

**GdR MBGS**  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION  
BIO et GÉO SOURCÉS

## JOURNÉE DE RESTITUTION DU PROJET LOCABATI

2 juin 2026, Champs-Sur-Marne



### Avancées et principaux résultats à l'échelle micro par tomographie

Tinhinane Chekai, UMRAE – CEREMA

Camille Chateau, Navier – ENPC

*Philippe Glé, UMRAE – CEREMA*

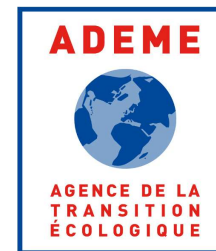
*Thibaut Lecompte, IRDL – Univ. Bretagne-Sud*

*+ P. Aimedieu, A. Fresnet (Navier), C. Magniont (LMDC), T. Weitkamp (SOLEIL)*





# Introduction



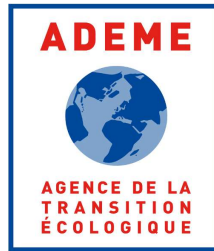
## Objectifs généraux

- **Caractérisation volumique** de la **microstructure d'empilements granulaires** végétaux à l'état vrac et dans des conditions représentatives des procédés de mise en œuvre
- **Quantification** de caractéristiques microstructurales pertinentes pour
  - alimenter la modélisation des performances hygrothermiques, acoustiques et de tenue au feu
  - appuyer la formulation de matériaux avec liant
- Compréhension du lien entre microstructure et propriétés à l'échelle du matériau

## Méthode

- **Tomographie et traitements d'images** pour caractériser : morphologie des particules et de l'empilement, porosité, masse volumique locale, propriétés de transport, évolution avec la compaction
- **Différents types de particules**, analyse prioritaire de la **chènevotte**





# Plan de la présentation

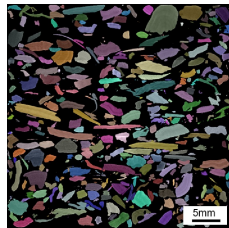
1

Échantillons  
et expériences



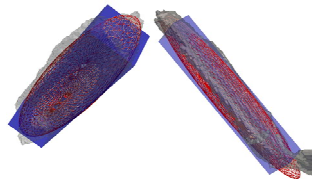
2

Traitement  
d'images 3D



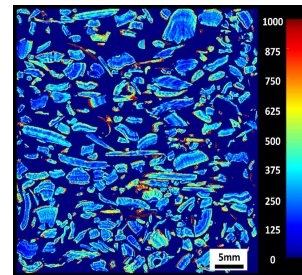
3

Particules  
à l'état vrac



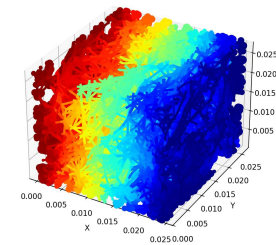
4

Porosité et  
masse volumique  
locale



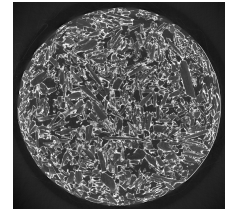
5

Propriétés de  
transport



6

Passage aux  
mélanges avec  
liant



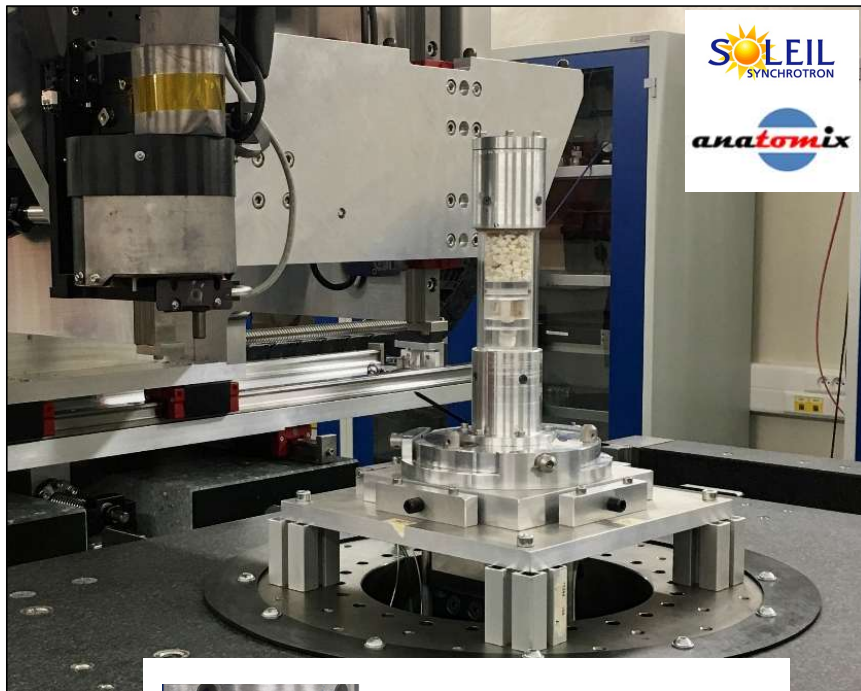


## Echantillons et expériences



# Tomographie in situ d'empilements granulaires

Sept. 2021



- Empilements  $\varnothing 40$  mm
- Voxel : 18  $\mu$ m
- **Etat sec** ou humide
- 3 niveaux de compression
- 3 types de particules observées

**Chènevotte**

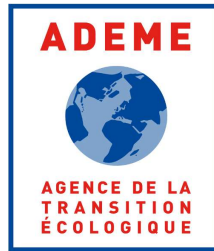
Moelle de  
 tournesol

Roseau

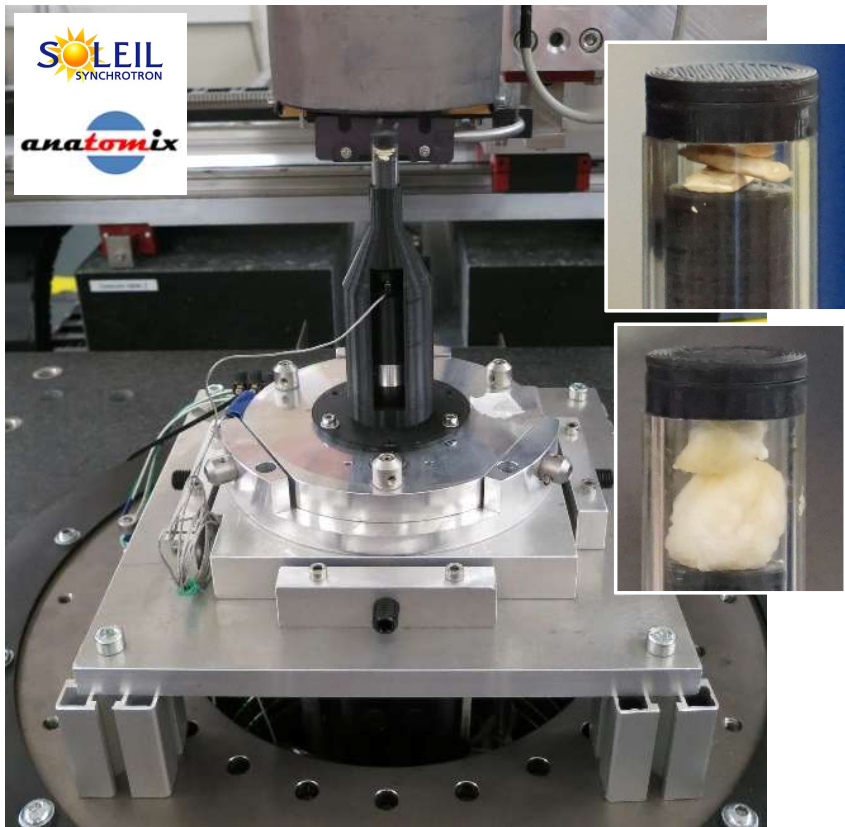




# Observations complémentaires



### Compression, échelle particule



Sept. 2021

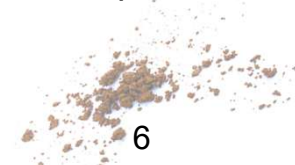
voxel : 1.3  $\mu\text{m}$

### Echantillons avec liant



Juin 2025

voxel : 36.2  $\mu\text{m}$

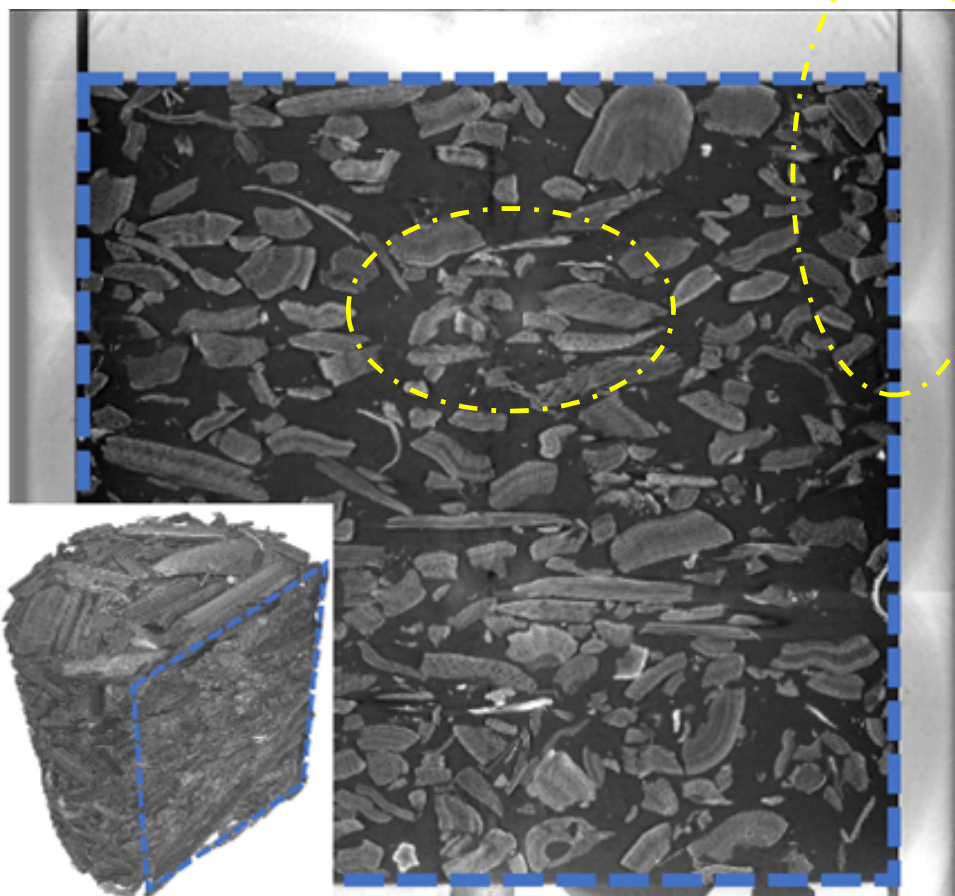




# Traitement d'images 3D



## Image 3D et verrous

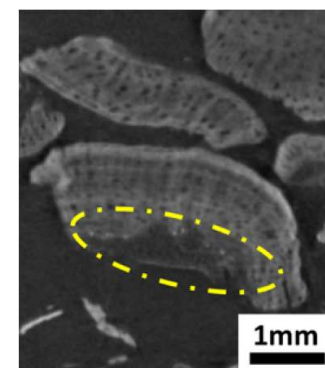


### Objectifs

- Isoler les particules et la porosité inter-granulaire (*segmentation*)
- Quantifier les masses volumiques à partir des niveaux de gris (*densitométrie*)

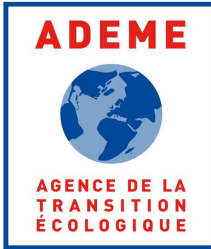
### Difficultés

- Faible contraste air / matière végétale
- Morphologie complexe et irrégulière
- Artefacts d'imagerie

