Ces 500g serviront de base à nos différents tests et seront dénommé "échantillon de

référence". Celui-ci est ensuite placé à l'étuve à 50°C jusqu'à obtenir un matériau sec. On y prélève alors 50g mesurés à l'aide d'une balance électronique de précision avant de les introduire dans le tamis supérieur, de maille 8mm. Notons que l'échantillon de référence est homogénéisé à la main avant chaque prélèvement.

L'amplitude de vibration utilisée lors des tests est de 1,5mm, durant 10 minutes et par phases successives de 10 secondes. Une fois la période de tamisage achevée, on prélève les différentes fractions dans les tamis en prêtant attention à ne pas forcer le passage de particules au travers des tamis. Chaque particule bloquée au niveau du maillage est comptabilisée dans la classe granulométrique supérieure.

Les essais où la masse totale récoltée dans les tamis diffère de plus de 0,5% par rapport à la masse initialement introduite sont écartés.

## 1.2 Résultats

Le **tableau 1** indique les différentes fractions granulométriques obtenues, transcrites selon les notations de la norme ISO 9276-1:1998 [2] et sur la moyenne des 5 échantillons analysés. L'indice  $i$  représente le numéro de la classe d'ouverture de maille avec comme borne supérieure l'ouverture  $x_i$ . On a aussi

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$$

La variable  $Q_{3i}$  représente la distribution cumulative en masse relative<sup>1</sup> avec comme borne supérieure l'ouverture  $x_i$ . La variable  $\Delta Q_{3i}$  représente l'incrément de la distribution cumulative en masse relative. Enfin, la valeur  $\Delta Q_{3i}/\Delta x_i$  permet de tracer l'histogramme normalisé de la distribution granulométrique. Ce dernier comprend une série de rectangles dont les aires représentent les  $\Delta Q_{3i}$  sur un graphique où les

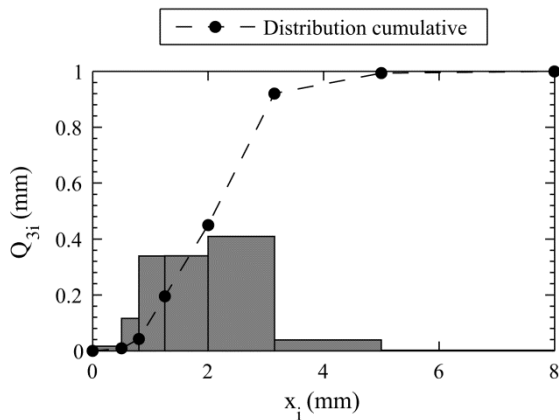
<sup>1</sup> Soit la masse rapportée à la masse totale de l'échantillon. Le total de la distribution cumulative vaut donc 1.

ouvertures des mailles de tamis sont reprises en abscisse et la masse relative en ordonnée (**Fig. 2**). En effet la base de chaque rectangle correspond à un  $\Delta x_i$  et sa hauteur à  $\Delta Q_{3i}/\Delta x_i$ . Chaque rectangle a par

conséquent une aire égale à  $\Delta Q_{3i}$ . La **figure 2** reprend graphiquement l'ensemble des résultats du tamisage pour la chènevotte étudiée.

**Tableau 1 : Résultat du test granulométrique par tamisage; notation selon l'ISO 9276**

i	$x_i$ [mm]	$\Delta Q_{3i}$	$\Delta x_i$ [mm]	$\Delta Q_{3i}/\Delta x_i$ [mm <sup>-1</sup> ]	$Q_{3i}$
0	0	-	-	-	0
1	0,500	0,008	0,500	0,016	0,008
2	0,800	0,035	0,300	0,116	0,043
3	1,250	0,152	0,450	0,339	0,195
4	2,000	0,255	0,750	0,340	0,450
5	3,150	0,471	1,150	0,409	0,921
6	5,000	0,072	1,850	0,039	0,993
7	8,000	0,0068	3,000	0,002	1,000



**Figure 2: Histogramme normalisé de poids relatif et courbe cumulative**

### 1.3 Analyse des données

Le tamisage n'offre qu'une information réduite sur la distribution granulométrique des particules de chanvre. On sait en plus que la forme allongée de ces dernières incite à considérer les résultats obtenus avec beaucoup de précaution. Pour pouvoir comparer les résultats à la méthode par analyse d'image il nous faut cependant un paramètre capable de caractériser la distribution par tamisage. On choisit ici d'utiliser la valeur médiane d'ouverture de tamis, soit la taille qui entrainerait une répartition de 50% des particules retenues et 50% non retenues.

