

Propriétés physiques des granulats ou particules d'origine végétale

Vincent Picandet



Ecole d'automne 2022 du GdR MBS



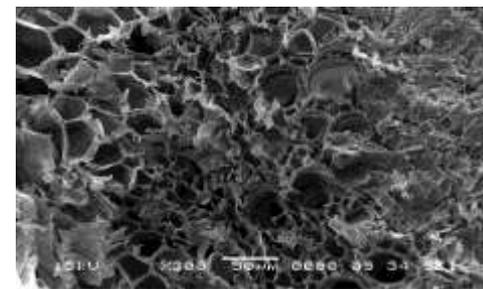
Caractéristiques générales

- Provenance des granulats ou particules d'origine végétale
- Microstructure
- Densité - Porosité
- Compressibilité
- Capacité d'absorption d'eau

Défibrage des plantes à fibres

- Exemple du chanvre : tiges → 30% de fibres et 60% de chènevotte (en masse)

Chènevotte : partie "boisée" de la tige



Porosité : Diamètre de 10 à 50 μm

Transformation mécanique

Broyage/défibrage et dépoussiérage → particules de forme allongée

Tige



Défibrage partiel

Chènevotte + 12% fibres



Défibrage poussé

Chènevotte < 4% fibres



Microstructure (transversale - longitudinale)

Granulo.

Tamisage

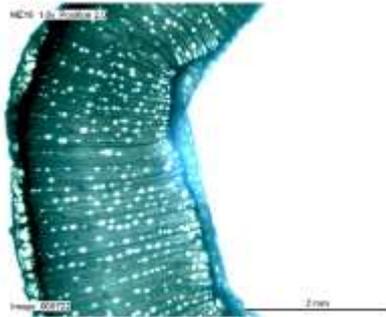
AI

Méthodes

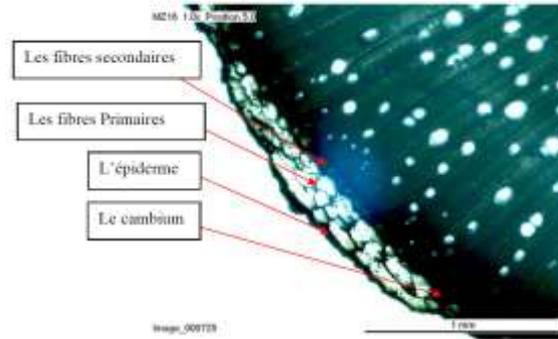
Comparaison

Modèles

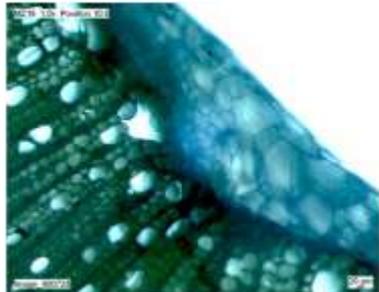
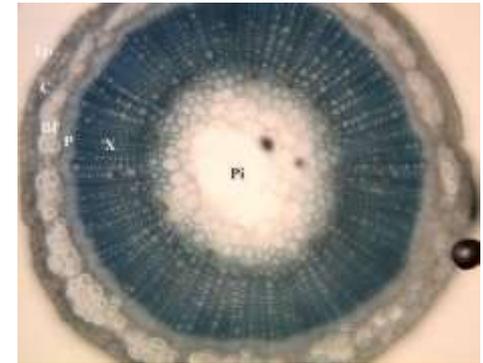
Conclusion



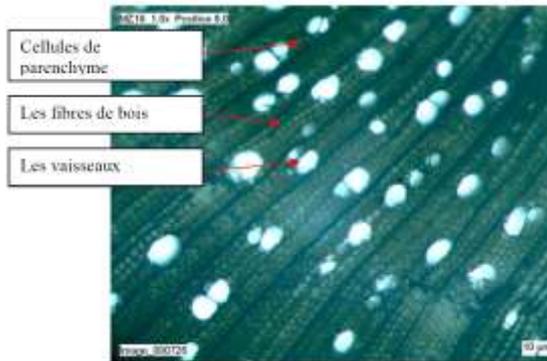
a)



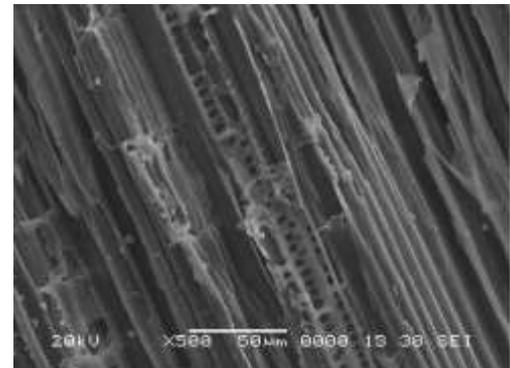
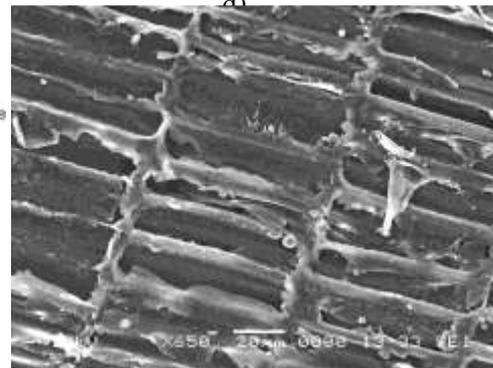
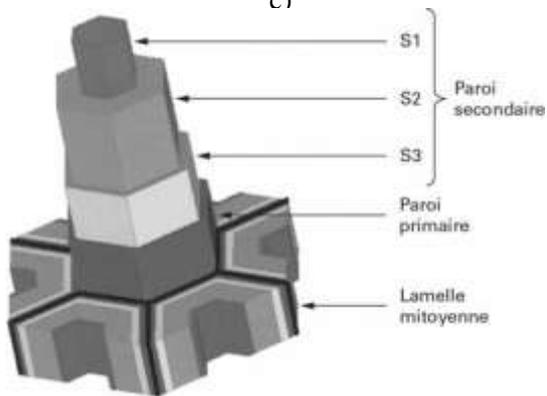
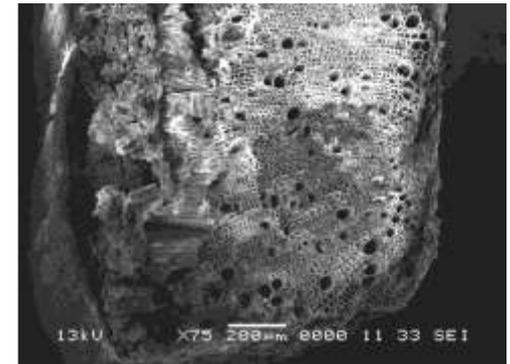
b)



c)



d)