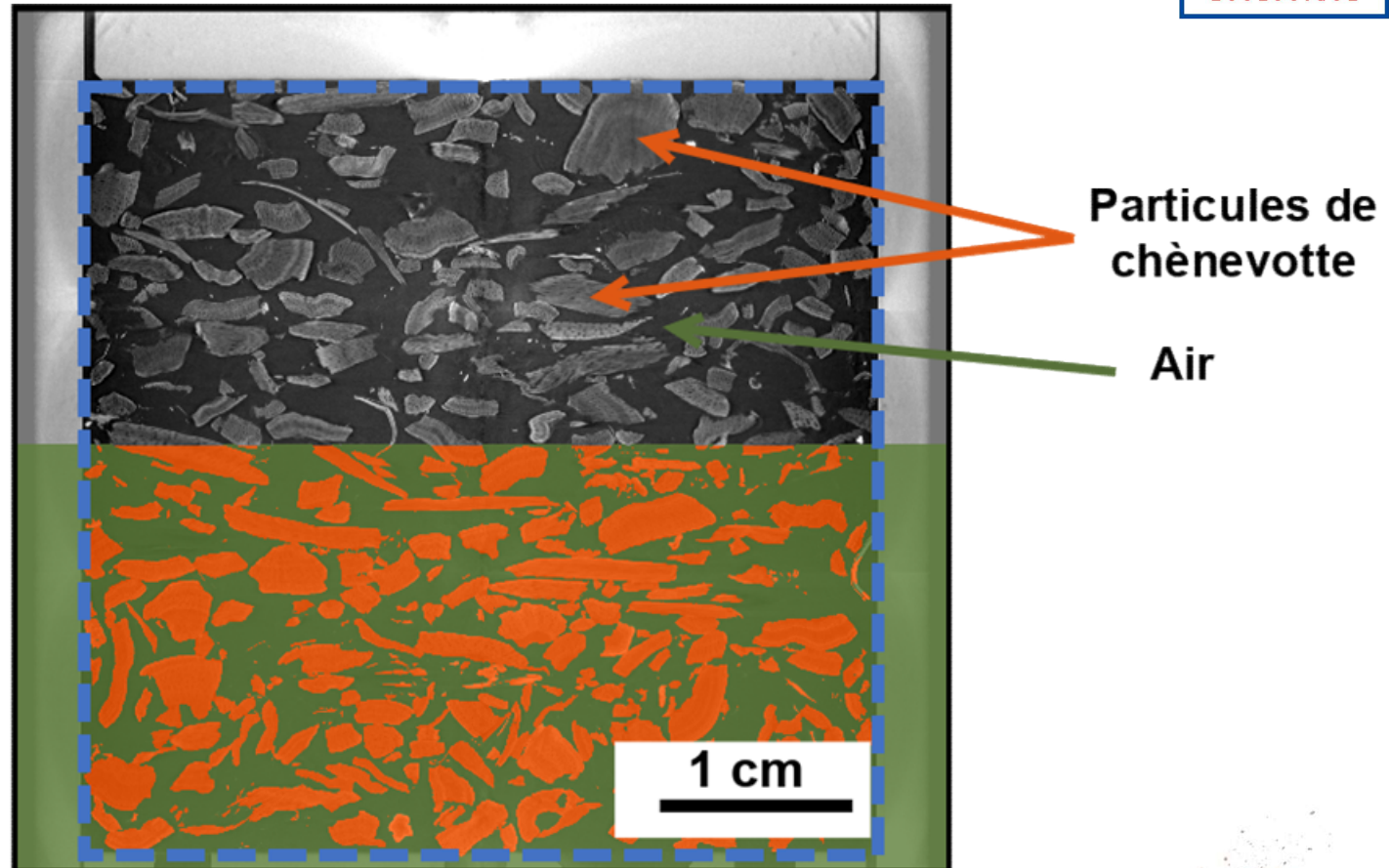




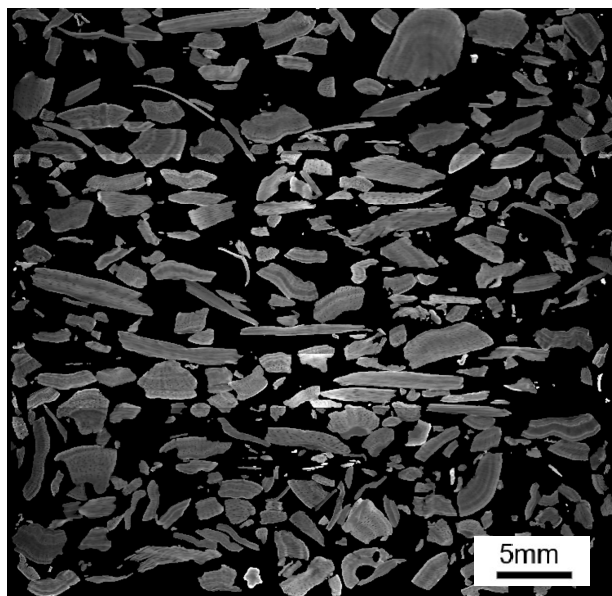
## Segmentation d'image 3D



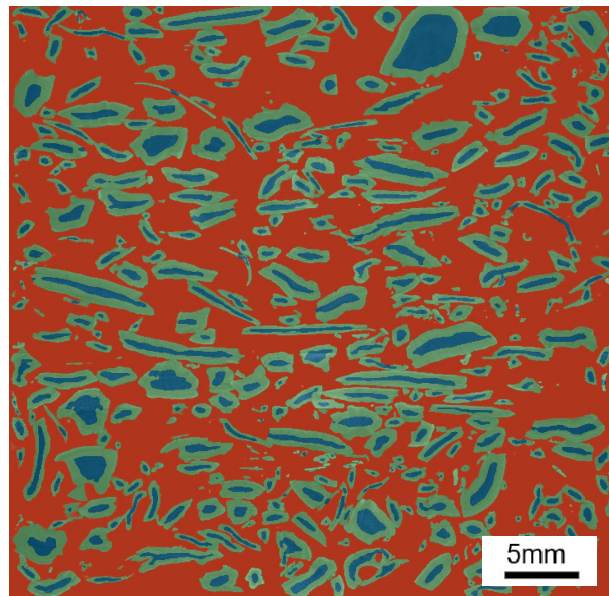
- U-Net 2.5D – modèle entraîné par l'équipe Dragonfly ORS
- Volumes 16 bits, résolution de  $2604 \times 2604 \times 936$  voxels (12 Go)
- Configuration matérielle :  
RAM = 1 To, CPU = 2,10 GHz,  
GPU = NVIDIA RTX A5500  
avec 24 Go de VRAM
- Temps d'entraînement initial : 2 jours et 18 heures



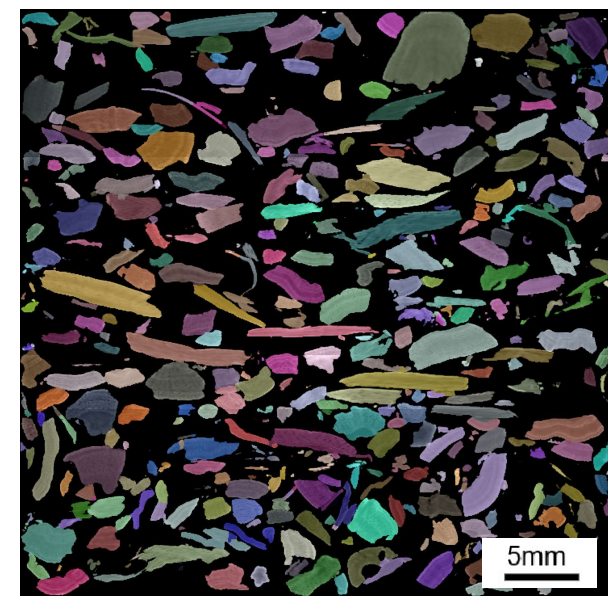
# Segmentation d'image 3D



Volume contenant uniquement les valeurs de gris des particules

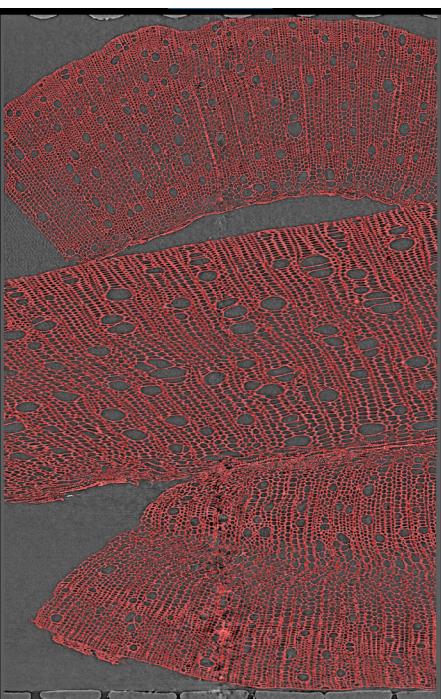


Génération de marqueurs par deep learning avec une première annotation manuelle des marqueurs

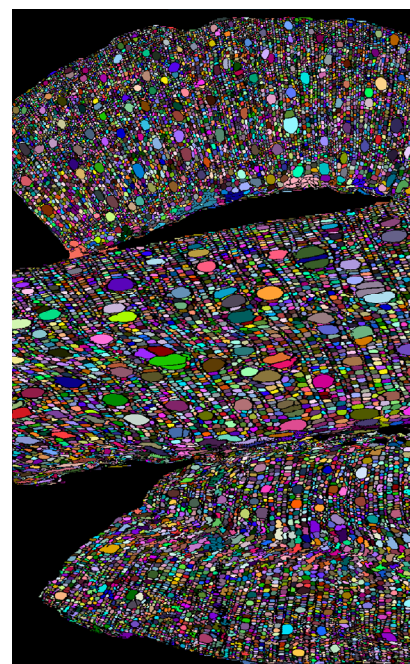
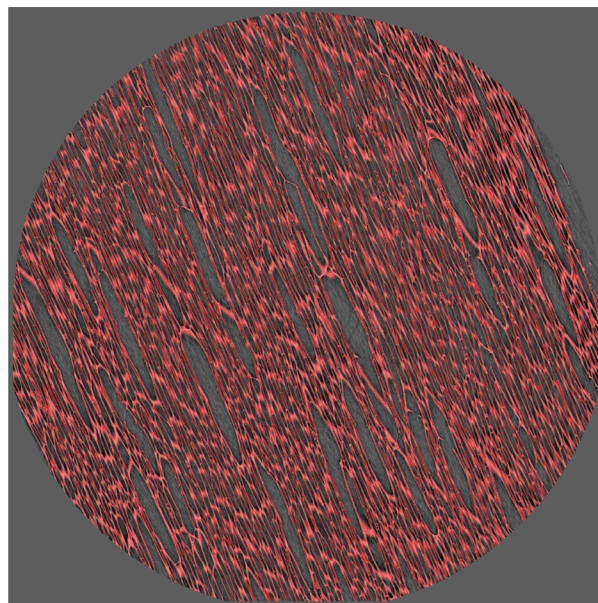


Application d'un watershed 3D

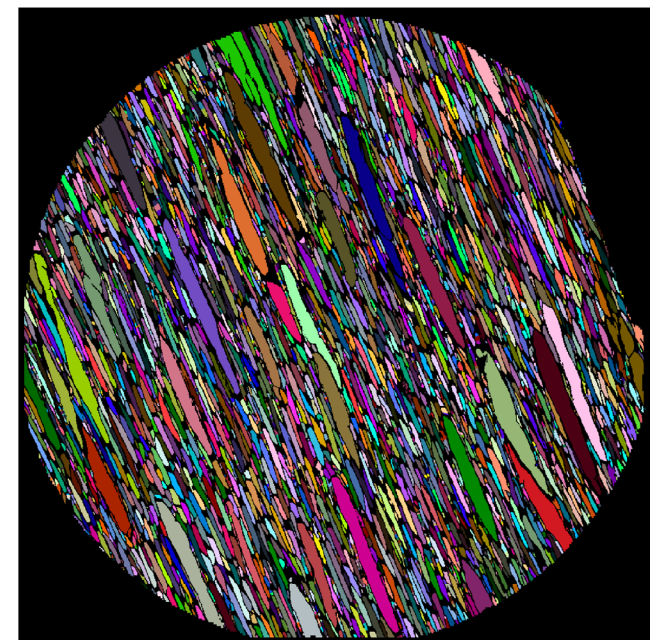
# Segmentation d'image 3D



Segmentation parois végétales

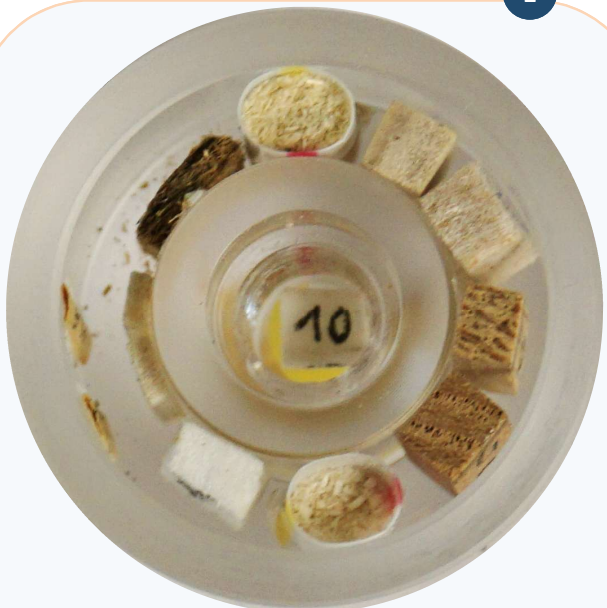


Segmentation et séparation  
 des pores intra-particule



# Quantification des masses volumiques : principe

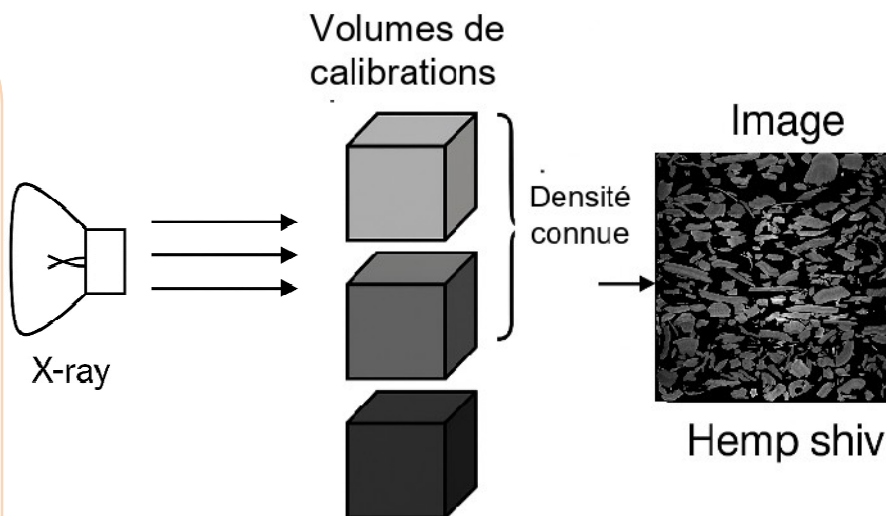
1



## Calibration:

échantillons de référence de masse volumique connue

(particules végétales, bois, polymères)



2

## Application

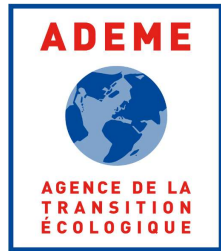
- Matériaux de la même nature
- Résolution similaire
- Valeur de gris non influencée par des artefacts

Hypothèse : niveau de gris  $\propto$  atténuation rayons X  $\propto$  masse volumique

→ Relation niveaux de gris – masse volumique apparente

$$g_{avg} = a\rho_{app} + b$$

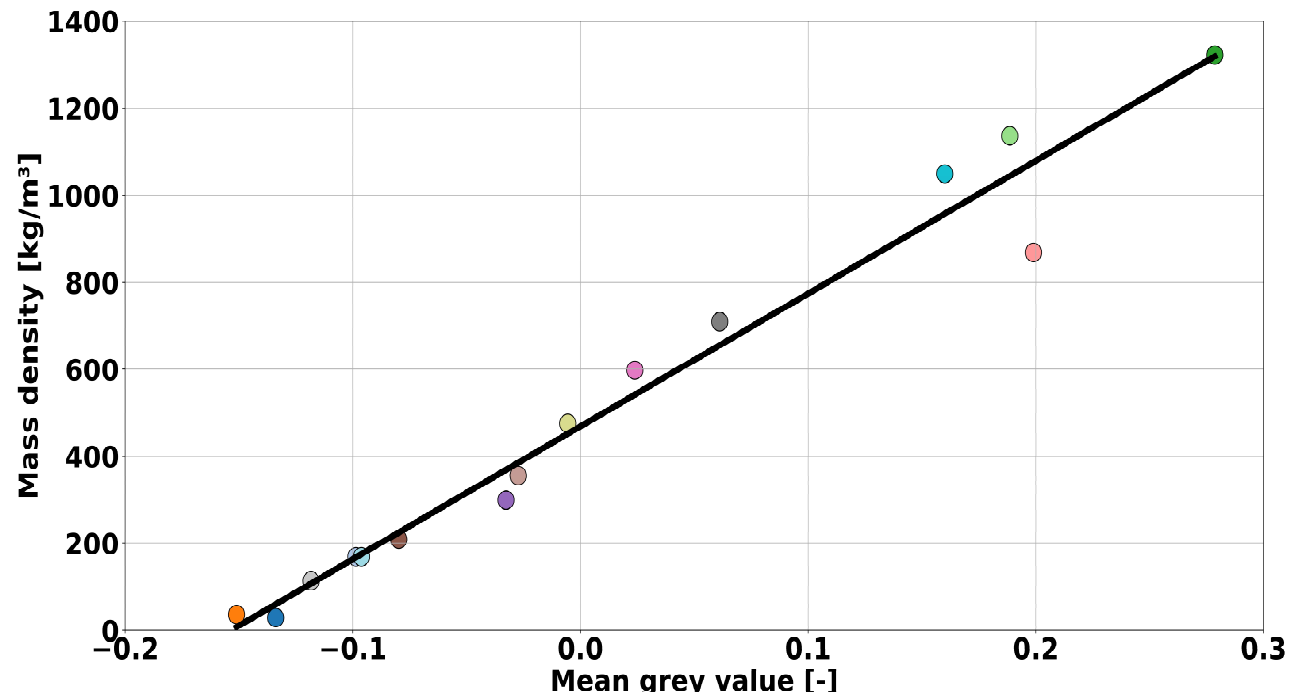




# Quantification des masses volumiques

Calibration

$$g_{avg} = a\rho_{app} + b$$

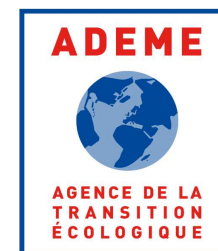


- Sunflower pith
- Hemp shiv powder
- Sunflower pith powder
- PLA
- PMMA
- Compacted reed
- Reed
- Hemp1
- Hemp2
- Elm
- Oak
- Balsa
- Poplar
- Polystyrene beads
- Hemp shiv powder reference