Graphiquement la valeur médiane peut être établie par l'intersection entre la courbe de distribution cumulée et la ligne horizontale  $Q_{3i} = 0,5$ . Dans notre cas on peut estimer la taille médiane à environ 22mm. Notons bien que pour le tamisage, la quantité de particules est donnée en masse alors qu'elle sera donnée en nombre ou en surface projetée pour l'analyse d'image.

## 2. GRANULOMÉTRIE BASÉE SUR LE NOMBRE DE PARTICULES PAR ANALYSE D'IMAGE

### 2.1 Apports de l'analyse d'image

La morphologie des particules de chènevotte peut jouer un rôle important dans la détermination des propriétés finales des mélanges chaux-chanvre. Or la méthode de tamisage à elle seule ne permet pas d'accéder à cette information. Elle permet uniquement d'obtenir la distribution d'un certain paramètre de taille (dont la signification exacte reste à déterminer dans le cas du chanvre).

### 2.2 Matériel et méthodes

#### 2.2.1 Acquisition des images

L'analyse de base sur 4 échantillons de 2g prélevés de manière aléatoire dans l'échantillon témoin de départ. Chaque particule du sous-échantillon est collée sur une feuille A4 de papier noir en évitant tout recouvrement. Les pages obtenues sont ensuite scannées en 300ppp (pixels par pouce) ce qui correspond à 118,11 pixels par centimètre. L'utilisation d'un scanner permet d'éviter toute déformation liée à l'utilisation d'un objectif classique.

Afin de juger la pertinence du tamisage pour l'analyse granulométrique du chanvre, on analysera également des fractions de chanvre récupérées après tamisage. Cette partie de l'analyse d'image s'effectuera sur base de 200 particules appartenant respectivement aux fractions tamisées 2-3,15mm (Fraction G1) et 1,25-2mm (Fraction G2) (**Fig. 3**)



**Figure 3: Fractions récupérées après tamisage préparées pour l'analyse d'image**

### 2.2.2 Prétraitement des images

L'ensemble des images à analyser sont d'abord prétraitées dans un logiciel avant de les soumettre aux algorithmes de calculs qui fourniront les histogrammes de taille et de forme des particules. Ce prétraitement comporte plusieurs étapes qui s'articulent selon la séquence suivante :

#### I. Amélioration du contraste :

Il s'agit d'obtenir un fond homogène pour faciliter les opérations de segmentation qui suivront.

#### II. Opération morphologique :

L'image est soumise à une opération morphologique destinée à effacer les fibres les plus fines qui viendraient perturber les résultats obtenus. On applique une opération "Opening"<sup>2</sup> en utilisant un élément structurant en croix de 3x3 pixels.

Le résultat des deux premières étapes est illustré sur la **figure 5**.

#### III. Mise en niveau de gris :

L'image est convertie en niveau de gris en 8 bits soit des valeurs d'intensité de pixel allant de 0 à 255. (**Fig. 6**)

#### IV. Opération de segmentation :

Cette étape consiste en une binarisation de l'image, qui donnera des pixels de valeur 0 (soit du noir) pour tous les pixels qui appartiennent à une particule et des pixels de valeur 1 (soit du blanc) pour les pixels de fond. Le très bon contraste initial des images permet de rendre cette opération aisée. La **figure 7** montre l'image binarisée pour la zone témoin.



**Figure 4 : Illustration des prétraitements d'image sur une zone témoin**

<sup>2</sup> Opération consistant en une érosion suivie d'une dilatation.