Densité - Porosité

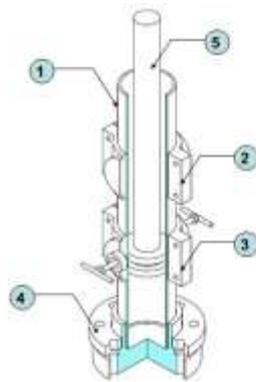


- Porosité totale : $\phi_{total} = 1 - \rho_V / \rho_S \leftarrow \rho_V = (1 - \phi_{total}) \rho_S$
- Porosité intra granulaire : $\phi_{intra} = 1 - \rho_P / \rho_S$; (forte orientation/axe de la tige)
- Porosité inter granulaire : $\phi_{inter} = 1 - \rho_P / \rho_V$;

	CP	CF
ρ_V masse volumique apparente en vrac à l'état sec [kg.m ⁻³]	112	71
ρ_P masse volumique apparente des particules sèches [kg.m ⁻³]	256	256
ρ_S masse volumique de la phase solide [kg.m ⁻³]	1 460	1 440
ϕ_{total} , porosité totale	92 %	95 %
ϕ_{intra} , porosité intra granulaire	82 %	82 %
ϕ_{inter} , porosité inter granulaire	56 %	72 %

Compressibilité

- Compressibilité en vrac
 - Empilement de granulats déformables → modèles

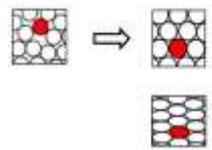
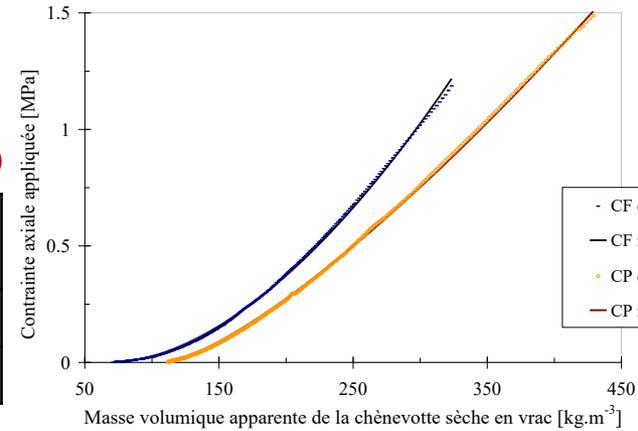


- 1 – tube en PVC
- 2 et 3 – collier de renforce en PVC
- 4 – fond démontable
- 5 – piston

$$\sigma = \sigma_o \left(\frac{\rho_v - \rho_{vo}}{\rho_{vo}} \right)^k$$

Picandet, V. (2013)

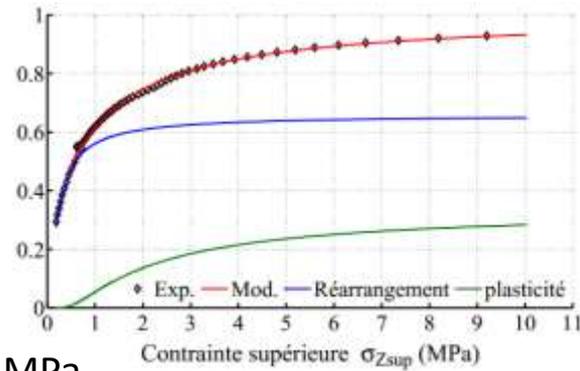
	ρ_{vo} [kg.m ⁻³]	σ_o [MPa]	k (compressibilité) [-]
CP	112	0,38	1,3
CF	71	0,13	1,8



- Réarrangement des particules
 - P1 : Pression de réarrangement
 - Cr : Compacité de réarrangement
- Déformation élastique et plastique des particules
 - P2 : Pression de déformation

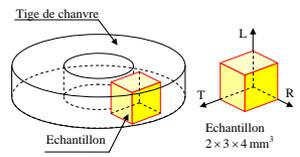
$$\frac{1 - C_0 / C}{1 - C_0} = \frac{a_1 \exp(-P_1 / \sigma_{zUP})}{+ a_2 \exp(-P_2 / \sigma_{zUP})}$$

Tronet, P.(2014) Thèse de doctorat



E en compression de la partie « boisée »

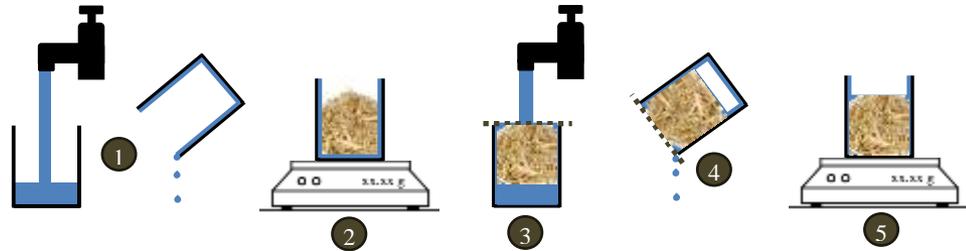
→ anisotrope : $E_L \approx 1800$ MPa, $E_R \approx 55$ MPa, $E_T \approx 30$ MPa



Phạm, T.-H. (2014) Thèse de doctorat

Capacité d'absorption d'eau

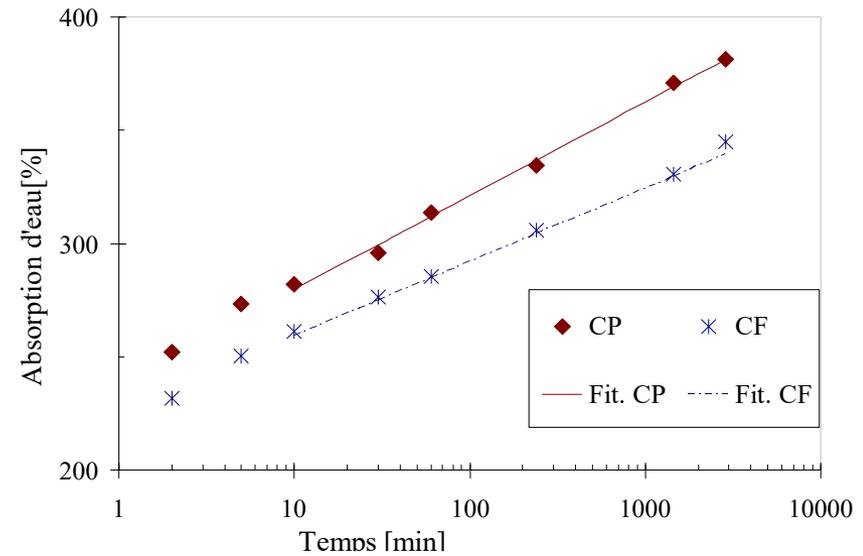
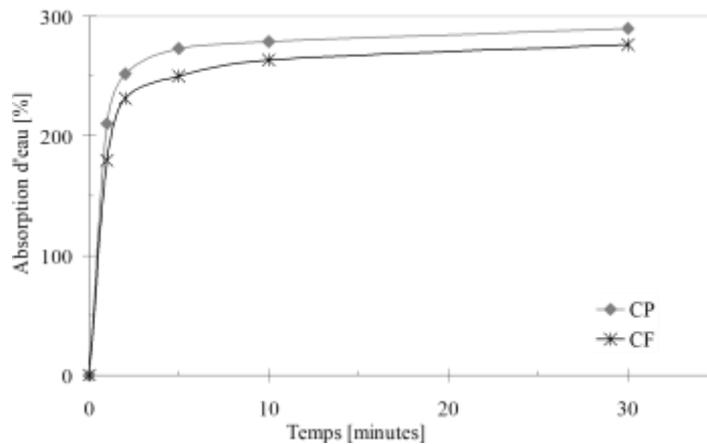
- Mesure par immersion complète