Correction préalable des artefacts sur les images

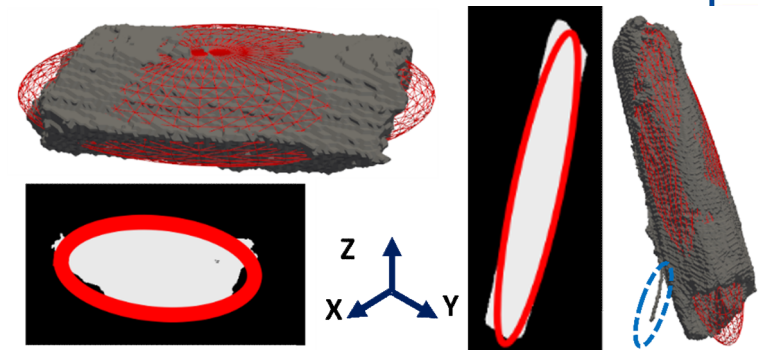
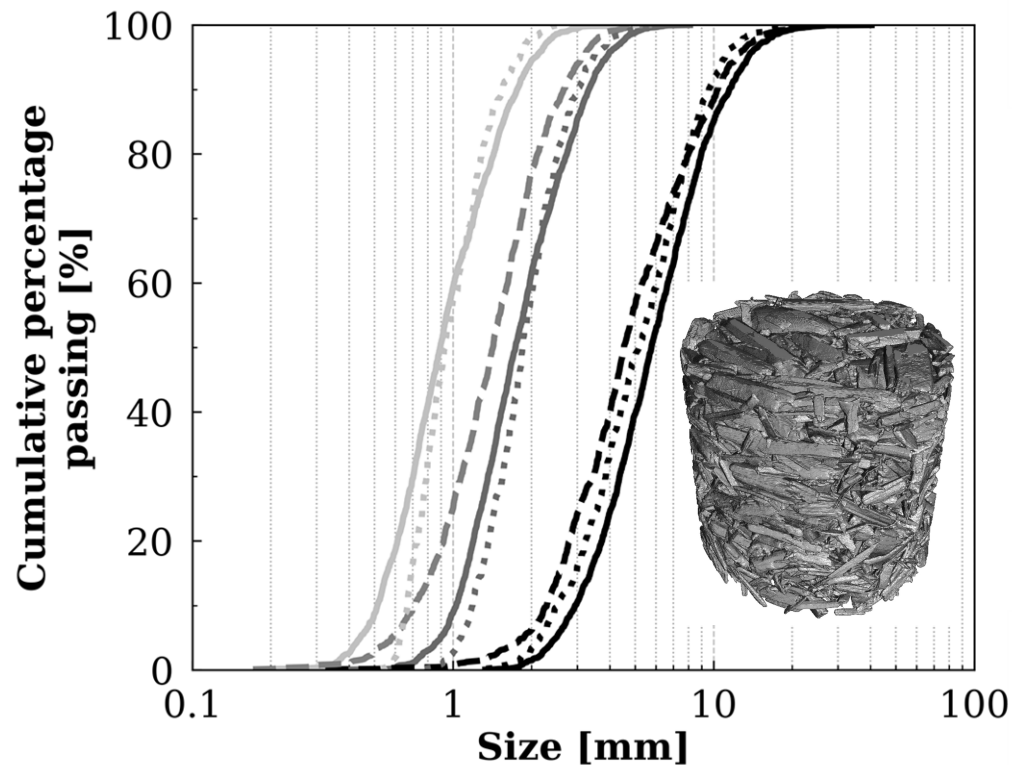




## Caractérisation des particules à l'état vrac



# Morphologie des particules : taille



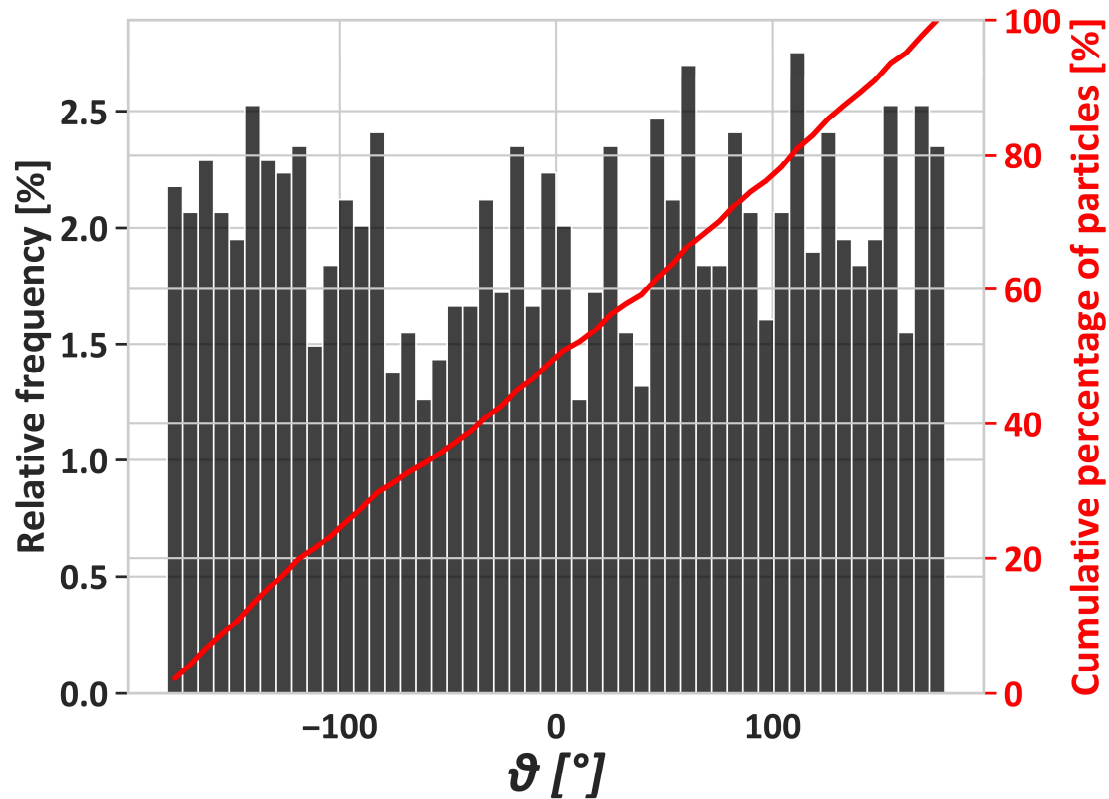
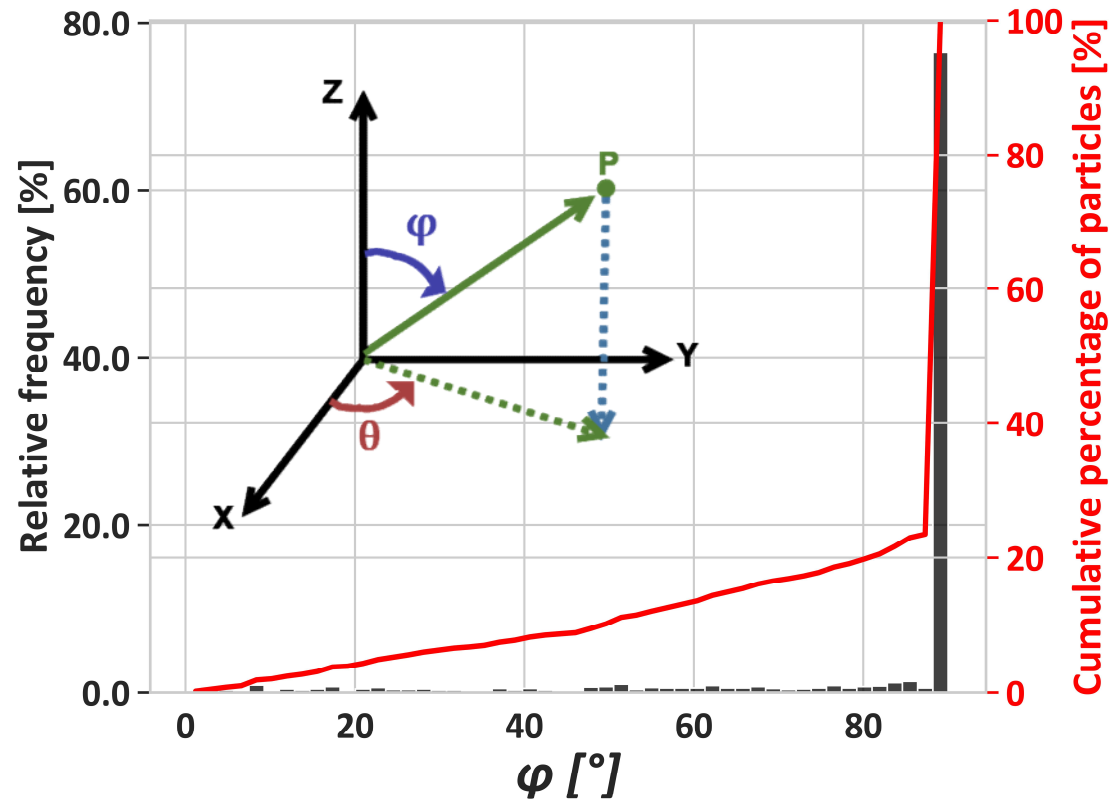
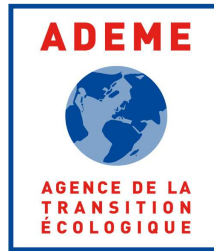
- 3D ANATOMIX major axis
- 3D ANATOMIX intermediate axis
- 3D ANATOMIX minor axis
- - - 2D validation sample major axis
- - - 2D validation sample minor axis
- ..... 3D validation sample major axis
- ..... 3D validation sample intermediate axis
- ..... 3D validation sample minor axis

→ Bonne correspondance du grand axe (2D et 3D)  
 → Apport tomographie : 3ème axe (2D incertitude entre 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> axe)

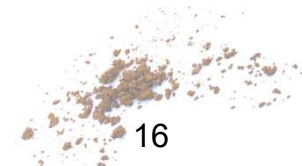




# Morphologie des particules : orientation

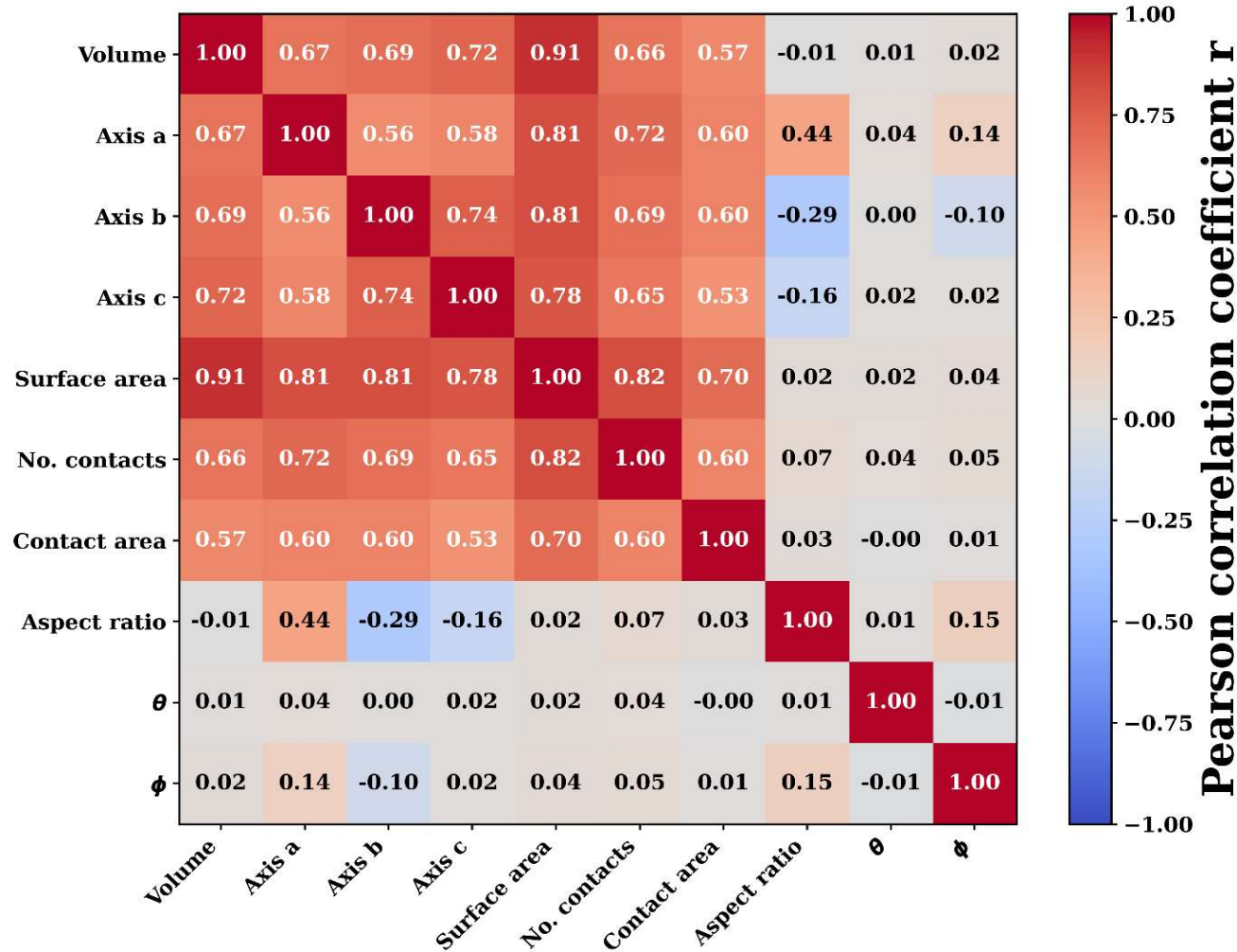
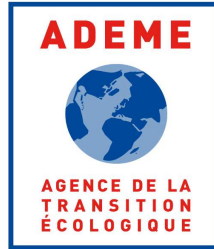