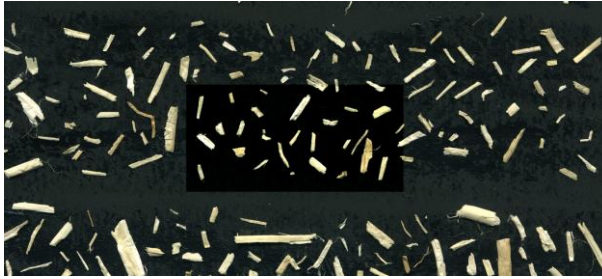


Figure 5 : Résultat obtenu après amélioration du contraste et opération morphologique

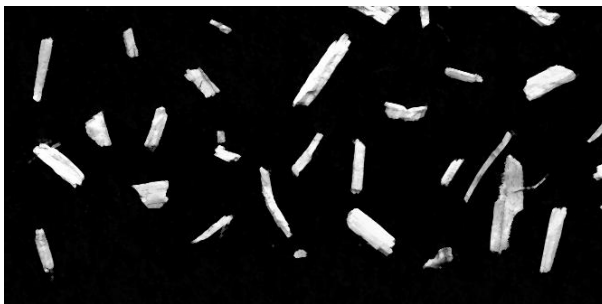


Figure 6 : Conversion en niveau de gris 8 bits (0 -255)

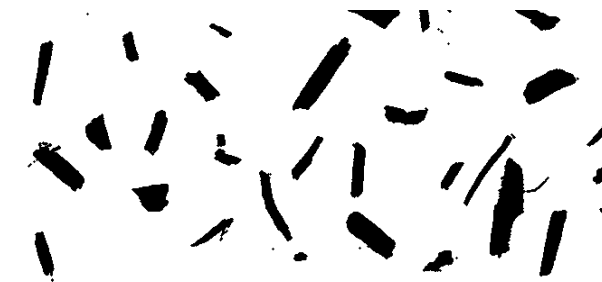


Figure 7 : Application du seuillage. Image prête à être soumise aux comptage et algorithmes de calculs

### 2.2.3 Choix des paramètres à mesurer et des niveaux d'analyse

Une fois le prétraitement d'image effectué, il est possible d'entreprendre différentes mesures sur les particules. En première étape, le logiciel permet de compter les objets sombres présents sur l'image binarisée. L'analyse des paramètres de forme peut ensuite être effectuée sur chaque particule comptabilisée. Il est cependant important de déterminer une taille minimale de particule à prendre en compte. En effet, les particules les plus petites ne seront composées que de quelques pixels, ce qui

peut se révéler problématique dans le calcul des coefficients de forme. Il est d'ailleurs difficile de savoir si les plus petites taches présentes sur l'image binarisée ne résultent pas d'artefacts dans le processus de seuillage. On se fixera donc ici comme limite les particules composées d'au moins 100 pixels (en suivant les recommandations de la norme ISO 9276-6:2008 [3]), ce qui correspond à un carré de 0,84mm de côté dans la résolution utilisée de 300ppp. On choisit donc de limiter le comptage et l'analyse aux particules dont la surface projetée est d'au moins  $1 \text{ mm}^2$ . La **figure 8** montre le résultat du comptage de particules sur la zone témoin, en respectant le critère de taille minimale.



Figure 8 : Comptage des particules

Il reste à choisir les algorithmes de calculs pouvant fournir des informations relatives à la taille et à la forme des particules. Ici sont retenus des descripteurs macroscopiques, c'est à dire décrivant la forme générale de la particule sur base de la silhouette dégagée par binarisation :

- La *surface projetée* de la particule qui est obtenue par comptage des pixels noirs.
- Les *diamètres au centroïde minimum* et *maximum* à savoir respectivement les longueurs minimale et maximale d'une droite joignant 2 points extrêmes de la particule et passant par son centroïde<sup>3</sup>
- Les *diamètres de Feret minimum* et *maximum*. Rappelons que le diamètre de Feret signifie la

<sup>3</sup> encore appelé "centre de gravité"