- Capacité d'absorption

→ Rapide (50% de w_{max} en 1 min.)

$$w(t) = K \log_{10}(t) + I_{RA}$$



Granulométrie

- Tamisage
- Analyse d'Images (AI)
- Méthodes d'interprétation
- Comparaison des résultats
- Modèles statistiques associés
- Caractérisation des distributions observées

Granulométrie : pour quoi faire et comment ?

Granulo.

Tamissage

AI

Méthodes

Comparaison

Modèles

Conclusion

- Caractérisation des granulats \leftrightarrow Définition de chènevotte pour la construction
- Pas de norme sur ce type de granulat (bio-sourcé)
 - Développement de procédés industriels / mise en œuvre
 - Qualité du matériau (mécanique et thermique / transfert)
- Deux méthodes peuvent être facilement employées :
- **Le tamissage :**
 - + échantillon de plusieurs centaines de grammes
 - Forme allongée de particules, faible poids volumique
 - Fiabilité de la méthode, dimension discriminante ? (longueur ou largeur ou ... ?)
- **L'analyse d'images** en 2D
 - + Largeur et Longueur quantifiables sur un grand nombre de particules
 - + Différents paramètres de formes sont accessibles
 - Méthode plus complexe, échantillons n'excédant pas quelques grammes
 - La précision des résultats = qualité de l'échantillonnage
 - La pondération massique n'est pas directement accessible

Tamissage

Granulo.

Tamissage

AI

Méthodes

Comparaison

Modèles

Conclusion

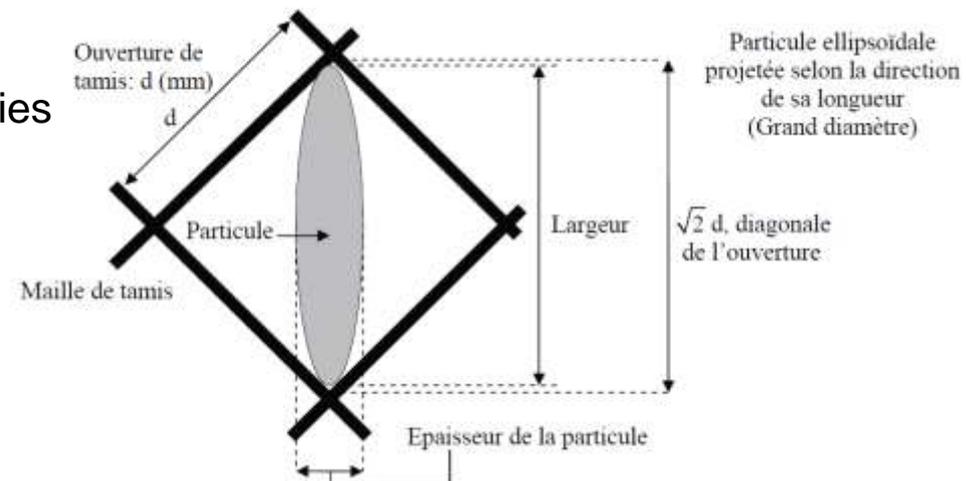
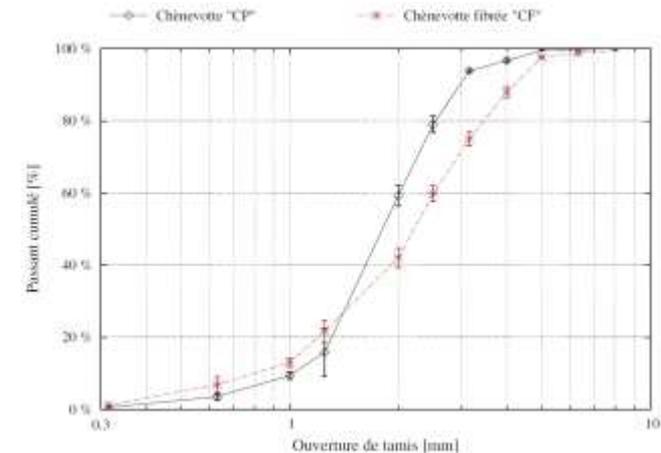
- Meilleure répétitivité si le temps de vibration est prolongé à 30 minutes
- Échantillon limité à 200 grammes et 5 tamis consécutifs
- Ouvertures : 8; 6,3; 5; 4; 3,15; 2,5; 2; 1,2 ; 0,8; 0,63 et 0,315 mm
- Teneur en fibres :



Pelotes de fibres se formant sur les premiers tamis (4 et 5 mm)

- Le tamissage suppose des particules sphériques de diamètre d

- Chènevotte :
→ Particules allongées et aplaties (ellipsoïde 3D)
- Grandeur mesurée ?
(largeur, longueur,...?)



Acquisition d'une image numérique

Granulo.

Tamissage

AI

Méthodes

Comparaison

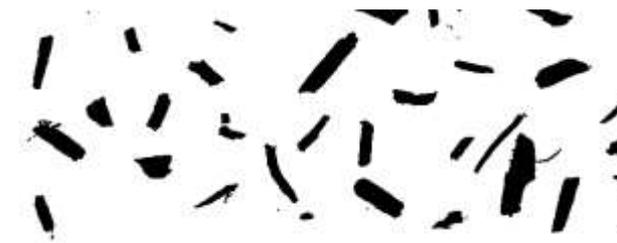
Modèles

Conclusion

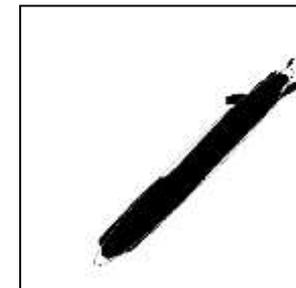
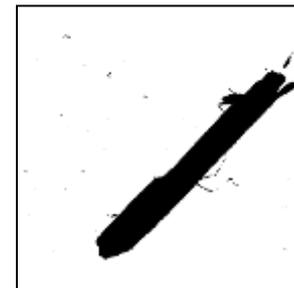
- Étalement des particules sur un plan
- Photographie (calibration précise) ou scanne (200 à 600 ppp)
- Recherche du meilleur contraste → fond noir homogène