→ Anisotropie : orientation préférentielle de 90° par rapport à la verticale



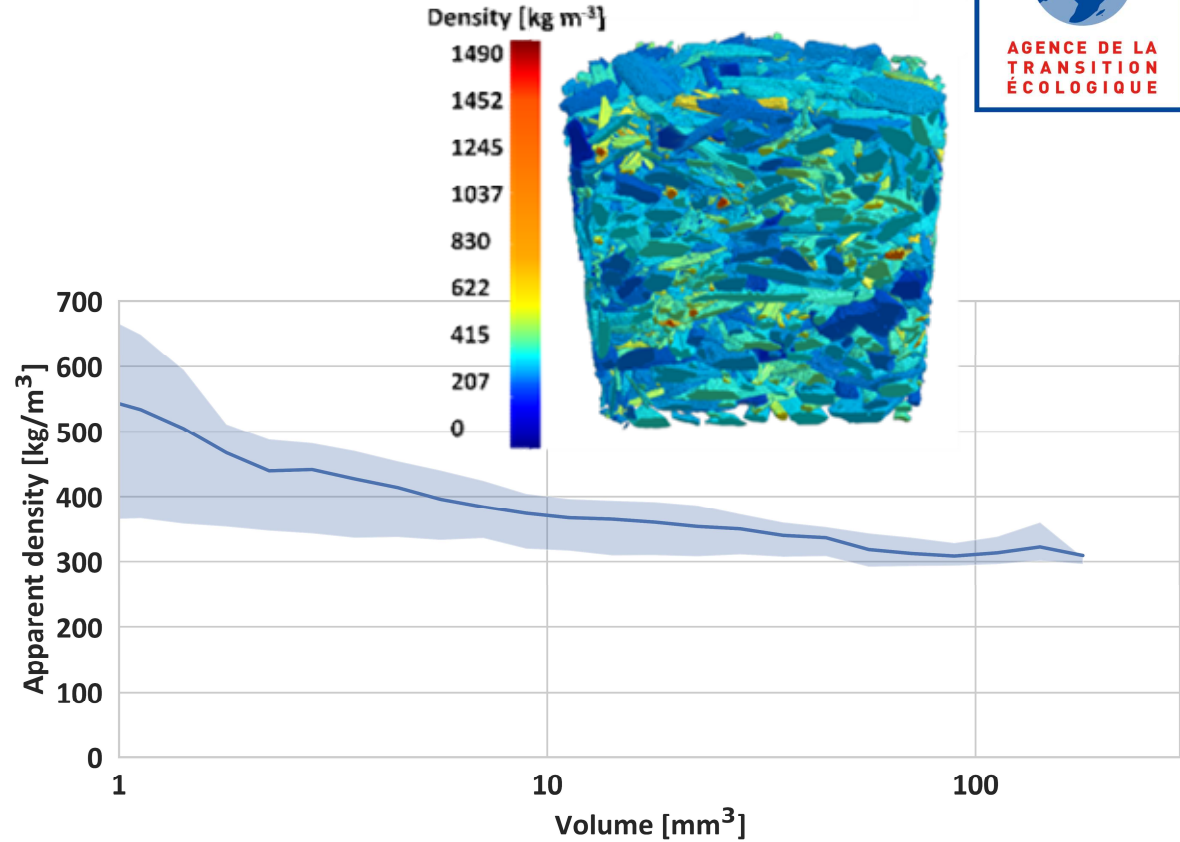
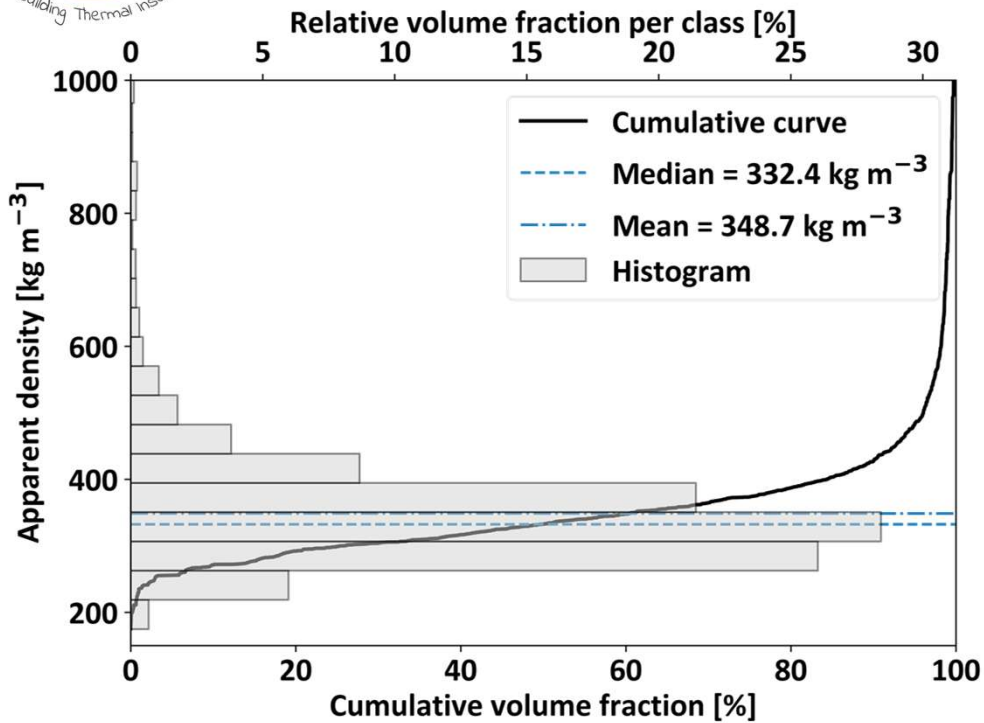
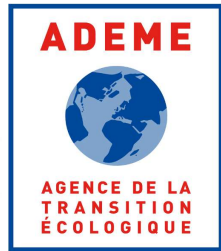


# Corrélation des propriétés morphologiques ?





# Masses volumiques particulières



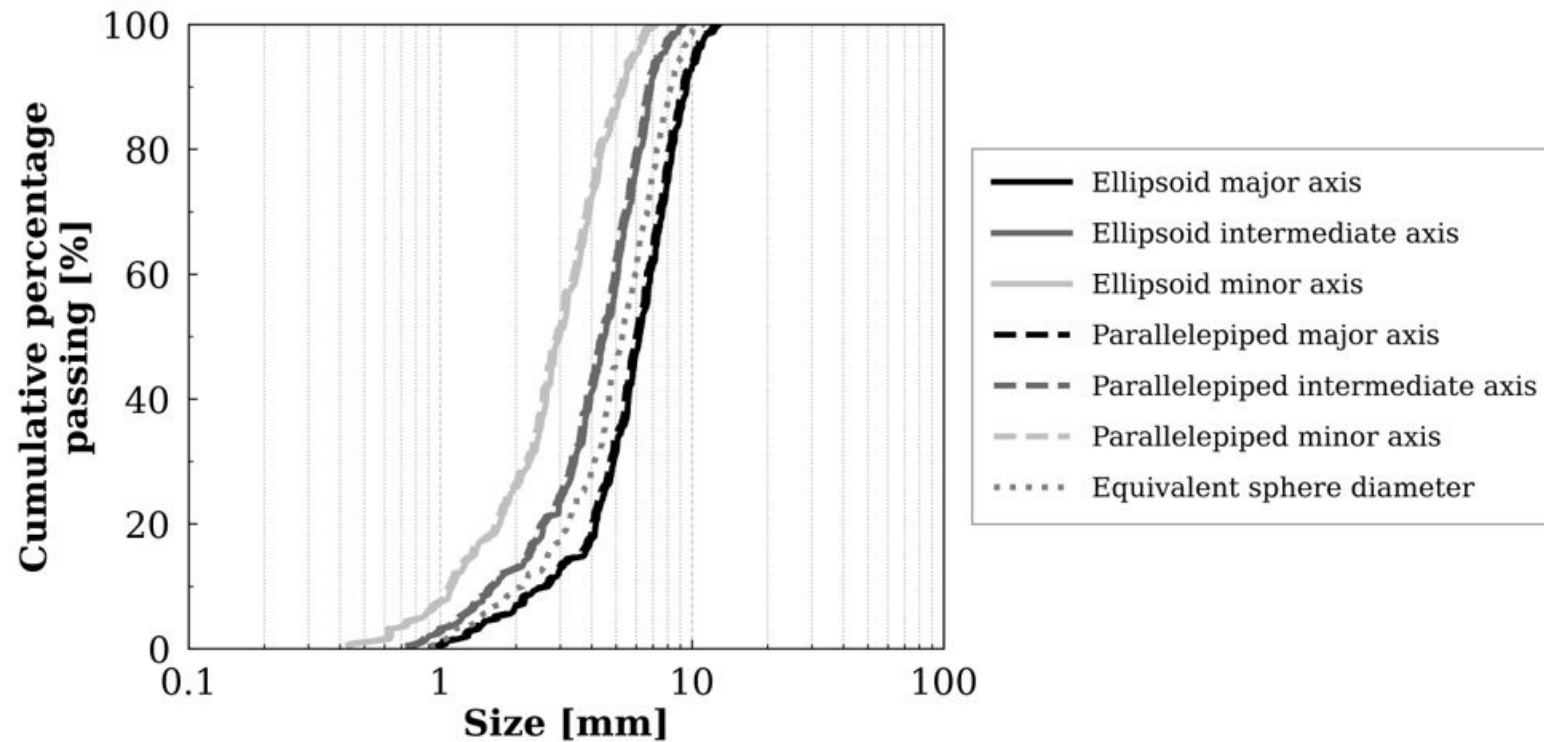
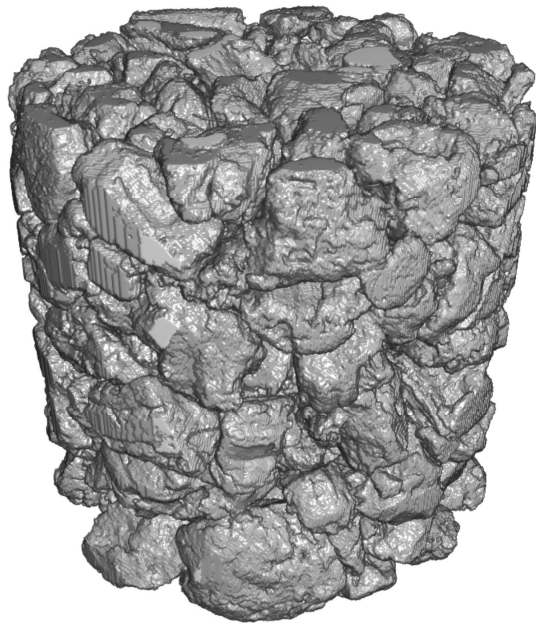
**Validation :**

- Pycnométrie solide :  $\rho = 365 \pm 26 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- [Glé et al., ICP 2021] :  $\rho = [286-330] \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

→ Large variabilité  
 → Lien masse volumique - taille des particules

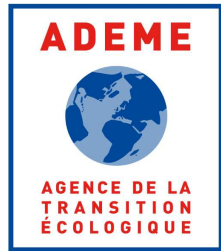


# Application à la moelle de tournesol

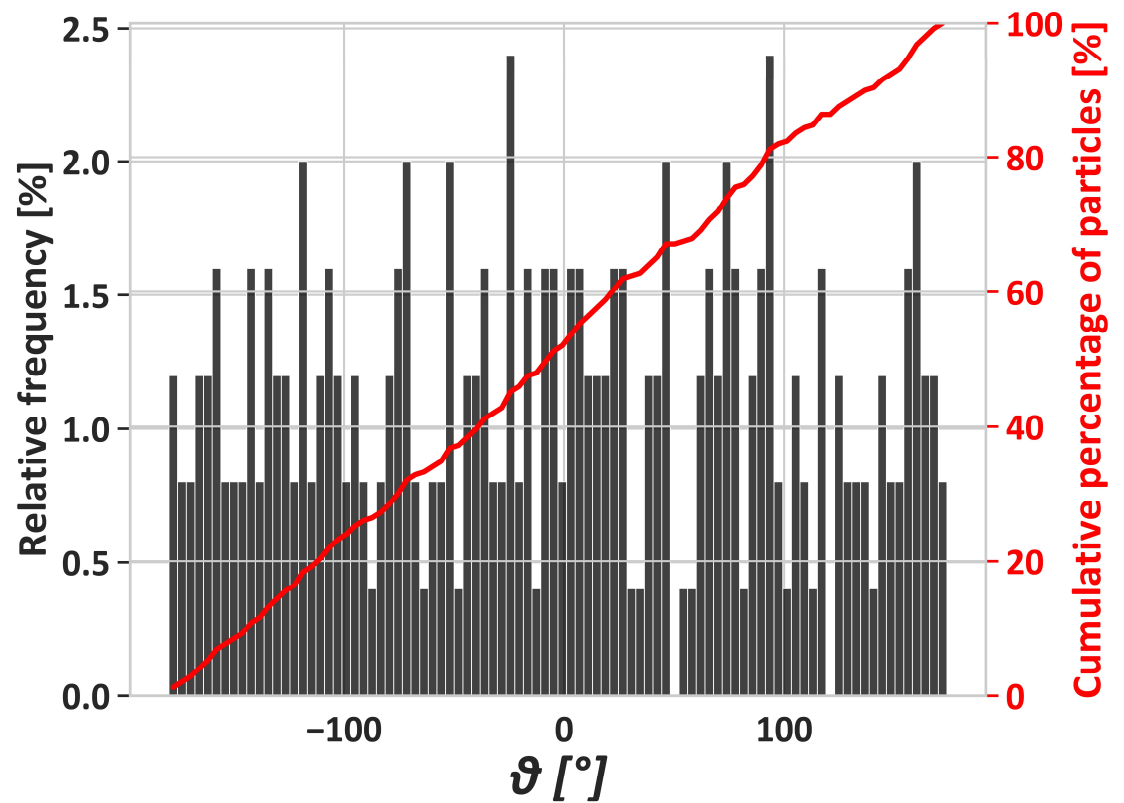
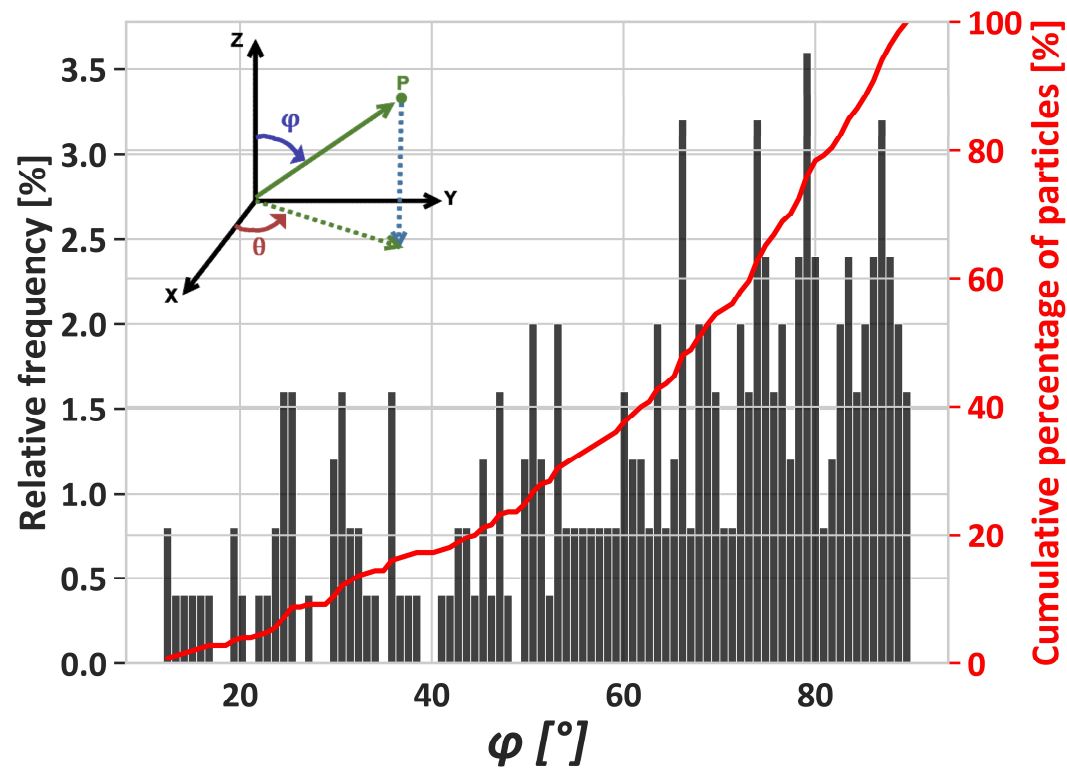


- Besoin de la 3D pour mesure de petit axe, le diamètre équivalent de la sphère est insuffisant
- Perspective : comparaison à des mesures 2D