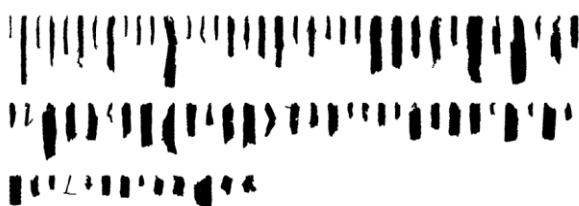
**Tableau 4 : Résultats de l'analyse d'image sur 1024 particules (échantillon C, 2g)**

	Surface [cm <sup>2</sup> ]	Aspect	Diamètre au c. max [mm]	Diamètre au c. min [mm]	Diamètre de Ferret min [mm]	Diamètre de Ferret max [mm]
Min	0,0102	1,0425	0,1526	0,0239	0,0415	0,1572
Max	0,6818	16,9058	2,5878	0,4601	1,1833	2,6018
Gamme	0,6716	15,8633	2,4351	0,4361	1,1418	2,4446
Moyenne	0,1004	4,1510	0,6452	0,1553	0,1904	0,6593
Ecart-type	0,0892	2,0892	0,3283	0,0653	0,0988	0,3351
Nb particules	1024	1024	1024	1024	1024	1024

simplement parce que certaines particules ne peuvent pas facilement se voir attribuer une longueur, une largeur ou un coefficient d'aspect étant donné leurs formes particulières. Il faut alors déterminer quel paramètre convient le mieux pour les décrire, ou encore quel paramètre se rapproche le plus du jugement qu'un observateur donnerait.

#### 2.4.1 Descripteur morphologique : le ratio elliptique

En vue de caractériser plus finement la pertinence des paramètres utilisés, on peut s'intéresser à des cartographies classées de particules. Il s'agit d'un classement des particules suivant la valeur d'un paramètre. La **figure10** illustre un exemple de 100 particules triées selon la valeur du ratio elliptique, à savoir notre paramètre morphologique.



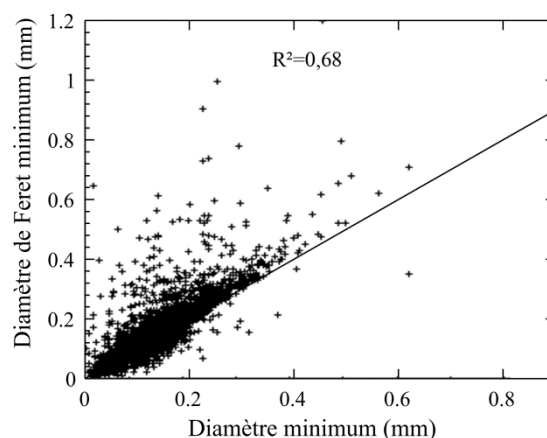
**Figure 10 : 100 particules triées selon leur ratio elliptique**

On peut voir que les particules les plus allongées ont un ratio elliptique élevée alors qu'il tend vers 1 pour les particules les plus compactes. Au vu de ce premier examen, le coefficient semble jouer le rôle qu'on attend de lui.

#### 2.4.2 Descripteurs dimensionnels

En se basant sur l'échantillon total de 8g et 5354 particules, on peut mettre en corrélation les différents paramètres de taille à savoir :

- Diamètre au centroïde minimum et diamètre de Feret minimum qui devraient tous deux représenter la "largeur" de la particule (**Fig. 11**)
- Diamètre au centroïde maximum et diamètre de Feret maximum sensé donner une valeur à la "longueur" de la particule (**Fig. 12**)



**Figure 3 : Corrélation entre diamètre de Feret minimum et diamètre au centroïde minimum**

A priori il semble possible d'utiliser de manière équivalente les 2 paramètres pour caractériser la longueur de la particule. Quant à la largeur, il semble y avoir une différence entre le diamètre minimum passant par le centroïde et le diamètre minimum de Feret. On utilise à nouveau les



cartographies classées sur 100 particules pour tenter d'apprécier la différence qualitative entre les 2 paramètres (Fig. 13 et 14).