- Conversion en niveau de gris → 8 bits (pixel variant de 0 à 255)
- Seuillage → binarisation de l'image :
 - 0 (noir) pour tous les pixels des particules
 - 1 (ou blanc) pour les pixels en arrière-plan

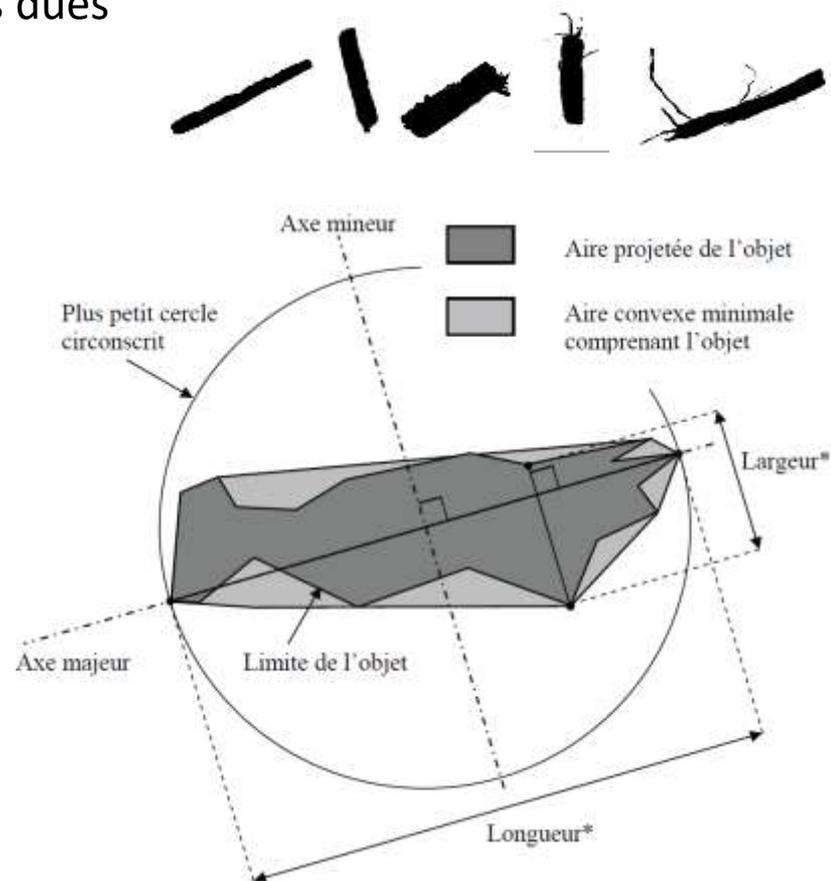


- Traitement éventuel de l'image : par ex. « opening » (érosion suivie d'une dilatation)
→ effacement des fibres les plus fines



Choix des particules à étudier

- Queue de distribution vers les particules les plus fines est inaccessible.
 - Établir un seuil de détection des particules en aire et/ou en largeur minimale.
- Tenir compte des formes irrégulières dues à la microstructure et à l'action de déchiquetage du défibrage.
- Évaluer le rapport de convexité des particules (Aire/Aire convexe minimale)



Définitions et choix des paramètres représentatifs

Granulo.

Tamissage

AI

Méthodes

Comparaison

Modèles

Conclusion

Largeur :

Diamètre minimal de Féret, i.e. distance minimale entre deux droites (ou plans) parallèles encadrant l'objet (ImageJ)

Longueur maximale selon l'axe mineur, perpendiculairement à l'axe majeur. (IT)

Longueur :

Diamètre maximal de Féret

Ajustement de formes géométriques

Ellipse :

Largeur = Petit diamètre

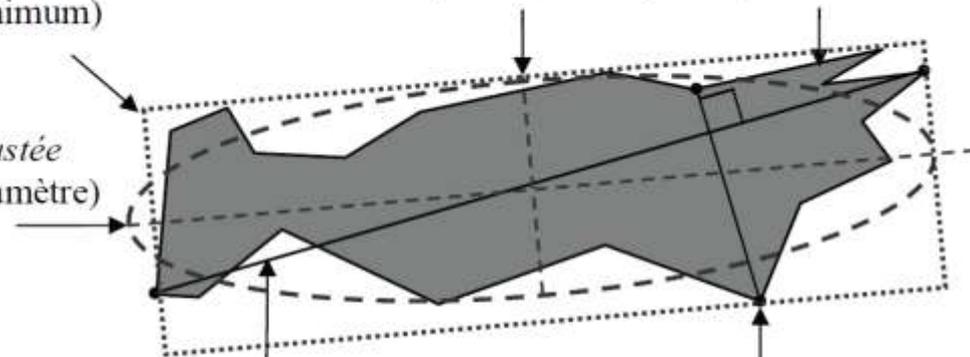
Longueur = Grand diamètre

Rectangle le plus étroit contenant l'objet, diamètre minimum de Féret (Ferret Minimum)

Ellipse ajustée (Petit diamètre)

Limite de l'objet : (Périmètre / Aire)

Ellipse ajustée (Grand diamètre)



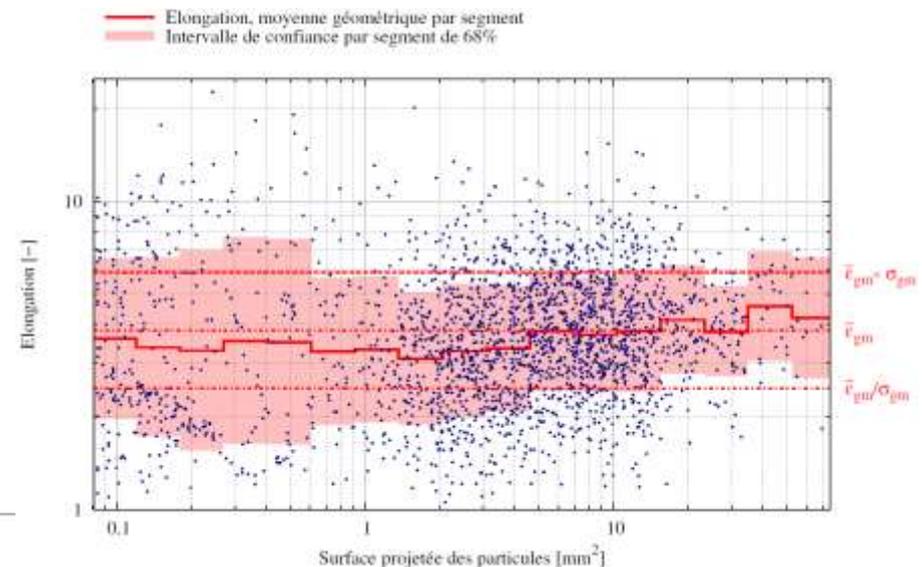
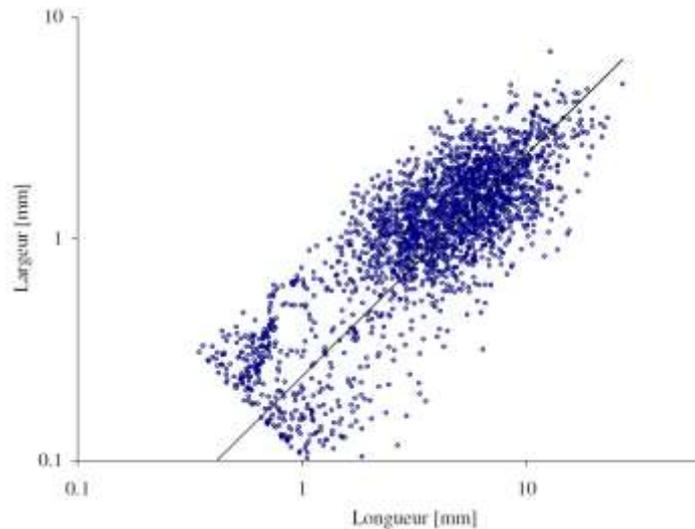
Axe majeur (Longueur) (Ferret Maximum) Diamètre du plus petit cercle entourant l'objet*