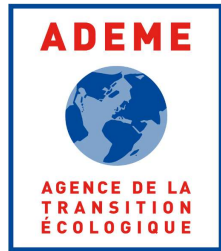


# Application à la moelle de tournesol

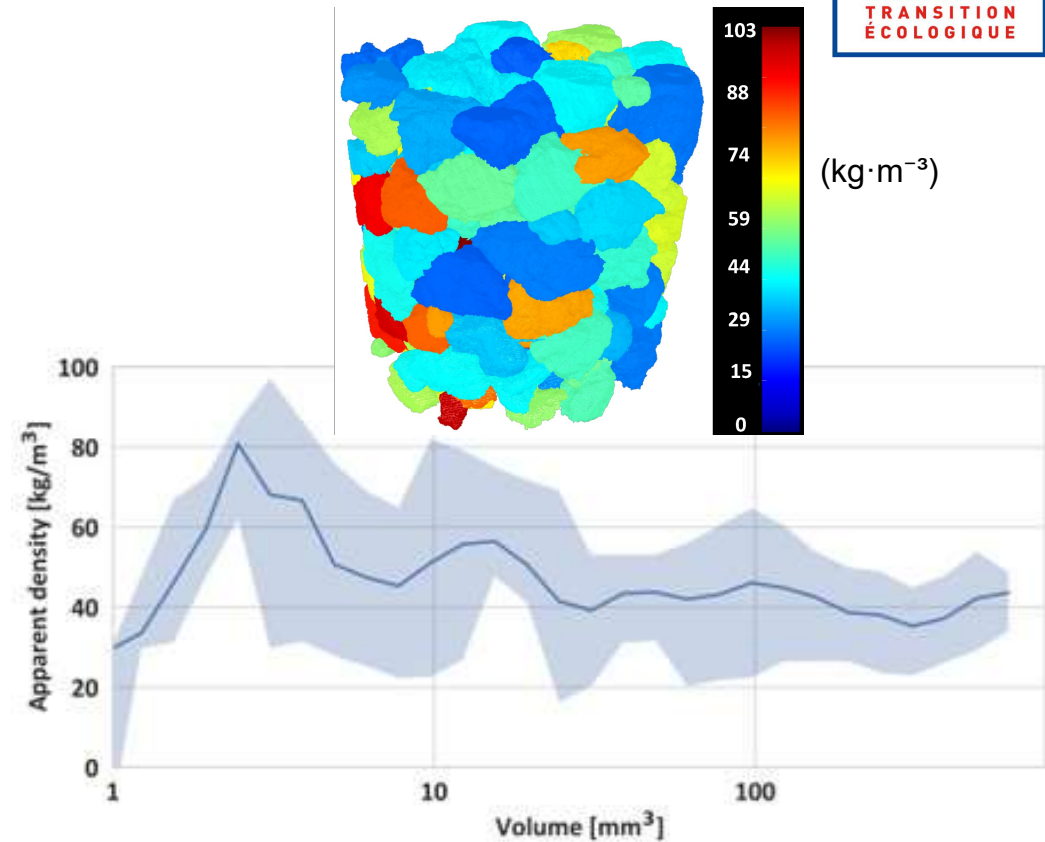
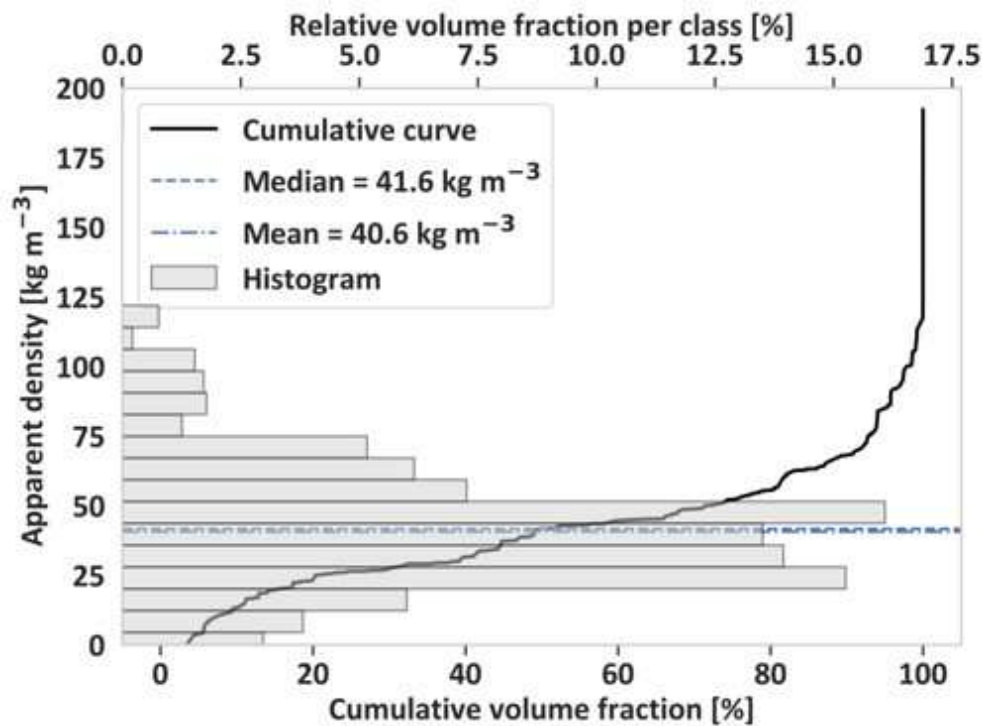


- Anisotropie : orientation préférentielle de 90° par rapport à la verticale
- Moins prononcée que pour la chènevotte





# Application à la moelle de tournesol



→ La tendance observée pour les petites particules est opposée à celle observée pour la chènevotte.



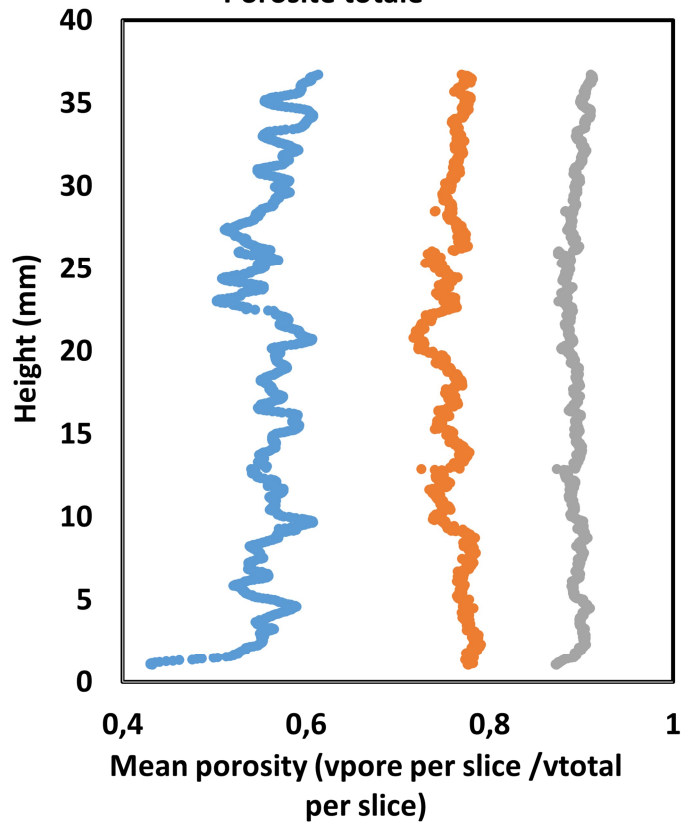


## Porosité et masses volumiques locales



# Etat vrac : porosité totale

- Porosité inter-particule
- Porosité intra-particule
- Porosité totale



- Calcul de la **porosité intra-particule à partir des masses volumiques particulières apparentes**

- Pour chaque tranche, porosité moyenne :

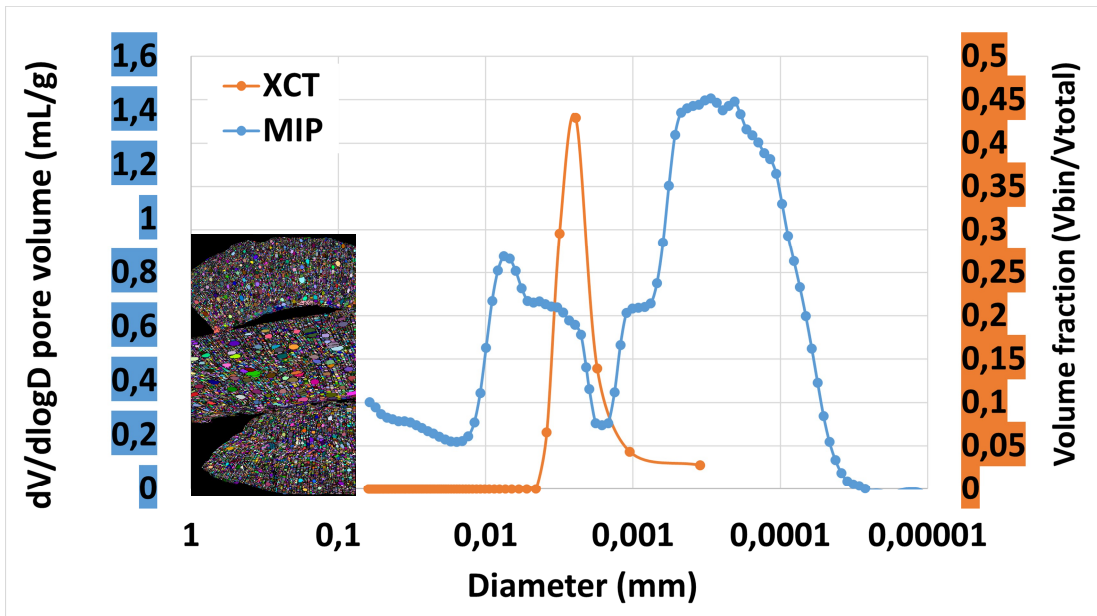
$$\Phi_{\text{intra}} = 1 - (\rho_{\text{app}} / \rho_{\text{squelette}})$$

$$\Phi_{\text{inter}} = V_{\text{pore/slice}} / V_{\text{total/slice}}$$

Porosité inter-particules: 56 %  
 Porosité intra-particules: 76 %  
 Porosité totale: 89 %

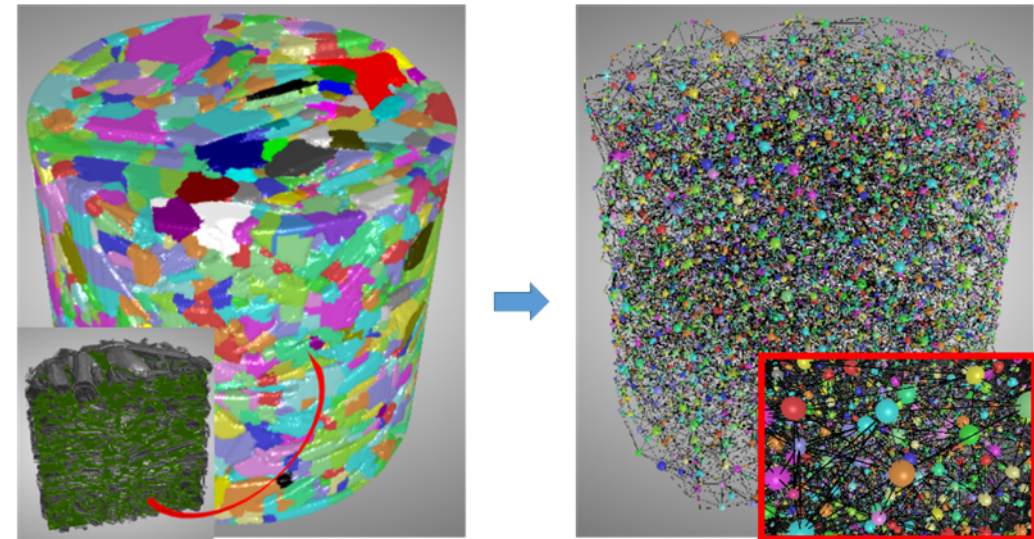
# Autres caractérisations de la porosité

## Intra-porosité

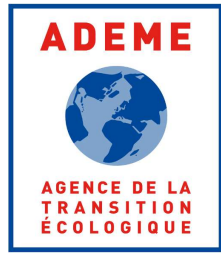


MIP: effet ink-bottle

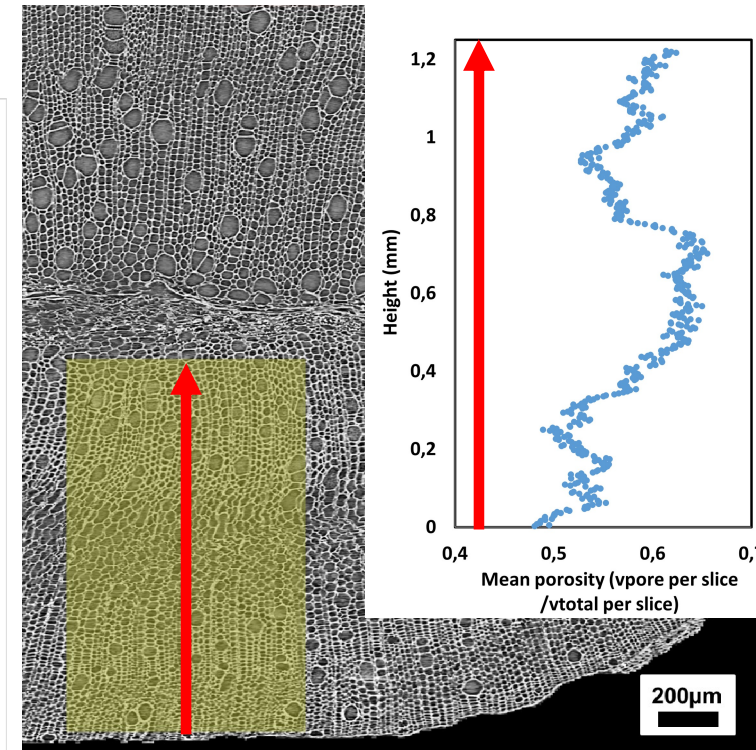
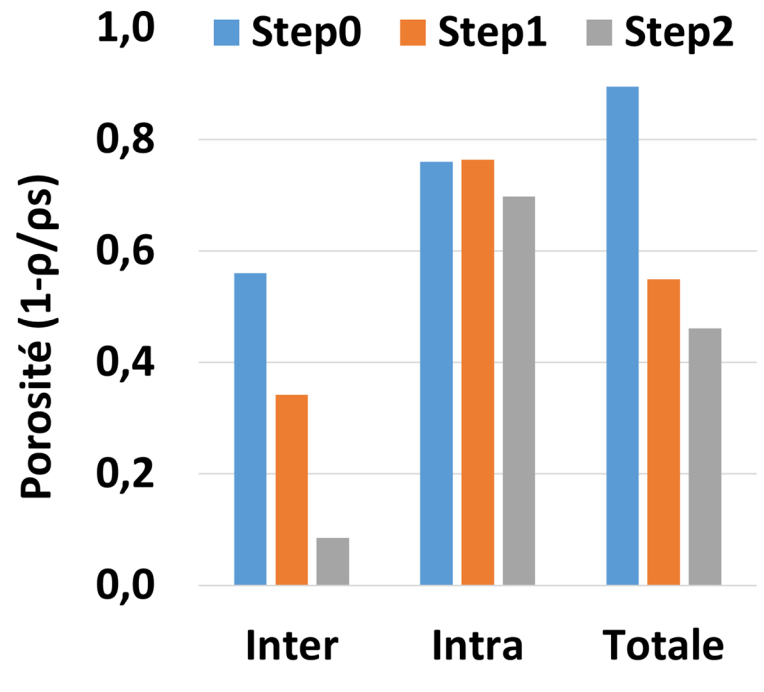
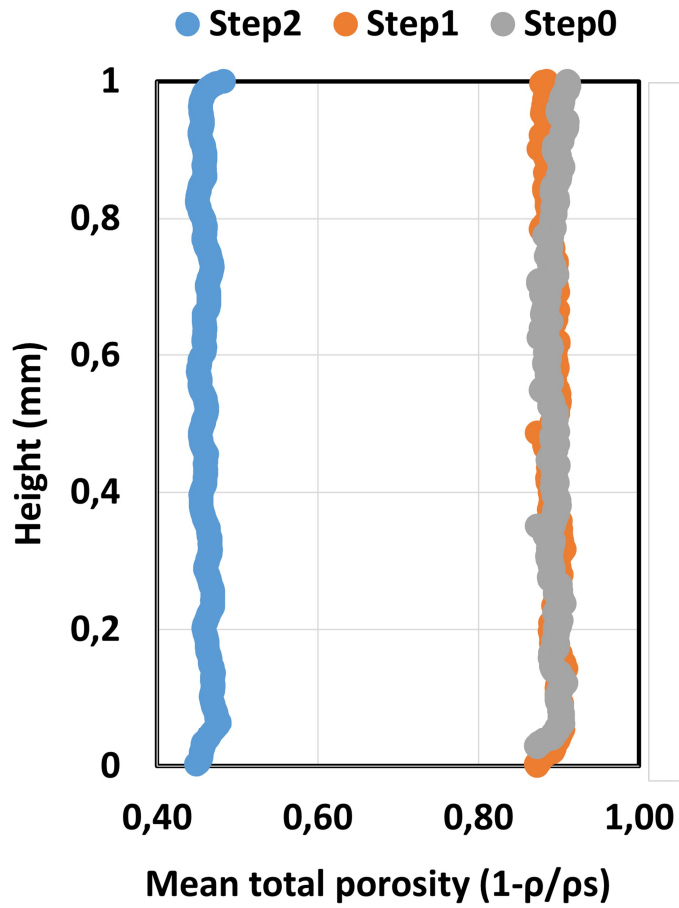
## Inter-porosité