On observe que les deux paramètres donnent une information relativement semblable et sont aptes à caractériser la largeur de la majeure partie des particules. Il semble cependant que le diamètre au centroïde minimum est plus robuste dans le cas de particules possédant une excroissance (voir particules 1, 3 et 4 sur la figure 13 et 14). Pour certaines particules cependant, aucun des 2 paramètres ne semble donner une valeur de largeur correcte (particule 2).

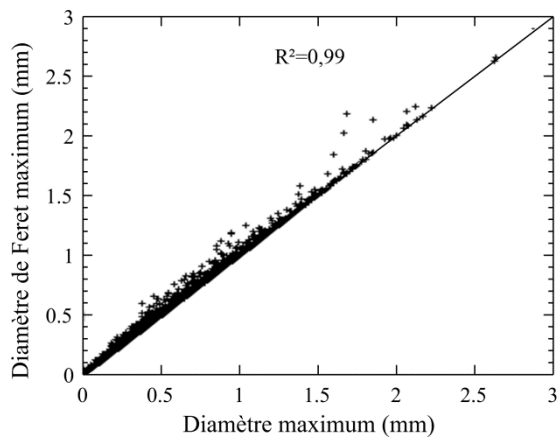


Figure 12 : Corrélation entre diamètre de Feret maximum et diamètre au centroïde maximum



Figure 4 : 100 particules triées selon leur diamètre de Feret *minimum*

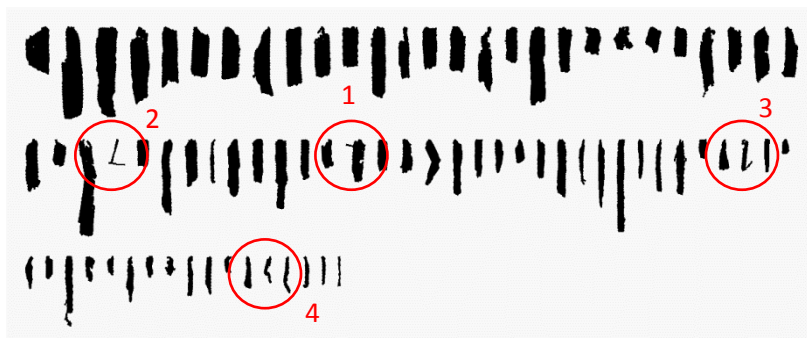


Figure 5 : 100 particules triées selon leur diamètre au centroïde *minimum*



## 2.5 Comparaison aux résultats du tamisage

### 2.5.1 Les fractions granulométriques tamisées par analyse d'image

Comme mentionné plus haut, 2 fractions de isolées après tamisage seront ici analysées sur base de 200 particules en vue de mieux appréhender le résultats obtenus par la méthode gravimétrique (**Fig. 3**).

Les résultats pour la fraction 2-3,15mm sont repris dans le **tableau 5** et ceux pour la fraction 1,25-2mm dans le **tableau 6**. Ces résultats sont très intéressants puisqu'ils donnent des indications sur les particules triées par tamisage. Ainsi, on observe que le diamètre au centroïde minimum semble

correspondre le mieux à la fraction granulométrique déterminée par tamisage. En effet, la valeur moyenne mesurée par analyse d'image est comprise entre les deux bornes granulométriques pour les deux fractions étudiées. Il semble donc que les tamis trient les particules en fonction de leur dimension la plus petite (ou "largeur" de la particule). Des recherches additionnelles devraient apporter des précisions quant à l'évolution des descripteurs de l'analyse d'image, y compris les descripteurs morphologiques, sur l'ensemble des fractions granulométriques.