(Largeur) longueur maximum perpendiculaire à l'axe majeur*

Longueurs et largeurs mesurées

- Résultats pour environ 2600 particules détectées dans un échantillon de 4 g
 - Aire $> 0,081 \text{ mm}^2$ soit 45 pixels
 - Largeur $> 0,1 \text{ mm}$ soit plus de 2 pixels de large
 - Rapport de convexité $> 2/3$

- **Élongation** : $\varepsilon = \text{Longueur} / \text{Largeur}$
- Pas d'évolution significative de ε avec l'aire projetée des particules.
Moyenne géométrique de $e \cong 4$ avec un écart type géométrique de l'ordre de 1,5



Analyse granulométrique

- Répartition en fréquence (**N%**) *sensible au seuil de détection fixé*
- Répartition en fraction surfacique (**A%**) *directement accessible par analyses d'images*

$$P_A(X \leq x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i$$

- Répartition en fraction massique (**M%**) (*tamissage*)

$$P_M(X \leq x_n) = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i$$

- Extrapolation de (**A%**) \rightarrow (**M%**)

Extrapolation de l'élongation moyenne

l_i et e_i largeur et épaisseur moyenne de la particule

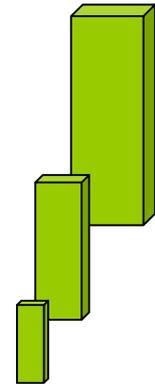
\rightarrow Rapport moyen $\Phi = e_i/l_i$ constant

$$P_M(X \leq x_n) = \frac{1}{V_T} \sum_{i=1}^n V_i \cong \frac{\sum_{i=1}^n e_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N e_i \cdot A_i}$$

$$P_M(X \leq x_n) \cong \frac{\sum_{i=1}^n l_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^N l_i \cdot A_i} \left(\text{si } \frac{e_i}{l_i} \cong \bar{\Phi} \text{ (const.)} \right)$$

$1/\Phi \rightarrow$ Aplatissement moyen (échantillon de 4g, $\rho_a \cong 300 \text{ kg/m}^3 \rightarrow 1/\Phi \cong 3$)

$$\bar{\Phi} = \frac{V_T}{\sum_{i=1}^N l_i A_i} = \frac{M_T}{\rho_a \sum_{i=1}^N l_i A_i}$$



Granulo.

Tamisage

AI

Méthodes

Comparaison

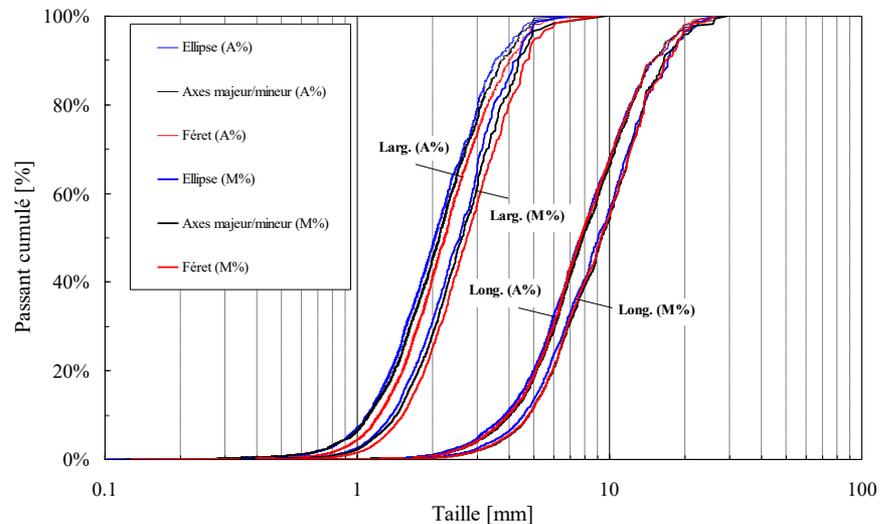
Modèles

Conclusion

Influence des méthodes d'analyse et des particules sélectionnées

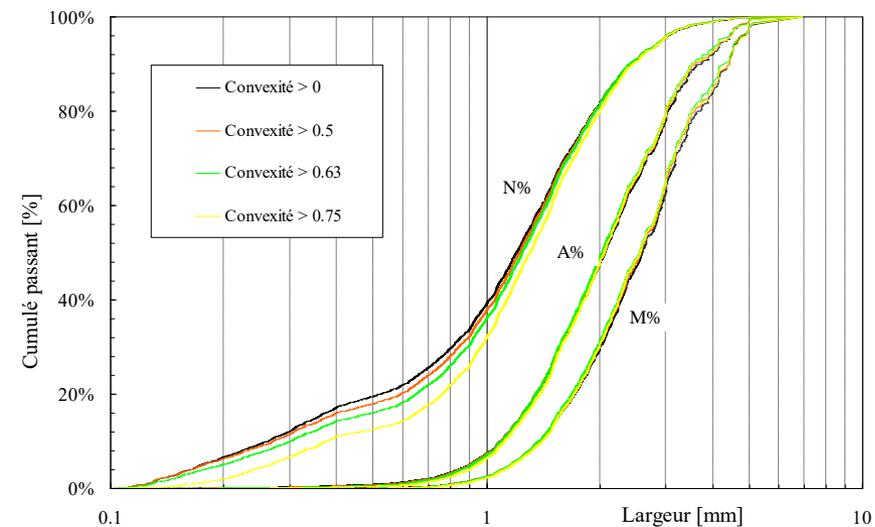
- **Méthodes** : Pas d'influence sur les longueurs.