Modélisation du volume poreux inter-particules en réseau poreux (OpenPNM et PoreSpy)  
 → **Diamètres équivalents, connectivité**



# Evolution avec la compression : porosité totale

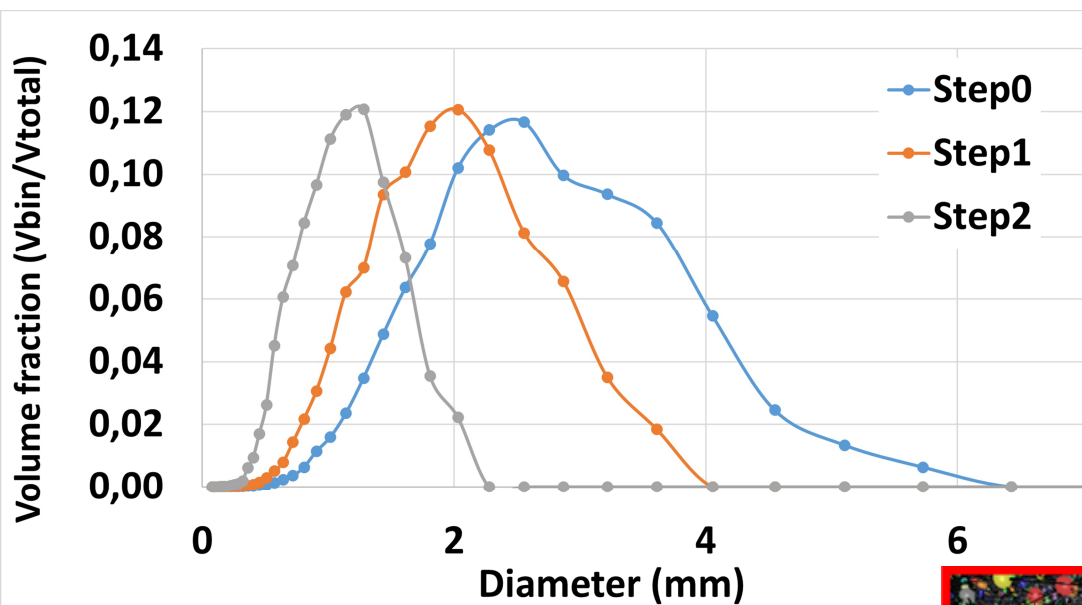


Évolution de la porosité intra-particule: exemple 1 particule

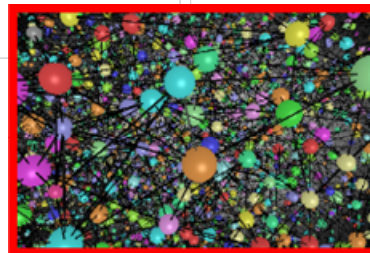
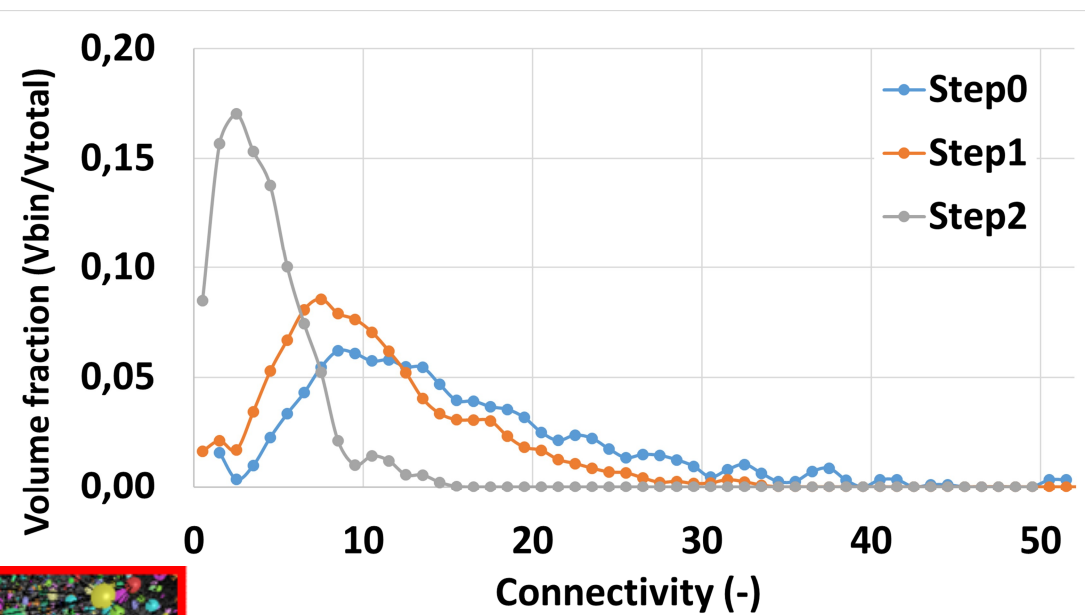


# Evolution avec la compression : inter-porosité

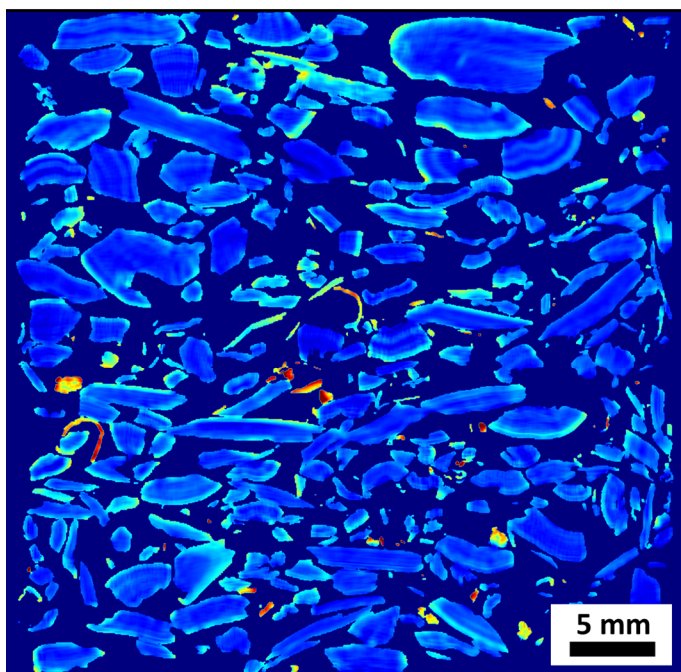
Diamètre équivalent



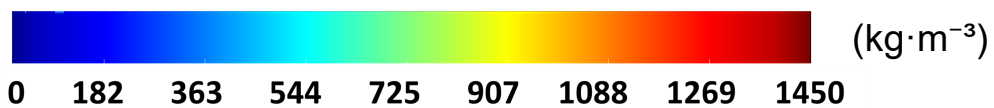
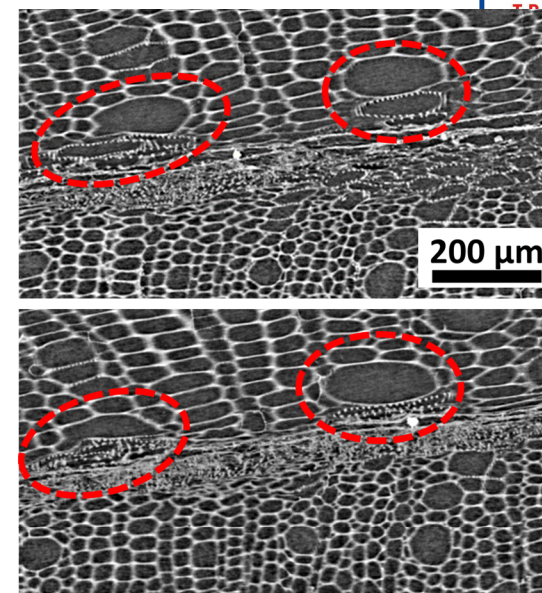
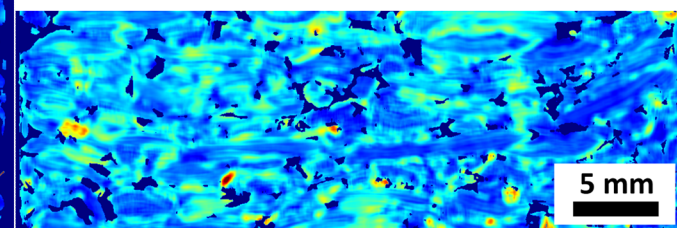
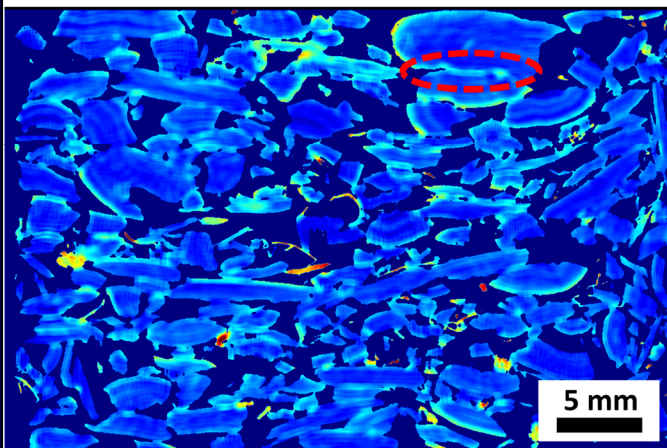
Nombre de pores connectés à chaque pore



# Masses volumiques locales

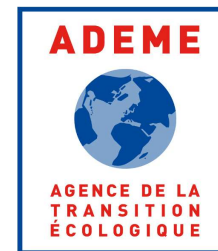


→ Hétérogénéité locale  
 → Densification des contacts



⚠ Résolution ≠ échelle calibration  
 → incertitudes



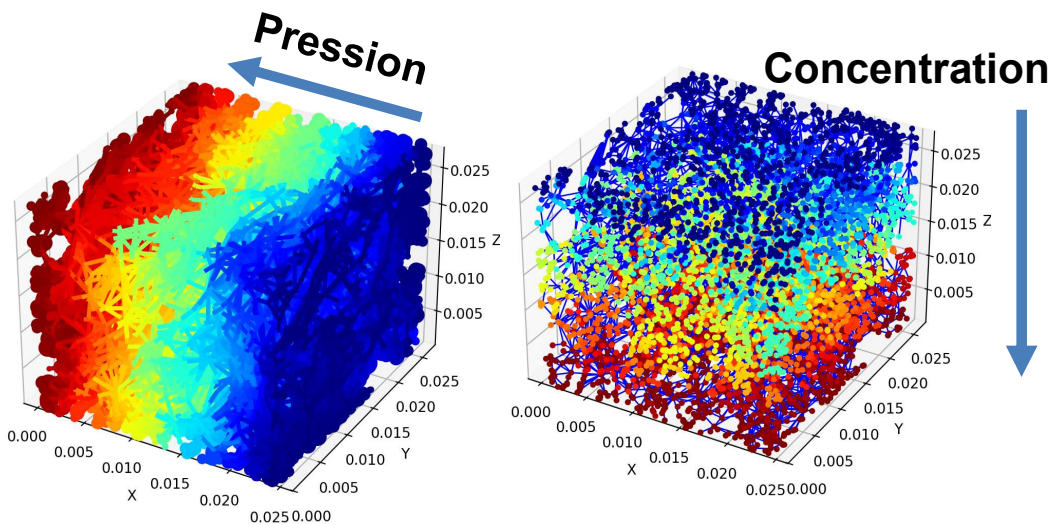
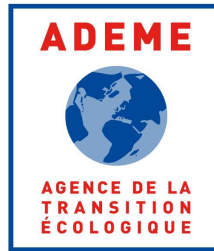


## Caractérisations numériques : propriétés de transport





# Propriétés acoustiques



Écoulement digital en 3D: Stokes flow et Fickian diffusion

- Tortuosity

$$\tau = \frac{D_{AB}}{D_{eff}}$$

$D_{AB}$ : diffusion coefficient in a direct path,  
 $D_{eff}$ : effective diffusion coefficient

- Airflow resistivity

$$\sigma = \frac{\mu}{k}$$

$\mu$ : air dynamic viscosity,  $k$ : permeability

- Thermal characteristic length

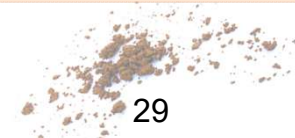
$$\Lambda' = 2 \frac{\int_{V_f} dV}{\int_{\delta\Omega} d\Omega'}$$

$dV$ : volume of the fluid,  $\delta\Omega$ : fluid – solid wet surface

- Viscous characteristic length

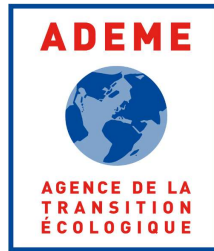
$$\Lambda = 2 \frac{\int_{V_f} |v|^2 dV}{\int_{\delta\Omega} |v(\delta\Omega_{fs})|^2 d\Omega'}$$

$\delta\Omega_{fs}$ : fluid – solid interface,  $v$ : fluid velocity

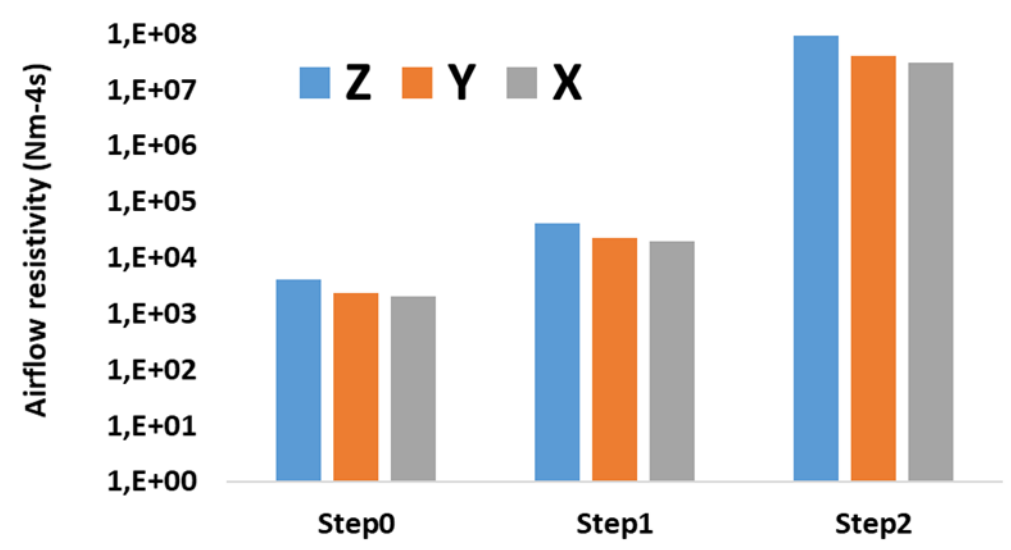
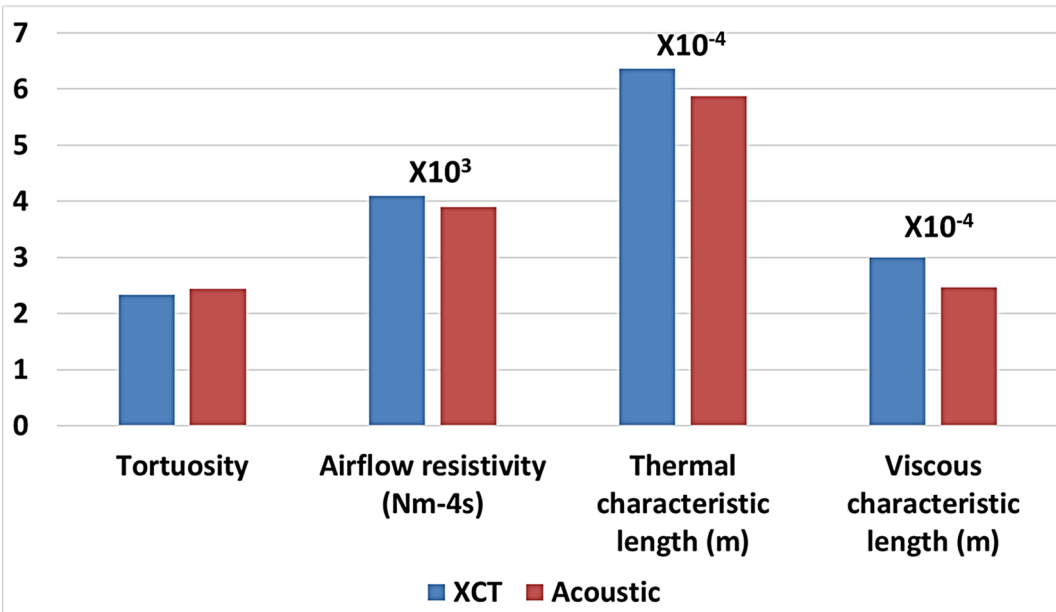




# Propriétés acoustiques



Paramètres essentiels pour le calcul de l'absorption acoustique, l'affaiblissement acoustique, et l'impédance acoustique en utilisant le modèle « Johnson-Champoux-Allard-Lafarge »

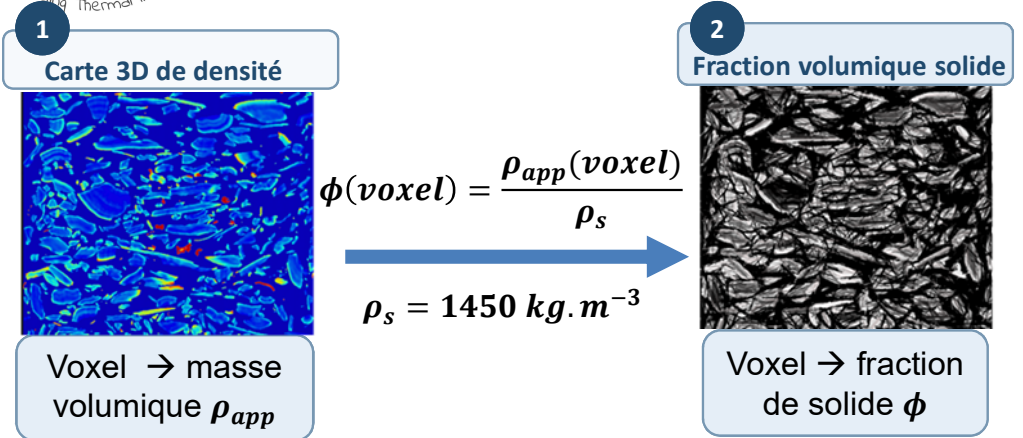
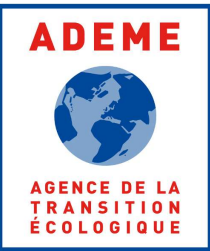


Comparaison avec mesures au laboratoire à l'état vrac (direction Z)

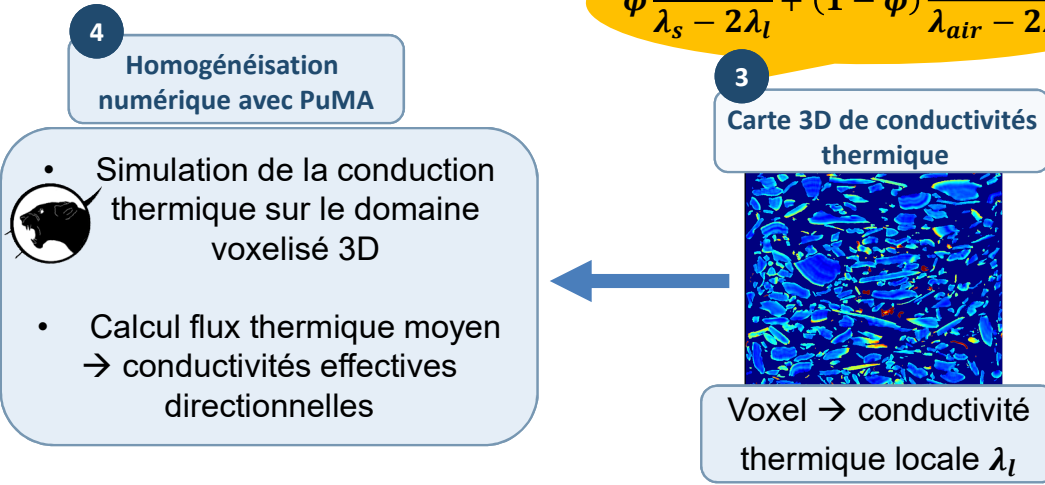
Calcul pour les directions X, Y, Z et à l'état comprimé



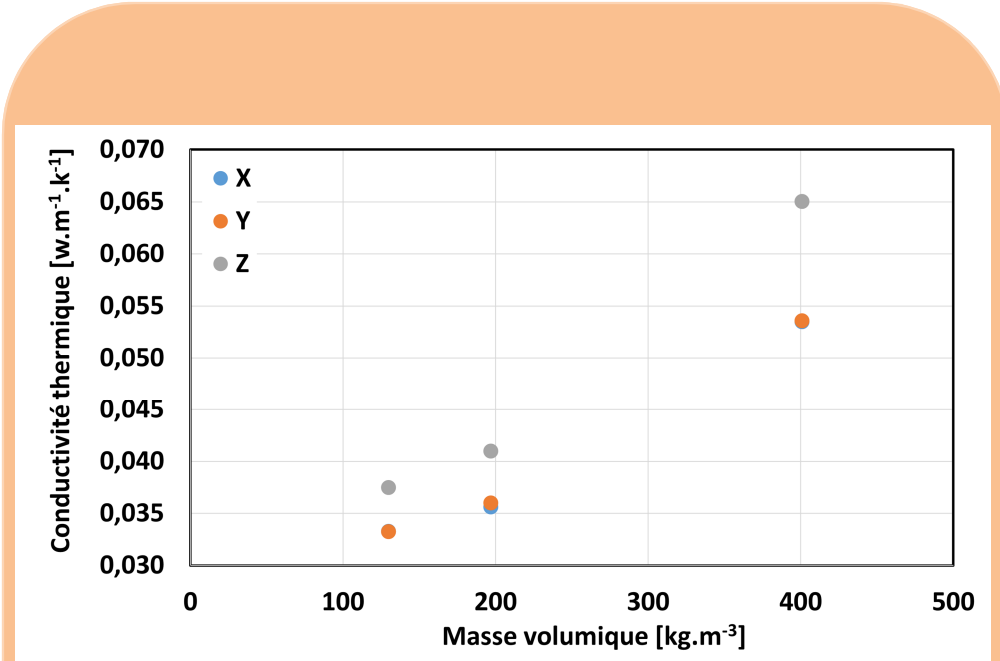
# Conductivité thermique



$$\phi \frac{\lambda_s - \lambda_l}{\lambda_s - 2\lambda_l} + (1 - \phi) \frac{\lambda_{air} - \lambda_l}{\lambda_{air} - 2\lambda_l} = 0$$



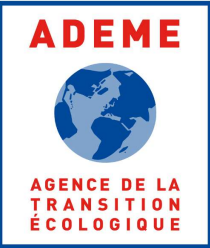
## Résultats



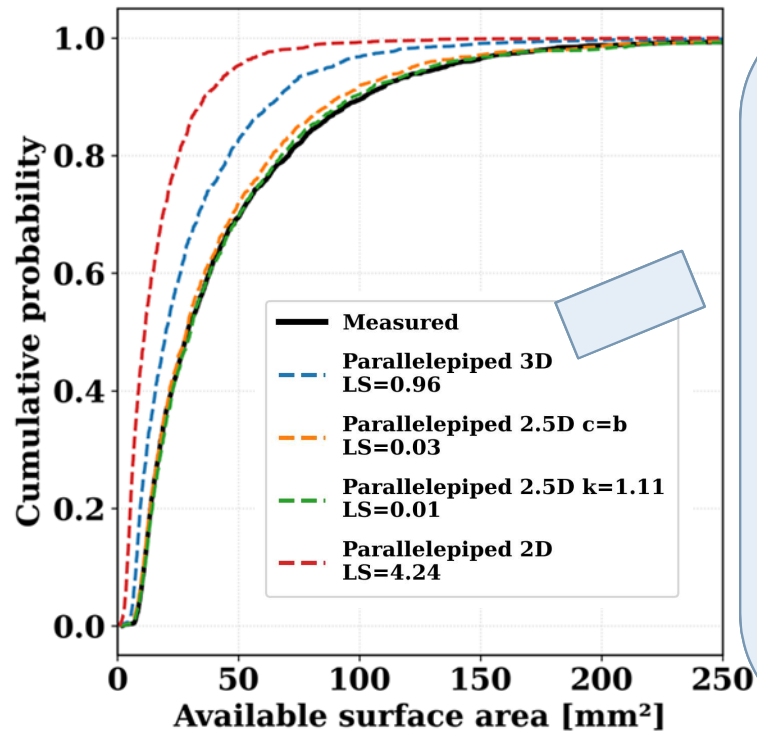
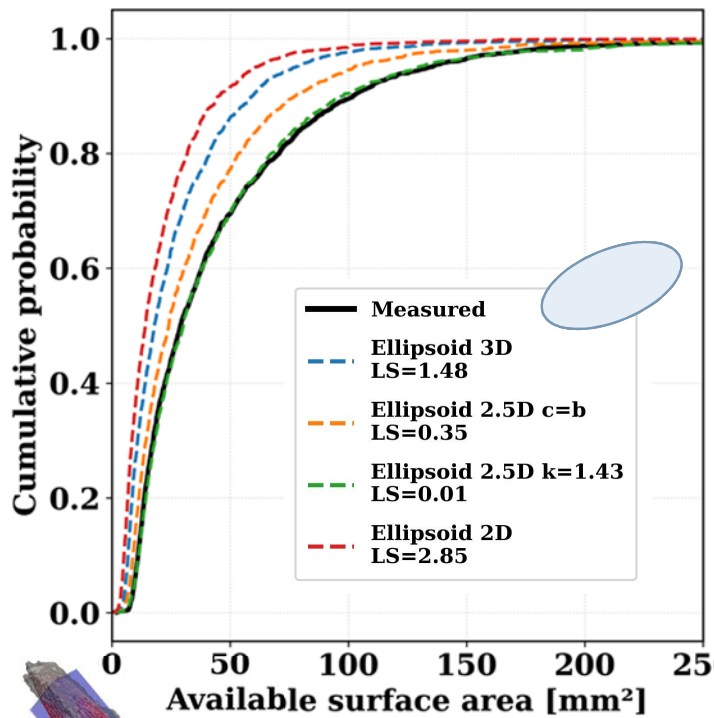


## Passage aux mélanges avec liant

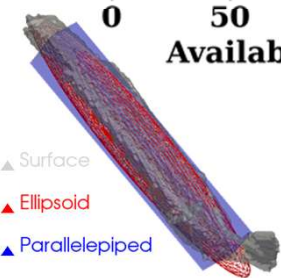




# Surface disponible pour liant : chènevotte

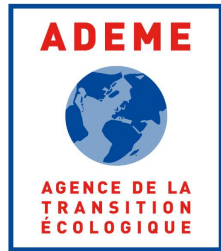


- Pour **estimer la quantité de liant nécessaire** pour enrober les particules
- Une **représentation simplifiée** basée sur les 2 dimensions principales peut fournir une **bonne approximation de la surface cumulée des particules**
- **Parallélépipède + 2.5D =** meilleure approximation de la surface disponible

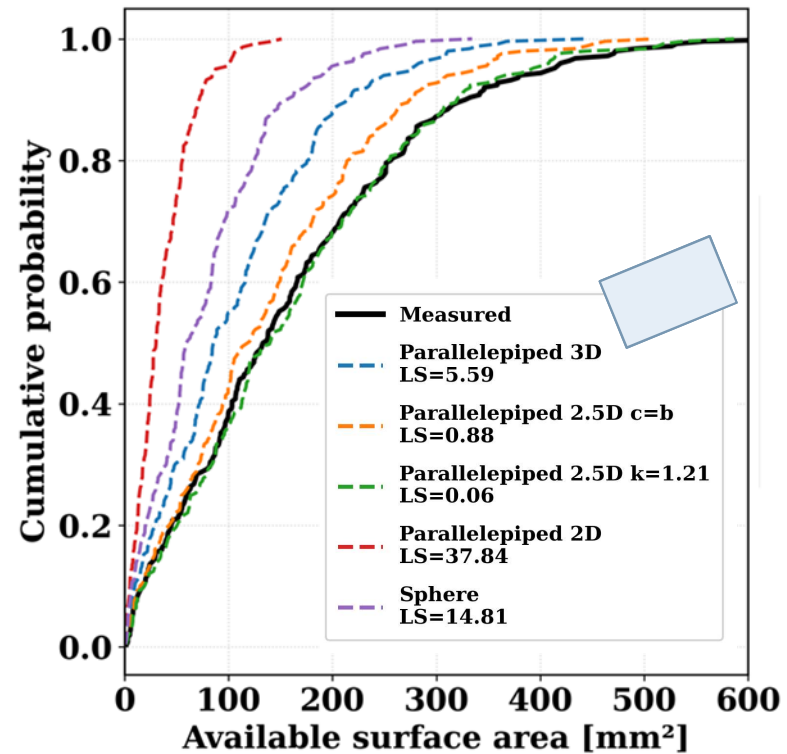
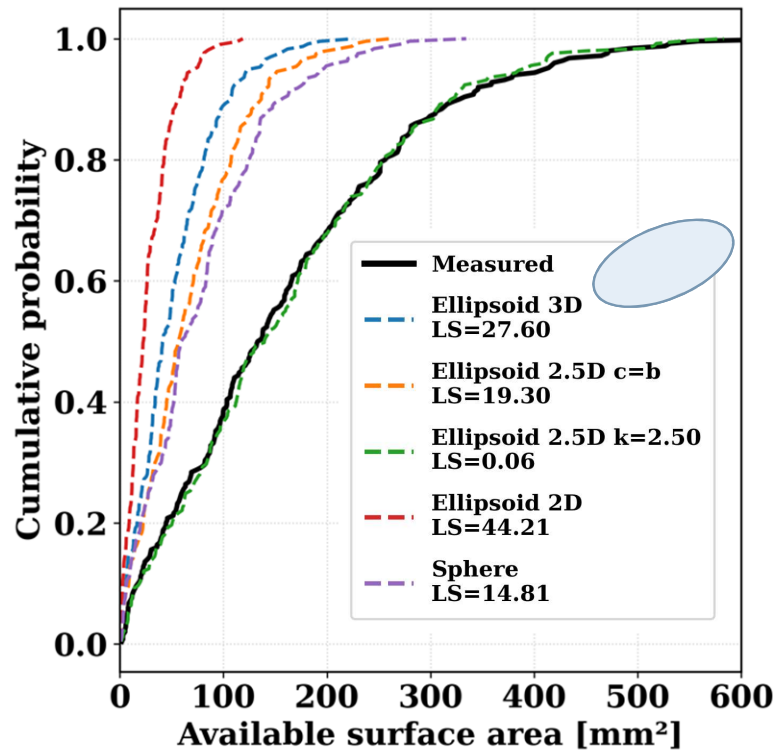


**Surface disponible = surface totale – surface de contact**





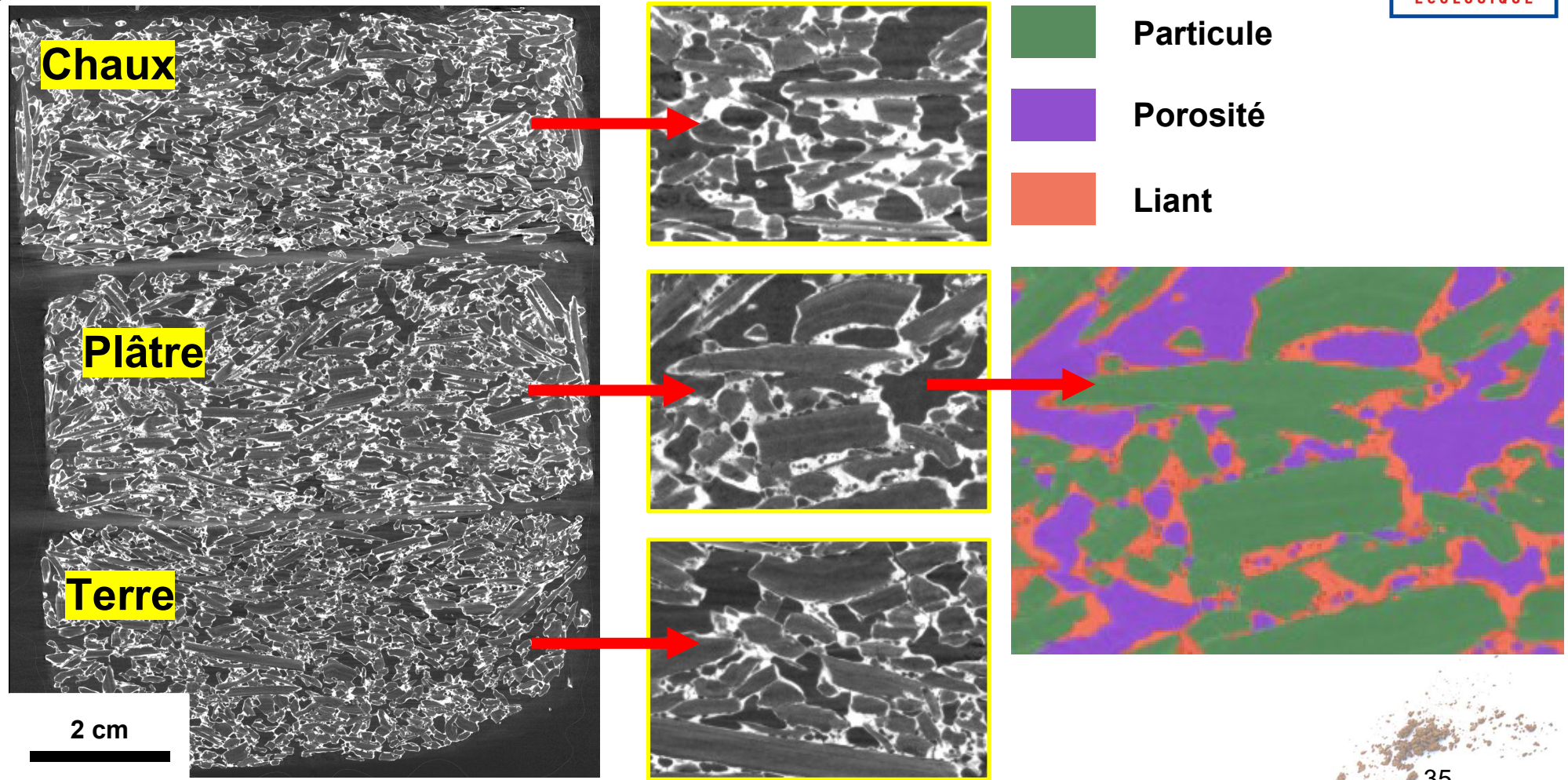
# Surface disponible pour liant : moelle

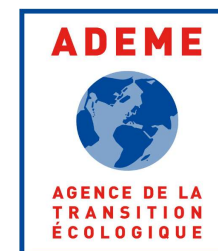


- **Parallélépipède + 2.5D** = bonne approximation de la surface disponible
- Surface disponible moelle = 0,5 x surface disponible chènevotte

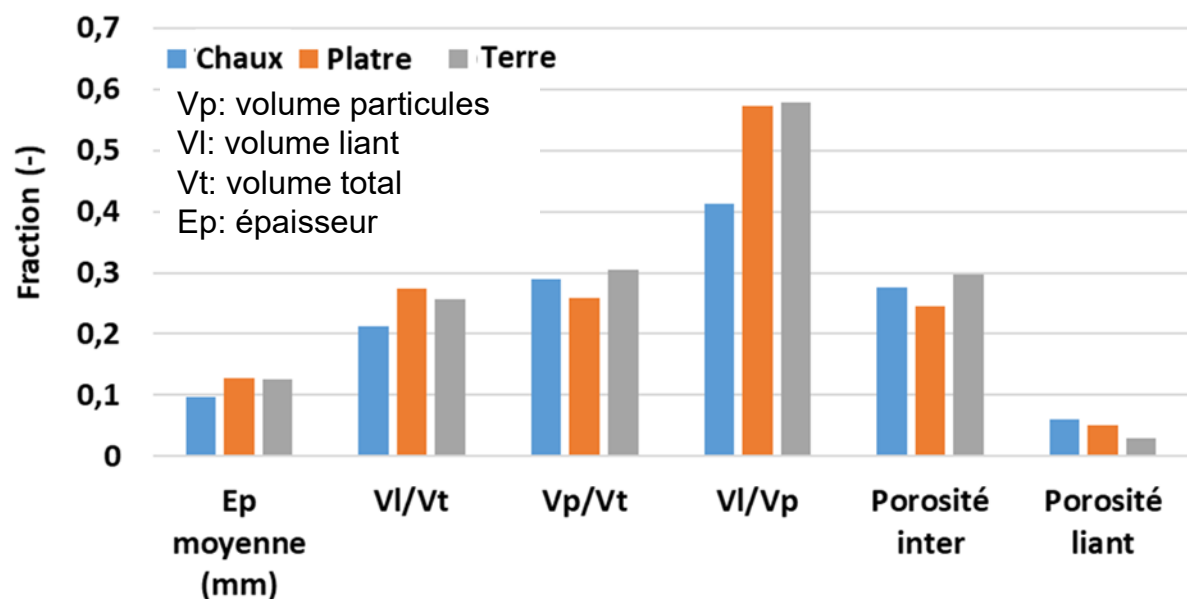


# Echantillons avec liant : résultats préliminaires

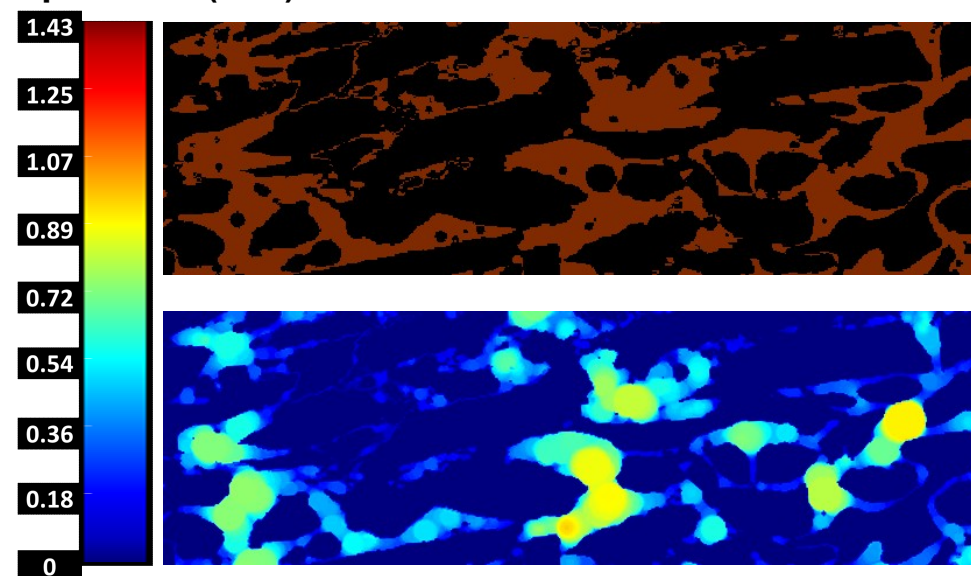




# Echantillons avec liant : résultats préliminaires



Épaisseur (mm)

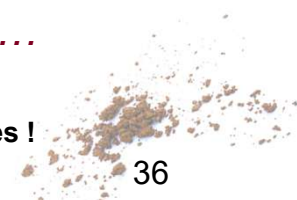


- Épaisseur moyenne plus importante pour la chaux et le plâtre par rapport à la terre
- Porosité liant plus importante pour la terre et le plâtre par rapport à la chaux

... Distribution de la porosité intra- et inter-liant, épaisseur locale, connectivité ...

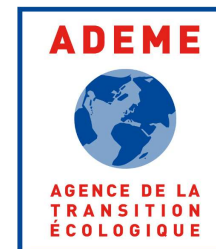


Résultats à confirmer avec d'autres images !





## Conclusion et perspectives



- Développement d'une méthodologie de caractérisation quantitative 3D d'empilements granulaires
- Analyse statistique microstructurale à l'état vrac, base de données : morphologie, orientation, masse volumique / porosité ... → anisotropie, variabilité
- Effet de la compaction sur les porosités / densités
- Estimation numérique de propriétés acoustiques et thermiques de l'empilement
- Informations pour formuler les mélanges avec liant  
→ estimation de la surface disponible à partir des dimensions 2D



*Alimentation de modèles de comportement*

*... Bientôt 2 articles (méthode et résultats chènevotte)*

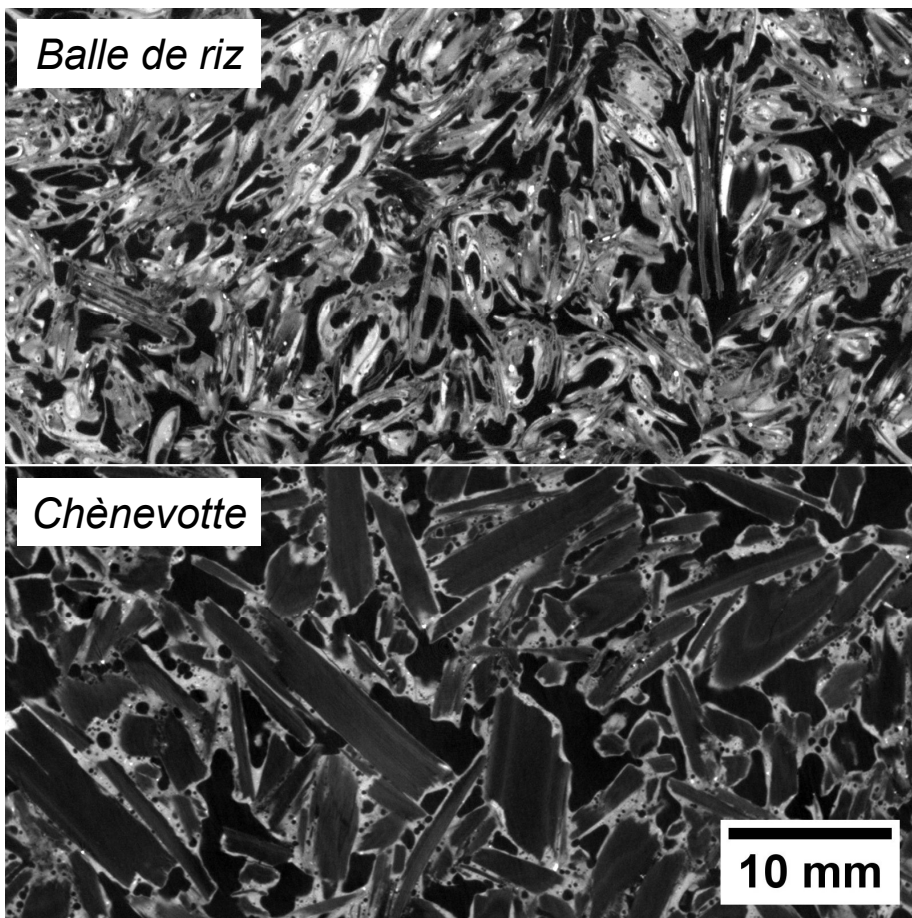
*... En cours d'analyse : moelle et roseau → étude comparative ; haute résolution*

*... Perspectives : répartition de l'eau dans les échantillons humides ; autres particules ? ; caractérisation des échantillons avec liant*



## Conclusion et perspectives

Plâtre + ...



- Effet du type de liant pour un granulat donné sur les caractéristiques [granulats, liant, porosité] ? Et réciproquement ?
- Evolution des propriétés des constituants liée à l'interaction liant/granulat ?
- Corrélation/extrapolation des propriétés des particules seules aux mélanges avec liant ?



*Stratégie de modélisation et formulation allant du vrac au mélange avec liant, pour éviter une caractérisation 3D systématique*





Merci de votre attention !