**Tableau 5 : Analyse d'image, fraction granulométrique 2-3,15mm (G1)**

	Surface [cm <sup>2</sup> ]	Aspect	Diamètre au c. max [mm]	Diamètre au c. min [mm]	Diamètre de Feret min [mm]	Diamètre de Feret max [mm]
Min	0,0134	1,1250	2,352	0,359	0,584	2,385
Max	0,5672	11,4608	24,367	3,640	5,951	4,399
Gamme	0,5538	10,3357	22,014	3,281	5,367	2,014
Moyenne	0,2074	3,9727	9,698	2,289	2,839	9,848
Ecart-type	0,1022	1,7712	3,801	0,560	0,796	3,810
Nb particules	200	200	200	200	200	200

**Tableau 6 : Analyse d'image, fraction granulométrique 1.25-2mm (G2)**

	Surface [cm <sup>2</sup> ]	Aspect	Diamètre au c. max [mm]	Diamètre au c. min [mm]	Diamètre de Feret min [mm]	Diamètre de Feret max [mm]
Min	0,0126	1,1291	2,730	0,305	0,587	2,739
Max	0,2574	9,5903	5,359	2,658	4,213	5,493
Gamme	0,2448	8,4611	2,628	2,353	3,626	2,753
Moyenne	0,1046	3,6719	6,606	1,725	2,008	6,717
Ecart-type	0,0408	1,3788	2,212	0,313	0,382	2,245
Nb de particules	200	200	200	200	200	200

### 2.5.2 Histogramme de distribution granulométrique sur base de l'analyse d'image

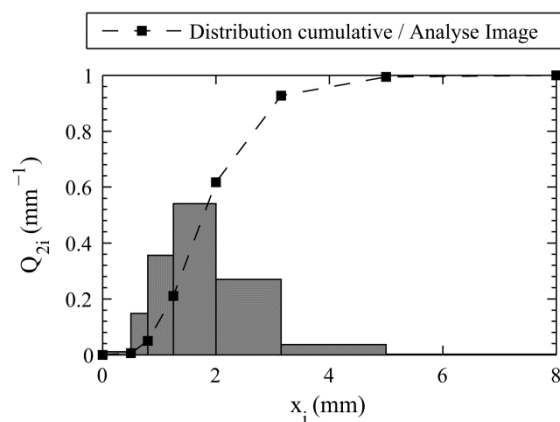
Maintenant que la pertinence des paramètres est établie, il reste à trouver un moyen simple de représenter les résultats de l'analyse d'image sous forme graphique en vue de les comparer aux

résultats du tamisage. Il faut donc réaliser un histogramme de distribution normalisée comme on l'a fait pour la distribution basée sur la masse. En vue de comparer les 2 méthodes l'échantillon total sera divisé en 7 classes de taille, identiques aux classes de tamisage soit :

Inférieur à 0,5mm / 0,8-1,25mm / 1,25-2mm / 2-3,15mm / 3,15-5mm / 5-8mm.

La répartition des classes reste la même mais la distribution se fait maintenant en fonction de la surface cumulée normalisée<sup>4</sup> des particules appartenant à chaque classe, les particules étant associées à une des classes en fonction de leur diamètre minimum déterminée par analyse d'image. On choisit d'utiliser le paramètre diamètre au centroïde minimum car c'est celui qui correspond a priori le mieux à au diamètre de tamisage<sup>5</sup>. Le **tableau 7** reprend les résultats obtenus. L'histogramme résultant est donné à la **figure 15**.

On peut cette fois ci déterminer la largeur médiane des particules, qui correspond à la valeur du diamètre minimum séparant l'échantillon de telle façon que les particules ayant une largeur inférieure à cette valeur représentent 50% de l'aire projetée totale. On obtient  $Diamètre\ centroïde\ min_{50} = 1,75mm$ .



**Figure 6 : Histogramme normalisé de surface relative et courbe cumulative sur base de l'analyse d'image en triant les particules selon leur diamètre au centroïde minimum**

**Tableau 7 : Résultat du test granulométrique par analyse d'image; notation selon l'ISO 9276**

i	$x_i$ [mm]	$\Delta S$ [mm <sup>2</sup> ]	$\Delta Q_{2i}$	$\Delta x_i$ [mm]	$\Delta Q_{3i}/\Delta x_i$ [mm <sup>-1</sup> ]	$Q_{2i}$
0	0					0
1	0,500	240	0,006	0,500	0,011	0,006
2	0,800	1856	0,044	0,300	0,148	0,050
3	1,250	6698	0,160	0,450	0,356	0,211
4	2,000	16965	0,406	0,750	0,541	0,617
5	3,150	12968	0,310	1,150	0,270	0,927
6	5,000	2792	0,067	1,850	0,036	0,994
7	8,000	254	0,0061	3,000	0,002	1,000