Largeurs un peu différentes...



- **Sélection des particules** :

Peu ou pas d'influence sur (A%) ou (M%)



- **Seuil de détection**
Pas d'influence significative jusqu'à 0.8 mm^2
- **Rapport de convexité**
Peu d'influence

Granulo.

Tamisage

AI

Méthodes

Comparaison

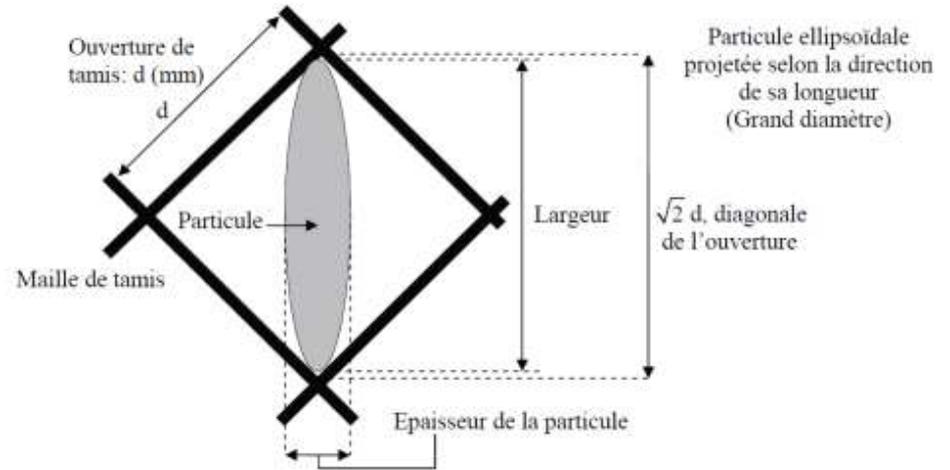
Modèles

Conclusion

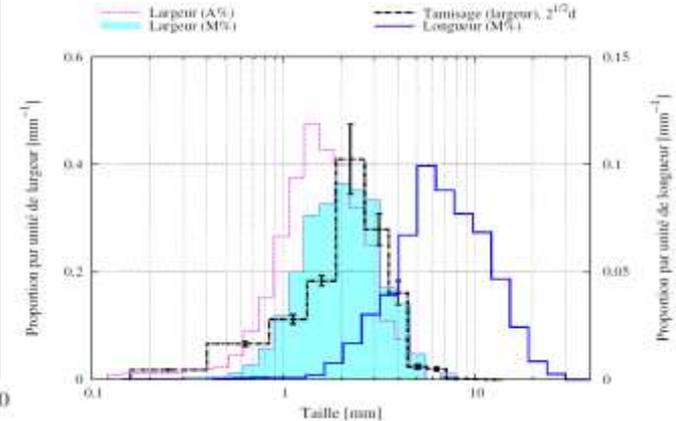
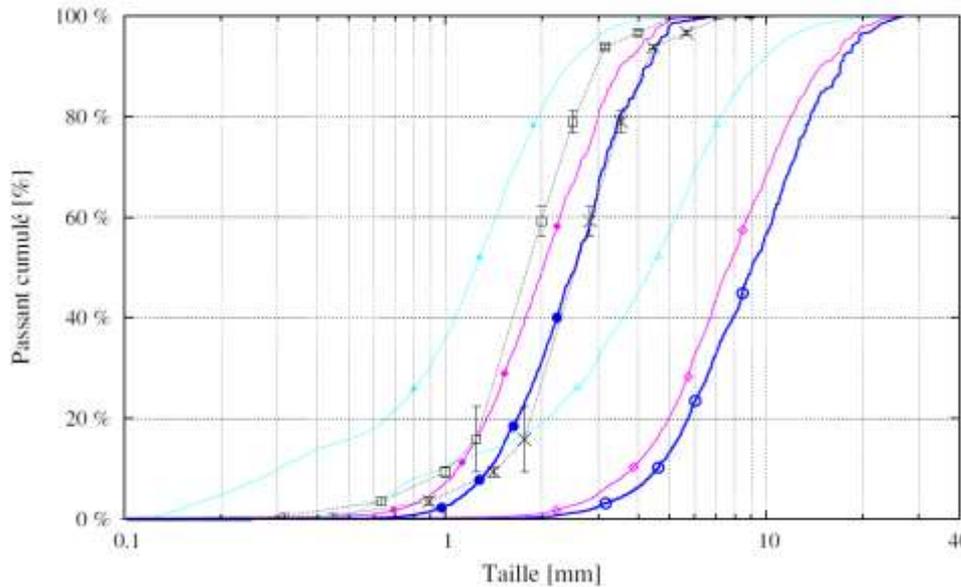
Comparaison des résultats - Tamisage