<sup>4</sup> La somme des surfaces projetées des particules ramenée à la surface projetée totale de l'échantillon

<sup>5</sup> Etant donné qu'une particule passera le tamis si au moins une deux de ces dimensions sont inférieures à la taille du maillage.

2.5.3 Exemple d'analyse multi-classes taille/forme sur base des résultats de l'analyse d'image

Les résultats de l'analyse d'image peuvent être présentés sous de nombreuses formes plus ou moins complexes au vu de la richesse de l'information disponible. On illustrera ici une classification des particules de chènevotte selon deux variables à savoir le ratio elliptique (descripteur morphologique) et le diamètre au centroïde minimum (descripteur dimensionnel).

La variable ratio elliptique est divisée en 5 classes : 1-2 / 2-3,5 / 3,5-6 / 6-10 / supérieur à 10.

La variable diamètre au centroïde minimum est divisée en 8 classes :

0-0,8mm / 0,8-1,6mm / 1,6-2,4mm / 2,4-3,2mm / 3,2-4mm / 4-4,8mm / 4,8-5,6mm / Supérieur à 5,6mm

Pour calculer les valeurs de la fonction de distribution de densité, la surface cumulée des particules appartenant à une classe de taille et une classe de forme est divisée par la surface cumulée de toutes les particules appartenant à la même classe de taille. On obtient des représentations détaillées de la morphologie des particules comme présenté aux figures 17a et b.