Correspondance de la répartition (M%) avec les refus des tamis

Si la diagonale des ouvertures carrées est considérée, $d^{2^{1/2}}$



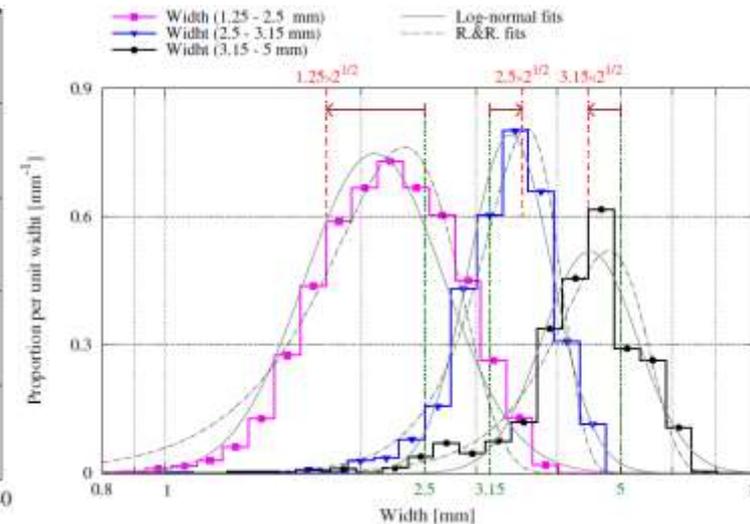
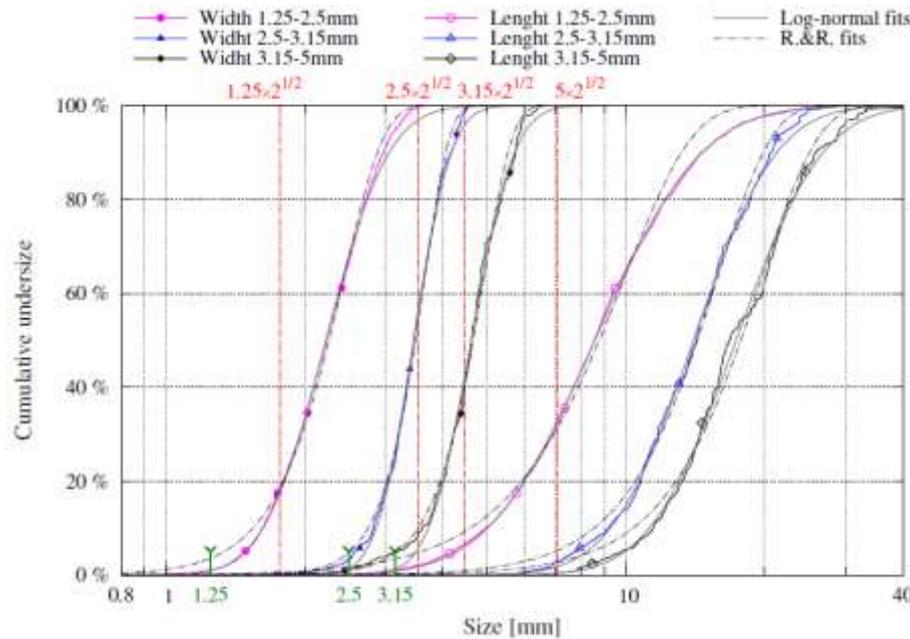
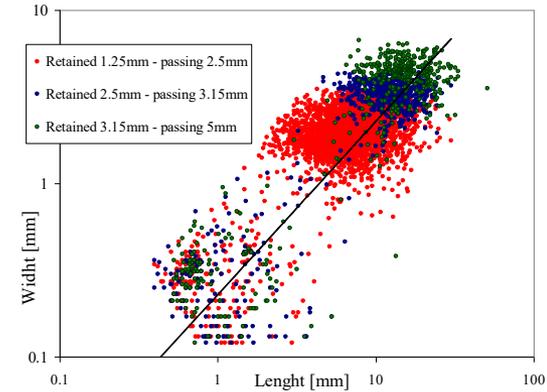
- Largeur (N%)
- Longueur (N%)
- Tamisage, d
- Largeur (A%)
- Longueur (A%)
- ×— Tamisage, $2^{1/2}d$
- Largeur (M%)
- Longueur (M%)



Analyse d'images des refus sur les tamis

Fraction comprise entre les tamis d_1 et d_2 avec $d_1 < d_2$

- Largeur max. $\leq 2^{1/2}d_2$
- 1 à 5% de passant à d_1 rémanent
- 15 à 55% de passant à $2^{1/2}d_1$
- Mode de distribution $\in [2^{1/2}d_1 ; d_2]$ même si $d_2 < 2^{1/2}d_1$



Modèles de répartition

- Lois simples à 2 paramètres basées sur des variables semi-infinies.
- Répartition de type Log-normale

$$P_{\text{Log-N}}(\mathbf{X} \leq x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]$$

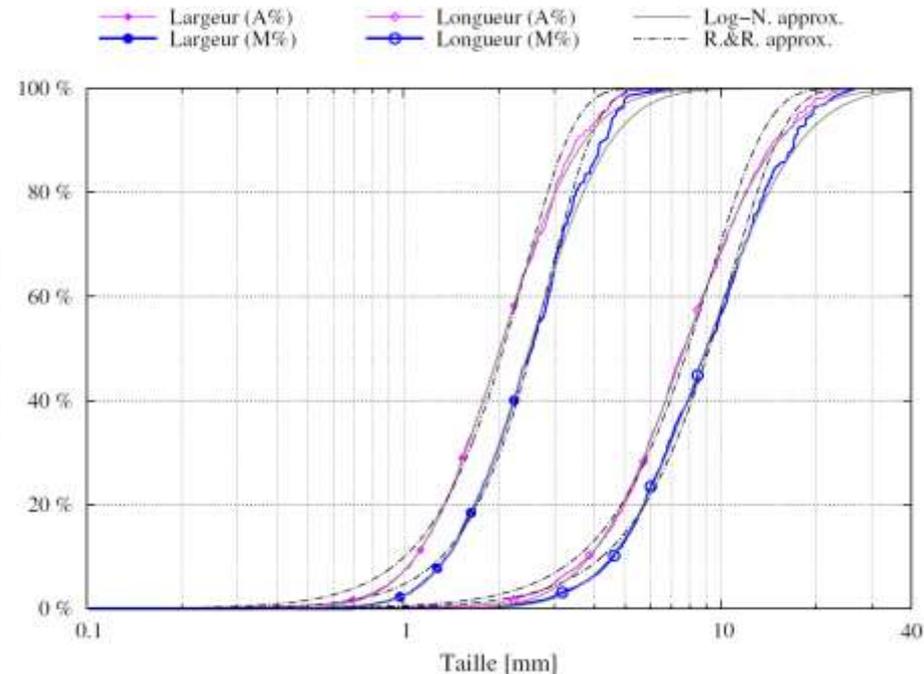
- Répartition de type Rosin-Rammler (Weibull)

$$P_{\text{RR}}(\mathbf{X} \leq x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^k \right]$$

– Fonction réciproque immédiate

$$x = \lambda \left[-\ln(1 - P_{\text{RR}}(\mathbf{X} \leq x)) \right]^{1/k}$$

- Dérivée de fonction de répartition
→ Densité de probabilité (fonction de masse)



Modèles de distribution correspondants

- Distribution de type Log-normale :

$$P_{\text{Log.N}}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right]$$

Espérance

$$E_{\text{Log.N}} = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

Écart type géométrique

$$\sigma_{\text{Log.N}} = E_{\text{Log.N}} \sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$$

$$\text{Mode}_{\text{Log.N}} = e^{(\mu - \sigma^2)} \text{ mm}$$

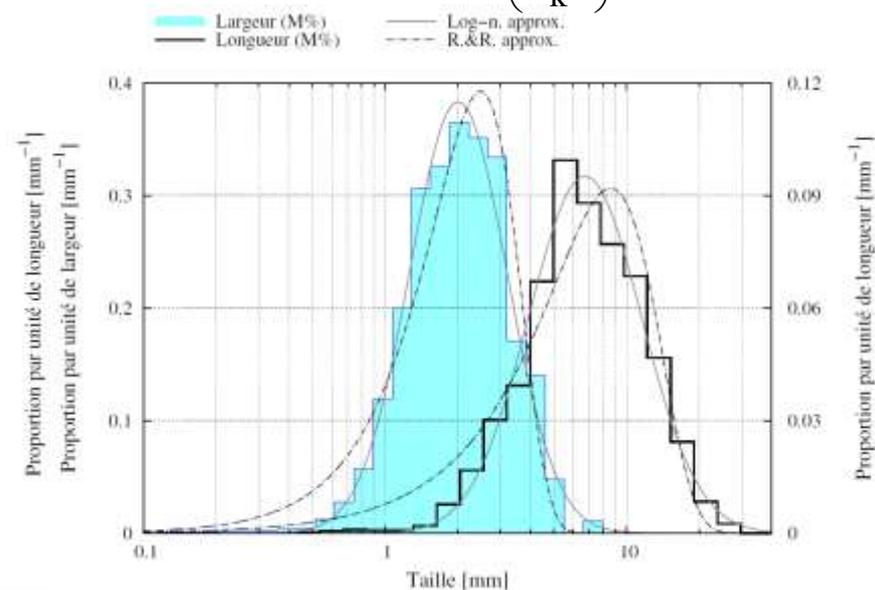
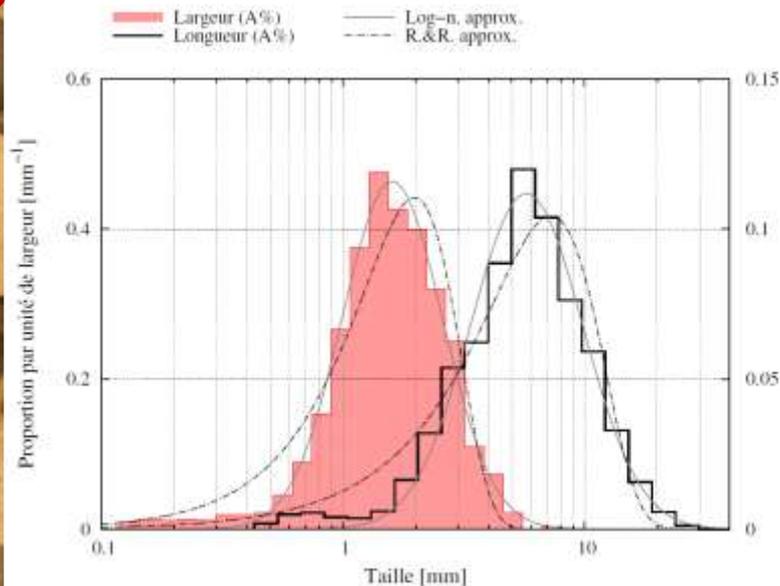
- Répartition de type Rosin-Rammler (Weibull)

$$P_{\text{RR}}(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right]$$

$$E_{\text{RR}} = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

$$\sigma_{\text{RR}} = \sqrt{\lambda^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - E_{\text{RR}}^2}$$

$$\text{Mode}_{\text{RR}} = \lambda \left(\frac{k-1}{k}\right)^{1/k}$$



Paramètres de caractérisation

Avec une distribution Log.Normale

Comparaison de μ et σ

- → Moyenne géométrique pondérée (Aire ou Masse) $X_{gm} = \exp\left(\frac{\sum M_i \ln(x_i)}{\sum M_i}\right)$
- → Ecart type associé $\sigma_{gm} = \exp\left(\sqrt{\frac{\sum M_i (\ln(x_i) - \ln(X_{gm}))^2}{\sum M_i}}\right)$

	Tamisage		Largeur [mm]		Longueur [mm]	
	d [mm]	$2^{1/2}d$ [mm]	(A%)	(M%)	(A%)	(M%)
X_{gm}	1.42	2.01	1.99	2.45	7.58	8.85
e^μ	1.80	2.55	2.02	2.50	7.68	9.00
σ_{gm}	1.69	1.69	1.61	1.55	1.72	1.67
e^σ	1.48	1.48	1.62	1.59	1.71	1.71
R^2	0.9996	0.9996	0.9996	0.9990	0.9993	0.9992

Facteurs moyens de formes

- Élongation moyenne
 $3,65 < \varepsilon < 3,9$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \frac{L_i}{l_i}}{\sum_{i=1}^N V_i} \cong \frac{\sum_{i=1}^N L_i A_i}{\sum_{i=1}^N l_i A_i} \quad (\text{si } V_i \cong \bar{\Phi} l_i A_i)$$

- Aplatissement moyen
 $3 < 1/\Phi < 4$

$$\bar{\Phi} = \frac{V_T}{\sum_{i=1}^N l_i A_i} = \frac{M_T}{\rho_a \sum_{i=1}^N l_i A_i}$$

Granulo.

Tamissage

AI

Méthodes

Comparaison

Modèles

Conclusion

Conclusion / Granulométrie Chènevotte

- Tamisage
 - Discrimination globale des particules selon leur largeur $\leq d.2^{1/2}$
 - Les particules s'orientent pour passer les tamis selon la diagonale des ouvertures
- Analyse d'image
 - Mesure fiable et précise de la **longueur des particules**
 - Évaluation de la largeur montre une légère sensibilité à la méthode de détermination
 - **Méthode la plus fiable et reproductible**
- Particules de chanvre ont des formes quasi homothétiques
 - Rapports moyens d'élongation ($\cong 4$) et d'aplatissement ($\cong 1/3$) constants
 - Anisotropie significative induite par les empilements granulaires lors des mises en œuvre
- Distributions unimodales des largeurs ou longueurs, cumulées en aire ou en masse
 - Bonne approximation selon une loi log-normale classique.
 - paramètres représentatifs** → Moyenne géométrique pondérée - écart type associé

...



1,25-2,5 mm 2,5-3,15 mm 3,15-5 mm complet

Bibliographie (quelques éléments)

- Nguyen T.-T., Picandet V., Amziane S., Baley C., Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete. European journal of environmental and civil engineering, Vol 13, n° 9, pp. 1039-1050, 2009
- Nguyen T.-T., Picandet V., Carré P., Lecompte T., Amziane S., Baley, C., Effet of compactness on mechanical and thermal properties of hemp concrete. European journal of environmental and civil engineering, Vol 14, n°5, pp. 545-560 2010
- Nguyen T.-T., Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2010 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01017510/document>
- Phạm, T.H., Férec, J., Picandet, V., Tronet, P., Costa, J., and Pilvin, P. (2012). Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux–chanvre. In XXXèmes Rencontres de L'association Universitaire de Génie Civil,
- Picandet V., Tronet P., Baley Ch. « Caractérisation granulométrique des chènevottes », XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, Chambéry, 2012.
- Phạm, T.-H., Férec, J., Picandet, V., and Pilvin, P. (2013). Etude expérimentale, théorique et numérique de l'élasticité de composites chaux–chanvre. In 21ème Congrès Français de Mécanique,.
- Picandet, V. (2013). Characterization of Plant-Based Aggregates. In Bio-Aggregate-Based Building Materials: Applications to Hemp Concretes, eds. (John Wiley & Sons, Inc.)
- Phạm, T.-H. (2014). Modélisation multi-échelles des propriétés thermiques et élastiques de composites chaux-chanvre. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud.
- Tronet, P. (2014). Contribution à l'étude des matériaux chaux-chanvre: Influence du compactage sur les propriétés. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00597501/document>
- Amziane S, Collet F, Lawrence M, Magniont C, Picandet V, Sonebi M (2017) Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity, Materials and Structures 50:167–177
- ...

Granulo.

Tamassage

AI

Méthodes

Comparaison

Modèles

Conclusion