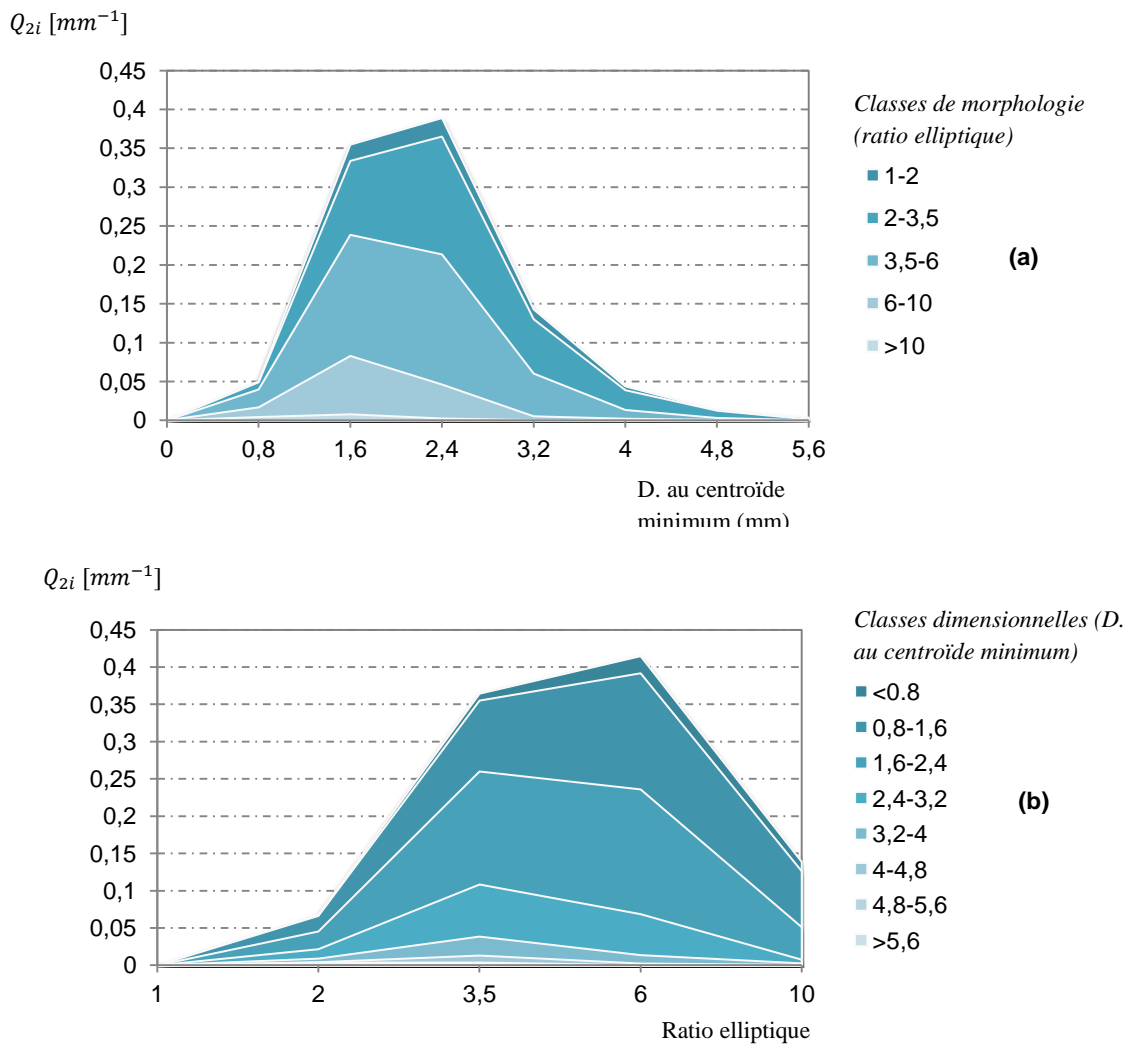


Figure 17 : (a) Densité de distribution en fonction du diamètre minimum des particules pour plusieurs classes de formes. (b) Densité de distribution en fonction du ratio elliptique pour plusieurs classes dimensionnelles

## 2. CONCLUSIONS

L'analyse granulométrique de la chènevotte est relativement compliquée et révèle des problématiques que certains auteurs ont déjà mises en évidence pour l'analyse des biocarburants solides. Deux méthodes de détermination de la distribution granulométrique de telles particules végétales ont été ici appliquées en vue de dégager leurs potentialités respectives.

La séparation mécanique par tamisage donne des résultats fortement répétables mais ne semble pas traduire de manière totalement adéquate la répartition des tailles de particules. Cela est dû à la forme particulière de ces dernières qu'il est difficile de réduire à une unique dimension. Les potentialités de l'analyse d'image en complément de cette première technique semblent par contre bien réelles. On a pu montrer que certains descripteurs morphologiques et dimensionnels peuvent représenter adéquatement les particules. Dans ce cadre, le ratio elliptique et le diamètre au centroïde minimum donnant des résultats fiables. En plus, en traitant des fractions granulométriques issus du tamisage, on peut mettre en évidence les paramètres discriminants dans la séparation mécanique.

Il reste des questions quant à la manière de traiter les particules qui s'éloignent de la forme standard en "bâtonnet" et provoquent des biais dans l'analyse d'image. Certaines chènevottes contiennent de grosses proportions de telles particules (particulièrement celles qui ne sont pas défibrées) et demandent donc un travail plus approfondi afin de déterminer leurs répartitions granulométriques. Cela peut passer par un choix approprié de descripteurs dans l'analyse d'image ou un traitement différent de l'image de départ. Notons également que l'étude des particules les plus fines (d'une surface projetée inférieure à  $1 \text{ mm}^2$ ) n'aura pas non plus été abordée ici puisqu'elle requiert des techniques spécifiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme Intl. (2000). *ISO 3310-1:2000. Tamis de contrôle, Exigences techniques et vérifications : Partie 1 : Tamis de contrôle en tissus métalliques*
- [2] Norme Intl. (1998). *ISO 9276-1:1998. Representation of results of particle size analysis : Part 1 : Graphical representation*
- [3] Norme Intl. (2008). *ISO 9276-6:2008. Representation of results of particle size analysis : Part 6 : Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology*