

# 5<sup>ème</sup> Ecole d'automne du GDR MBS

## *Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie*

12 au 16 octobre 2025, Douai



## Tomographie

*Camille Chateau (ENPC) & Vincent Dubois (UArtois)*



Laboratoire  
de Génie Civil  
et géo-Environnement



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
Liberté  
Égalité  
Fraternité



**GdR MBS**  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS





**GdR MBS**

MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Ecole d'automne 2025  
Douai, 12 au 16 octobre 2025

# Introduction

---



**Comment définiriez-vous la matière ?**



## Matière vivante



Principalement  
carbone, oxygène,  
hydrogène, azote

## Matière non vivante





# 118 éléments chimiques

10 millions de composés organiques connus  
400 000 composés inorganiques

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe I A 1 18

Période

1 Hydrogène 1 H 4.002602 Hélio 2 He

2 Lithium 3 Li 6,939 Bérium 4 Be 9,012183

3 Sodium 11 Na 22,98976923 Magnésium 12 Mg 24,305

4 Potassium 19 K 39,0983(1) Calcium 20 Ca 40,078(4)

5 Rubidium 37 Rb 85,4678(3) Strontium 38 Sr 87,62(1)

6 Césium 55 Cs 132,9054(2) Baryum 56 Ba 137,327(7)

7 Francium 87 Fr [223] Radium 88 Ra [226]

100 éléments les plus abondants dans la croûte terrestre

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)

numéro atomique

symbole chimique

masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)

(© ICAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015)

Tableau périodique des éléments chimiques

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

I A II A III A IV A V A VI A VII A VIII I B II B III B IV B V B VI B VII B

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Hydrogène 1 H 4.002602 Hélio 2 He

Lithium 3 Li 6,939 Bérium 4 Be 9,012183

Sodium 11 Na 22,98976923 Magnésium 12 Mg 24,305

Potassium 19 K 39,0983(1) Calcium 20 Ca 40,078(4)

Rubidium 37 Rb 85,4678(3) Strontium 38 Sr 87,62(1)

Césium 55 Cs 132,9054(2) Baryum 56 Ba 137,327(7)

Francium 87 Fr [223] Radium 88 Ra [226]

Scandium 21 Sc 44,955908(6) Titane 22 Ti 47,867(1) Vanadium 23 V 50,9415(1) Chrome 24 Cr 51,9961(6) Manganèse 25 Mn 54,938044(7) Fer 26 Fe 55,845(2) Cobalt 27 Co 58,933194 Nickel 28 Ni 58,6934(4) Cuivre 29 Cu 63,546(3) Zinc 30 Zn 65,38(2) Gallium 31 Ga 69,723(1) Germanium 32 Ge 72,630(8) Arsenic 33 As 74,921595 Sélénium 34 Se 78,971(8) Brome 35 Br 79,904(1) Krypton 36 Kr 83,798(2)

Yttrium 39 Y 88,90584 Zirconium 40 Zr 91,224(2) Niobium 41 Nb 92,90637 Molybdène 42 Mo 95,95(1) Technétium 43 Tc [98] Ruthénium 44 Ru 101,07(2) Rhodium 45 Rh 102,90550 Palladium 46 Pd 106,42(1) Argent 47 Ag 107,8682(2) Cadmium 48 Cd 112,414(4) Indium 49 In 114,818(1) Étain 50 Sn 118,710(7) Antimoine 51 Sb 121,760(1) Tellure 52 Te 127,60(3) Iode 53 I 126,90447(8) Xénon 54 Xe 131,29(8)

Hafnium 72 Hf 178,49(2) Tantalum 73 Ta 180,94788 Tungstène 74 W 183,84(1) Rénium 75 Re 186,207(1) Osmium 76 Os 190,23(3) Iridium 77 Ir 192,217(3) Platine 78 Pt 195,084(8) Or 79 Au 196,966569 Mercure 80 Hg 200,592(3) Thallium 81 Tl 204,383(5) Plomb 82 Pb 207,2(1) Bismuth 83 Bi 208,98040 Polonium 84 Po [209] Astatine 85 At [210] Radon 86 Rn [222]

Lanthane 57 La 138,90547 Cérium 58 Ce 140,116(1) Praseodyme 59 Pr 140,90766 Néodyme 60 Nd 144,242(8) Prométhium 61 Pm [145] Samarium 62 Sm 150,36(2) Europium 63 Eu 151,964(1) Gadolinium 64 Gd 157,25(9) Terbium 65 Tb 158,92535 Dysprosium 66 Dy 162,500(1) Holmium 67 Ho 164,93033 Érbium 68 Er 167,259(9) Thulium 69 Tm 168,93422 Ytterbium 70 Yb 173,045(1) Lutécium 71 Lu 174,9668

Actinium 89 Ac [227] Thorium 90 Th 232,0377 Protactinium 91 Pa 231,03588 Uranium 92 U 238,02891 Néptunium 93 Np [237] Plutonium 94 Pu [244] Américium 95 Am [243] Curium 96 Cm [247] Bérkélium 97 Bk [247] Californium 98 Cf [251] Einsteinium 99 Es [252] Fermium 100 Fm [257] Mendelevium 101 Md [258] Nobelium 102 No [259] Lawrencium 103 Lr [260]

Métaux

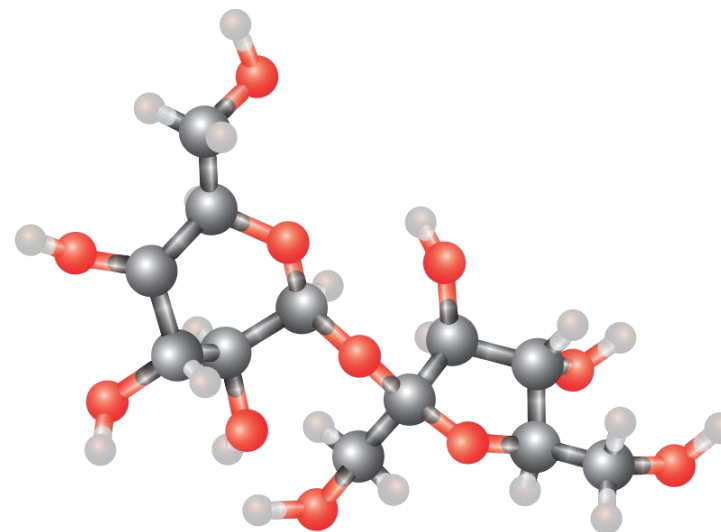
Non métaux

Alcalins Alcalino-terreux Lanthanides Actinides Métaux de transition Métaux pauvres Métalloïdes Autres non-métaux Halogènes Gaz nobles Non classés

primordial

intégration d'autres éléments

synthétique



L'Union internationale de chimie pure et appliquée définit la molécule comme « une entité électriquement neutre comprenant plus d'un atome » (DOI 10.1351/goldbook.M04002).



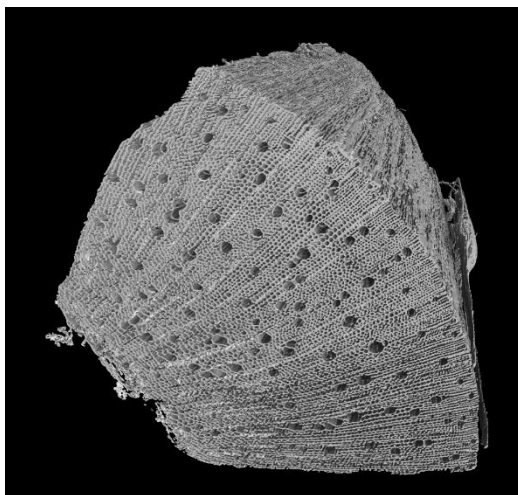
## FACTEURS DISTINGUANT UN COMPOSANT D'UN AUTRE OU UN ASSEMBLAGE D'UN AUTRE

### Matière seule (ex : chènevotte)

Composition élémentaire

Molécules / Structure chimique

Facteurs environnementaux  
(température, humidité,  
rayonnement solaire,  
nutriments...)



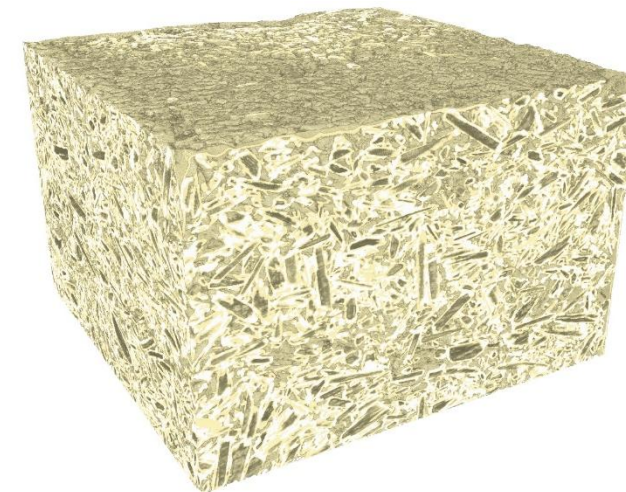
### Assemblage (ex : béton de chanvre)

Proportions entre chaque  
composant – Interactions  
chimiques

Interfaces

Fabrication : protocole de  
mélange, modalité  
d'utilisation (coulage,  
compactage, projection)

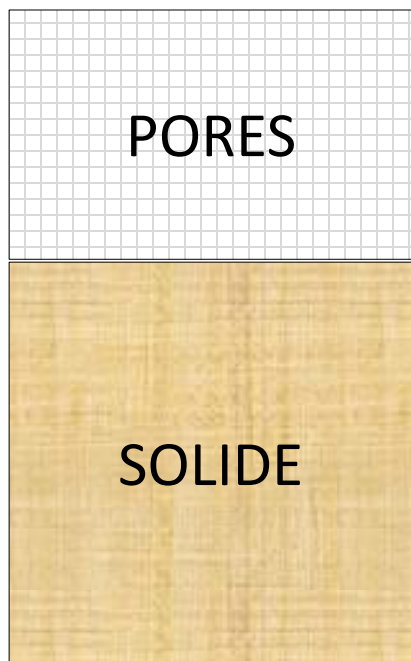
Conditions de cure



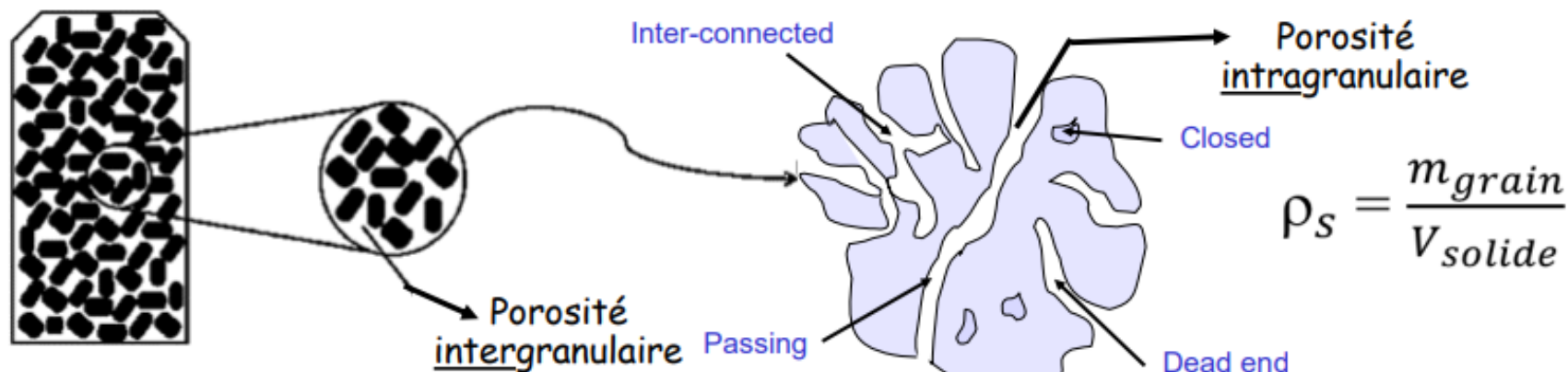
**Structure interne → Propriétés thermiques, hygriques, acoustiques, mécaniques<sup>6</sup>**



## STRUCTURE INTERNE

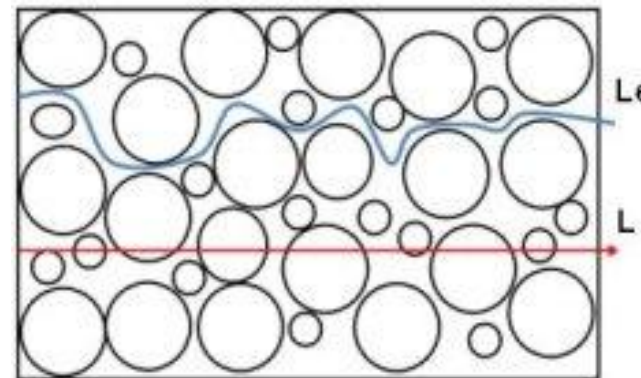


### Porosité



*Présentation d'Alain Celzard – Ecole d'Automne GdR 2024 – Introduction aux mesures de porosité et de surface spécifique*

Tortuosité =  $L_e / L$



Tortuosité – Rappels sur les milieux poreux et granulaires  
(<https://gpip.cnam.fr/>)

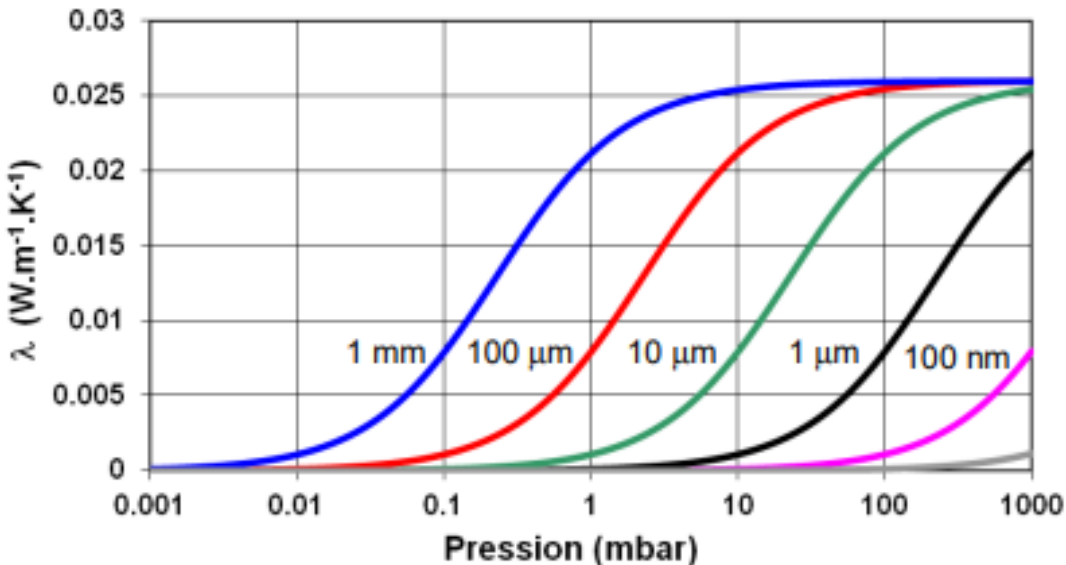


# PROPRIETES

## Influence de la porosité sur la conductivité thermique

Gamme de taille de pores ( $< 100 \mu\text{m}$ ) : convection négligeable

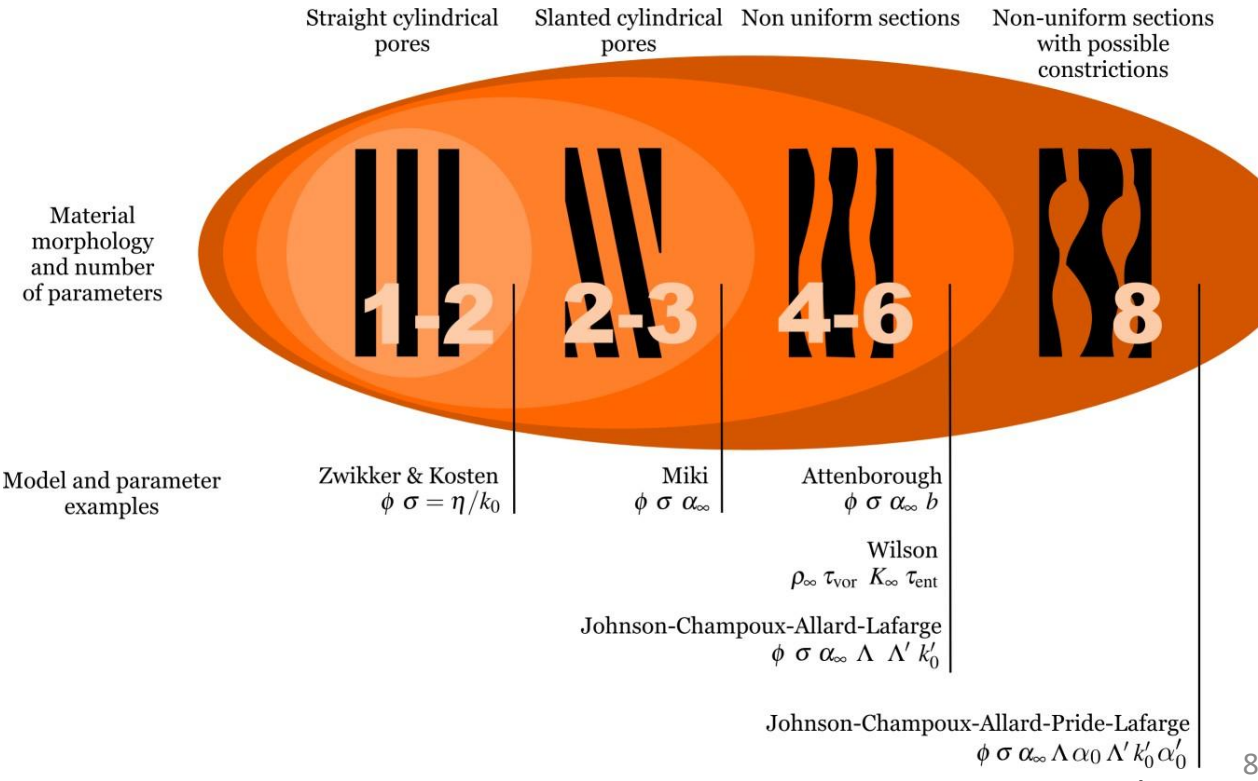
Effet Knudsen : la conductivité thermique dépend à la fois de la pression et de la dimension des pores considérés



[Degiovanni et Jannot 2013]

## Influence de la porosité sur le comportement acoustique

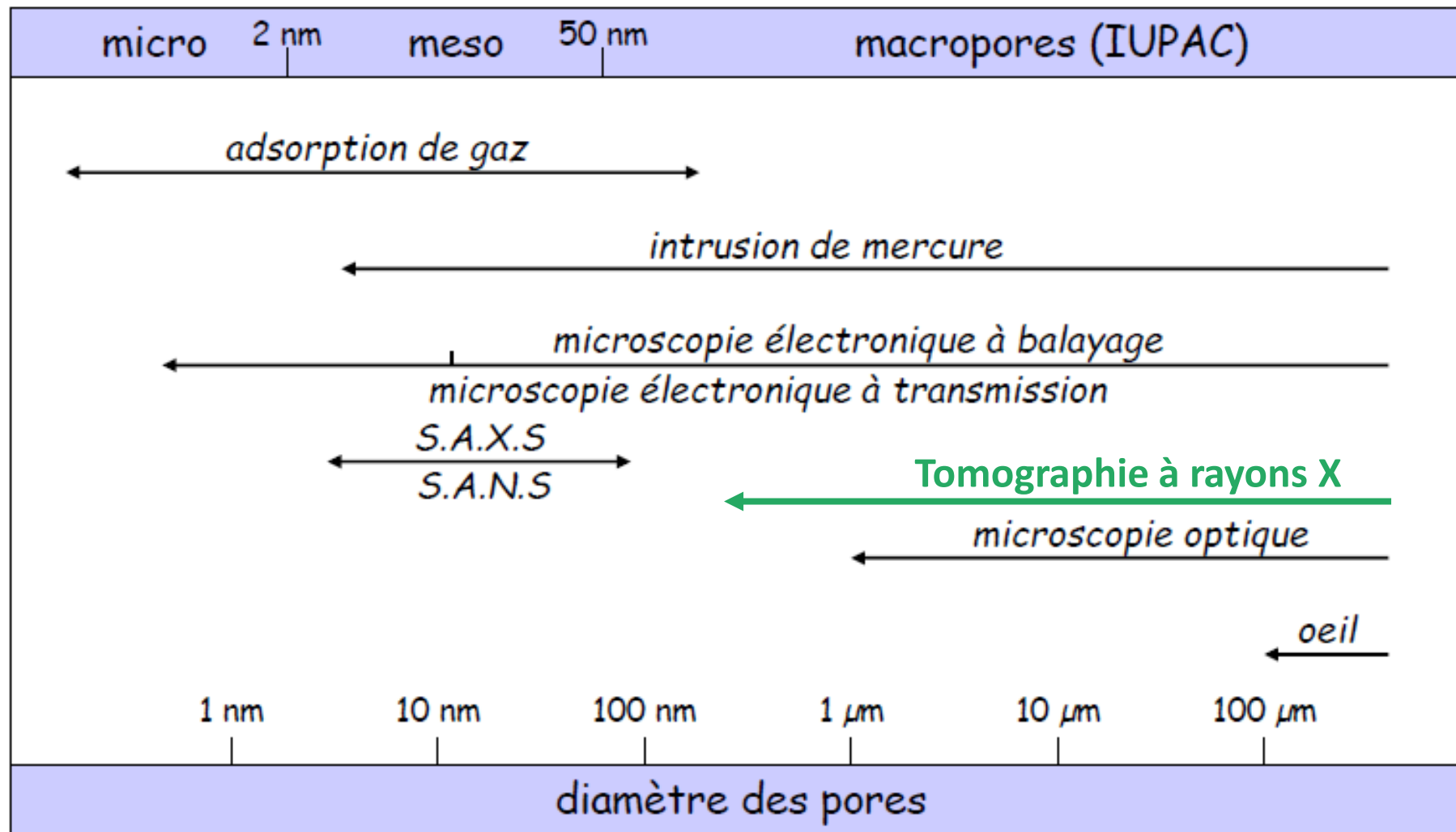
Modèle JCAL : comportement de dissipation de matériaux fibreux ou de matériaux avec des formes de pores arbitraires sans variations importantes de section de pores







## Positionnement de la tomographie par rapport à d'autres techniques



Non destructif  
Information volumique  
Peu de préparation échantillon



Acquisition longue  
Gros équipement + radiations  
Volume données  
Analyse lourde





- ❑ Principe et application de la tomographie aux matériaux
- ❑ Notions d'analyse d'images
- ❑ Deux exemples d'application aux matériaux biosourcés



# Principes et applications de la tomographie aux matériaux

---



# Tomographie

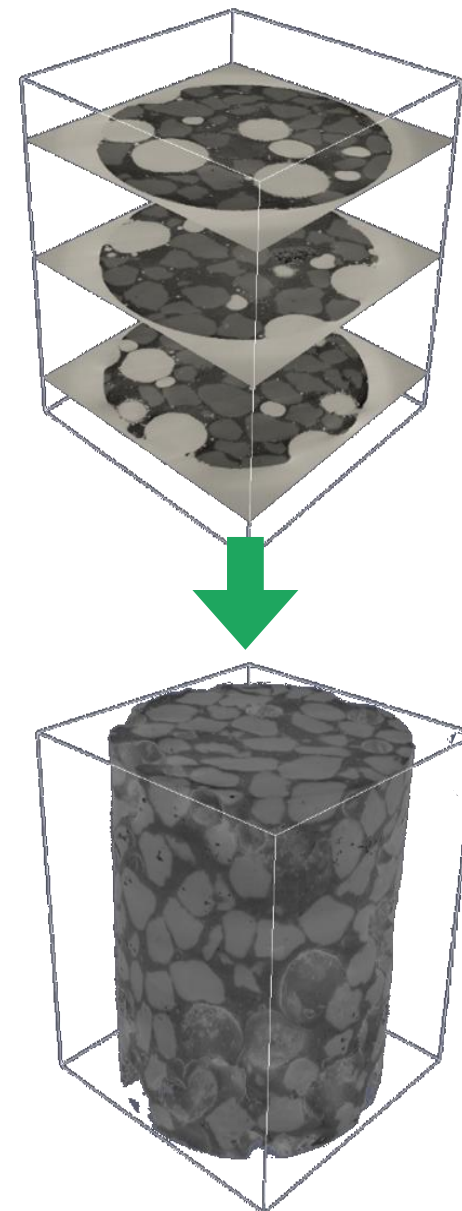
***Tomo-*** :

provenant du verbe grec temnein, qui signifie « couper ».

***-graphie*** :

qui désigne l'écriture ou la représentation graphique.

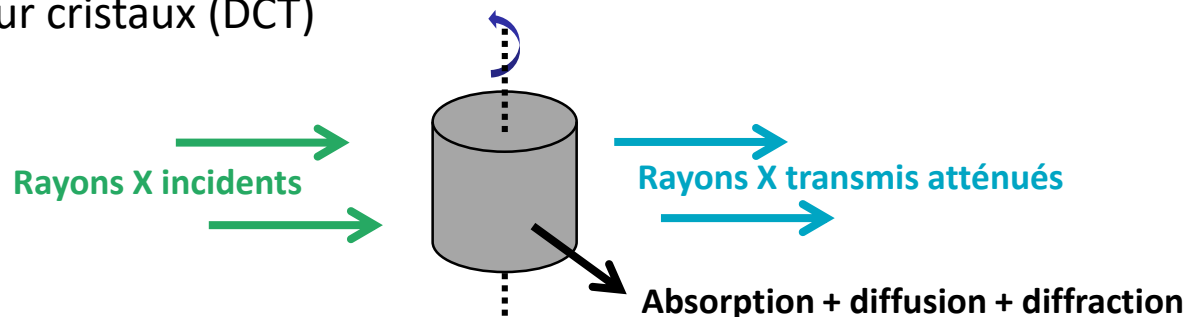
- **Procédé d'imagerie qui permet de reconstituer le volume d'un objet en analysant une série de coupes transversales obtenues par mesures externes.**
- Technique largement utilisée dans des domaines tels que l'imagerie médicale, la géophysique et l'astrophysique.





# Tomographie

- ❑ Issue de l'imagerie médicale (70s)
- ❑ Informations accessibles :
  - Coefficient d'atténuation  $\mu(x,y)$  (tomographie d'absorption) → Le plus courant
  - Indice de réfraction (tomographie de contraste de phase)
  - Angle de diffraction sur cristaux (DCT)



1. Mesure de l'**atténuation des rayons X** à travers un objet à **différents angles**.

>> radiographie = information locale intégrée le long d'une direction



2. **Reconstruction des coupes** à partir des radiographies à l'aide d'**algorithmes spécifiques** (inversion).

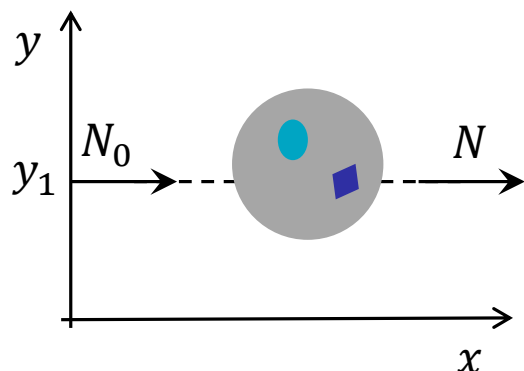
3. Juxtaposition de l'ensemble des coupes reconstruites pour obtenir l'**image 3D**.





# Tomographie

## 1. Atténuation des rayons X



### Loi de Beer-Lambert

$$N = N_0 \exp \left( - \int \mu(x, y_1) dx \right)$$

- $N_0$  : nombre de photons émis
- $N$  : nombre de photons mesuré
- $\mu$  : **coefficient d'atténuation linéaire**

$$\mu = \rho \left[ a \frac{Z^m}{E^n A} + \frac{bZ}{AE} \right]$$

Absorption photoélectrique

Diffusion Compton

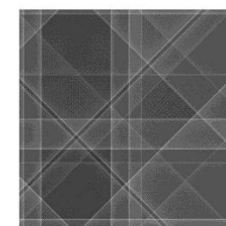
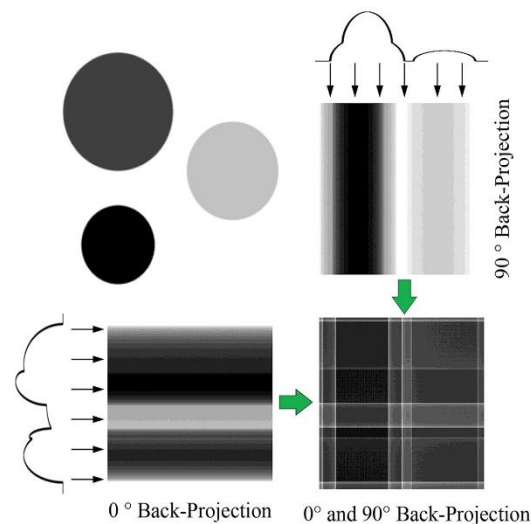
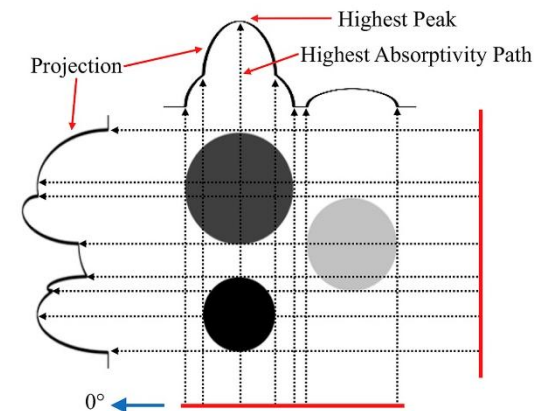
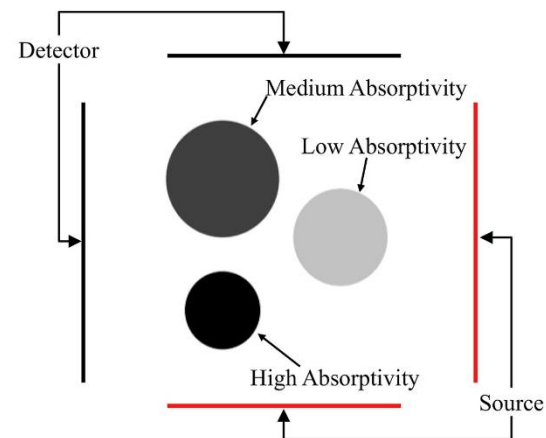
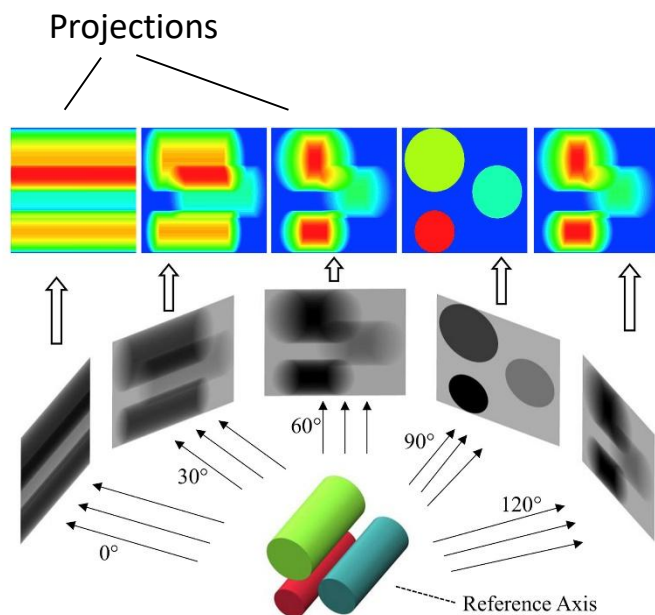
- $E$  : énergie rayons X
- $\rho$  : densité massique
- $Z$  : numéro atomique
- $A$  : poids atomique
- $m, n, a, b$  : constantes



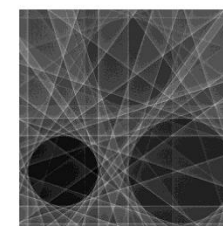
# Tomographie

## 2. Reconstruction

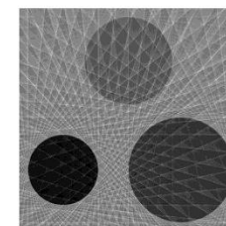
### Algorithme de rétroprojection filtrée



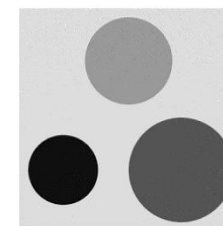
4 Projections



10 Projections



90 Projections



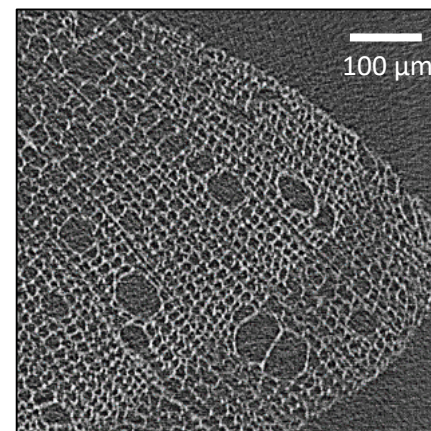
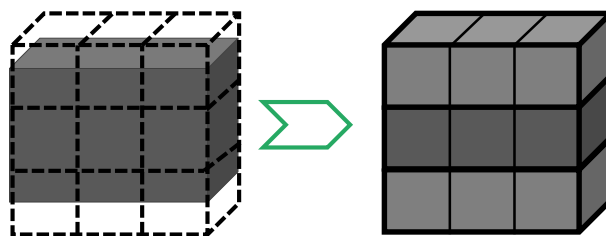
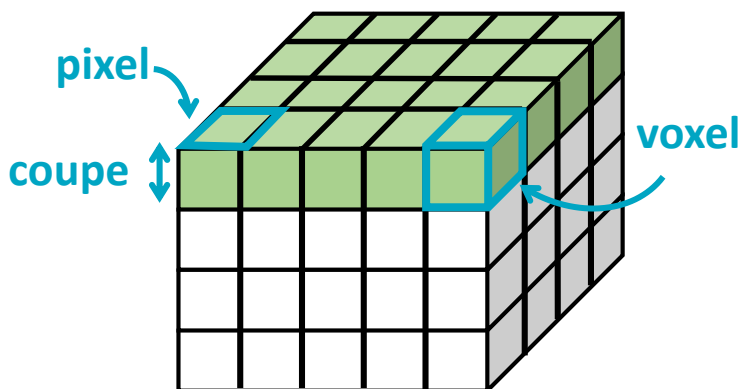
180 Projections



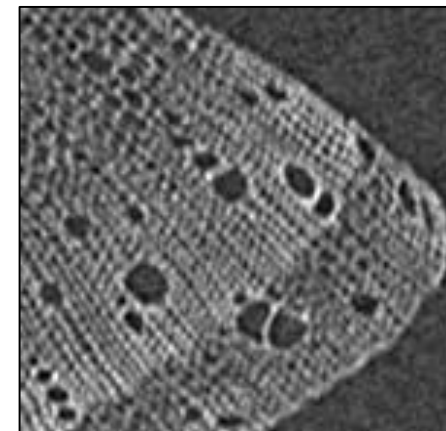
# Tomographie

## 3. Image volumique

- ❑ **Voxel** = extension en 3D d'un pixel
- ❑ Coupe = **épaisseur finie** de l'objet composée de voxels
- ❑ Paramètre final visualisé = niveau de gris du voxel dans la coupe reconstruite
  - lié à la **moyenne des coefficients d'atténuation linéaire** de l'ensemble des composants physiquement présents dans le voxel → **Effet de volume partiel**
- ❑ Taille de voxel = **résolution de l'image** ( $\neq$  résolution de mesure)



voxel : 1.3 μm



voxel : 13 μm



# Lien niveau de gris / masse volumique

En contraste d'absorption, hypothèse de linéarité :

niveau de gris  $\propto$  masse volumique

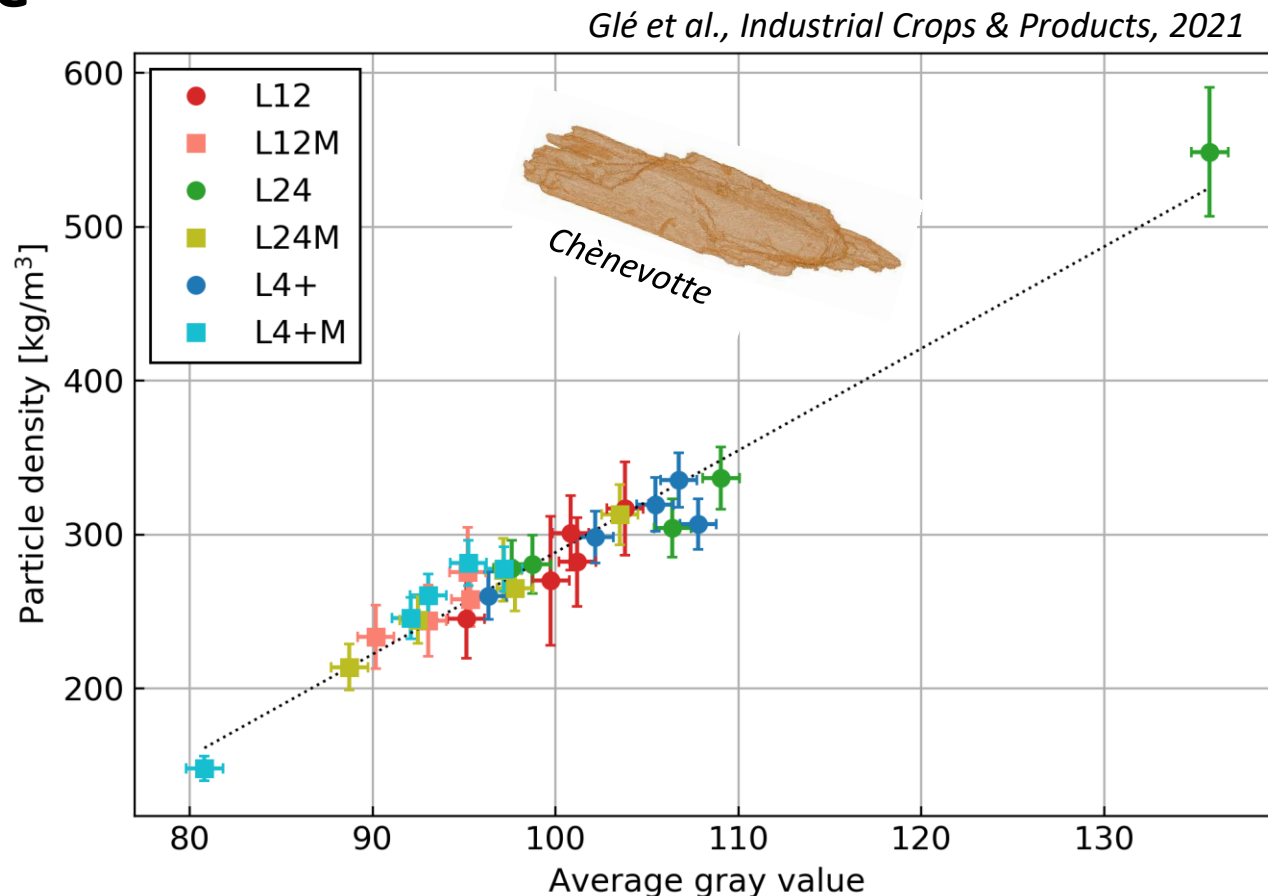
$$\mu = \rho \left[ a \frac{Z^m}{E^n A} + \frac{bZ}{AE} \right]$$

Coefficient d'atténuation linéaire

→ « Densitométrie »

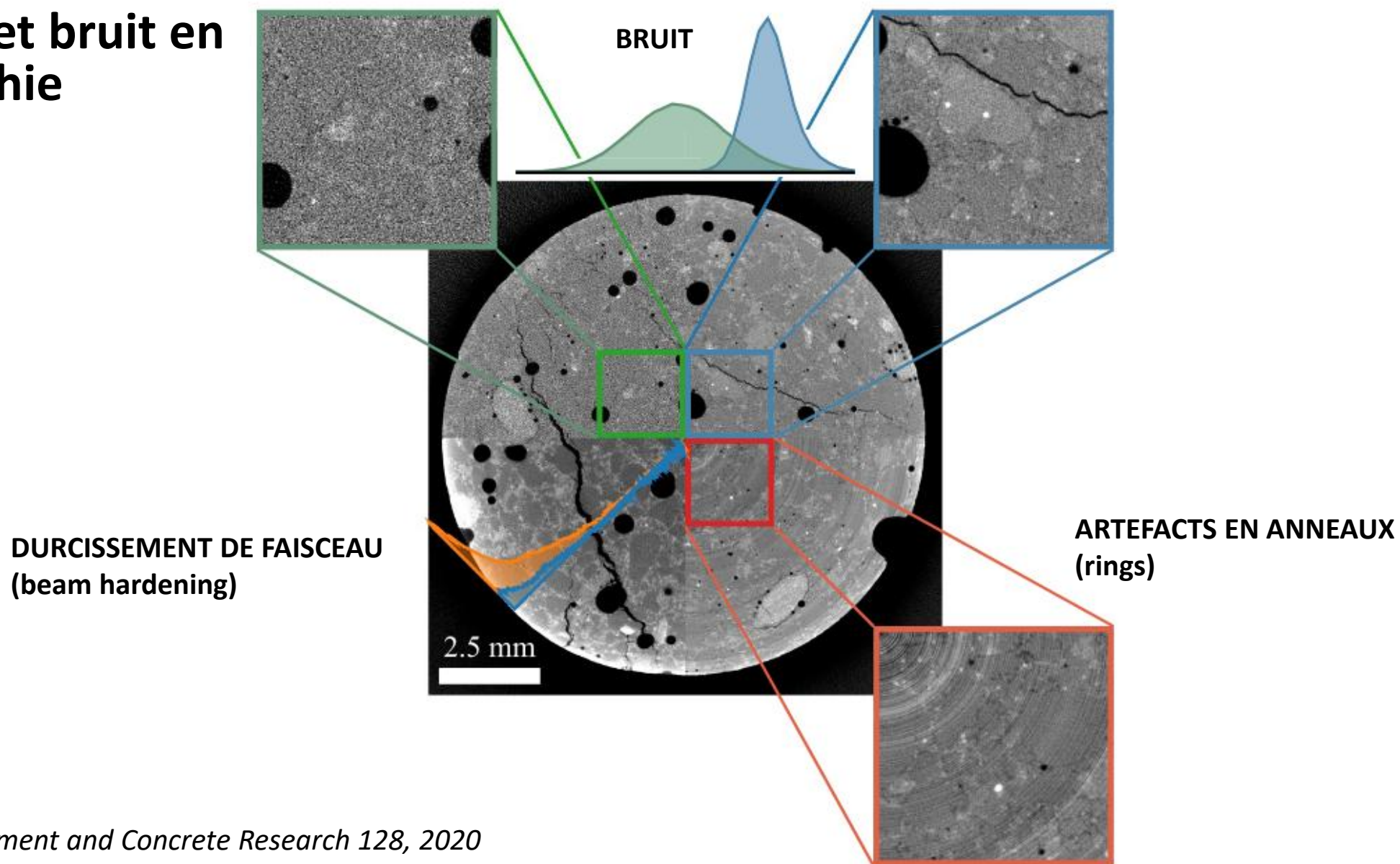


Calibrations  
nécessaires





## Artefacts et bruit en tomographie







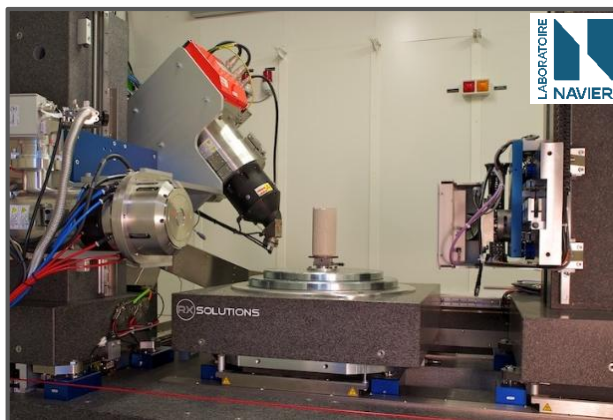
# Types de scanner

**Scanner = Source de rayons X + Imageur + Système pour mesure à différents angles**

3 types de scanner :



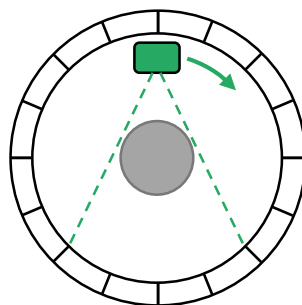
Scanner médical



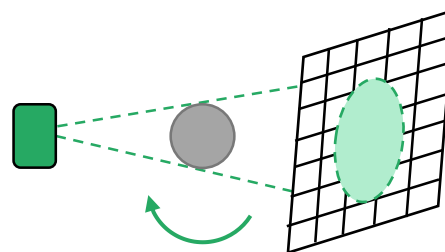
Tomographe de laboratoire



Synchrotron



Tube à rayons X



**Accélérateur de  
particules (électrons)**



Faisceau parallèle



## Comparatif \*

| Type de scanner    | Médical                | Laboratoire / industriel | Synchrotron                |
|--------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Source rayons X    | Tube rayons X          |                          | Accélérateur de particules |
| Géométrie faisceau | Eventail ou cône       |                          | Parallèle                  |
| Résolution         | 100-1000 $\mu\text{m}$ | 0.25-100 $\mu\text{m}$   | 0.1-10 $\mu\text{m}$       |
| Taille d'objet     | dm                     | cm                       | mm                         |
| Temps de scan      | Sec-min                | Min-hr                   | Sec-min                    |

- ❑ Meilleure résolution : scanner laboratoire et synchrotron.
- ❑ Meilleur temps de scan : scanner médical et synchrotron.
- ❑ Meilleures conditions pour la reconstruction : synchrotron (faisceau parallèle et monochromatique)



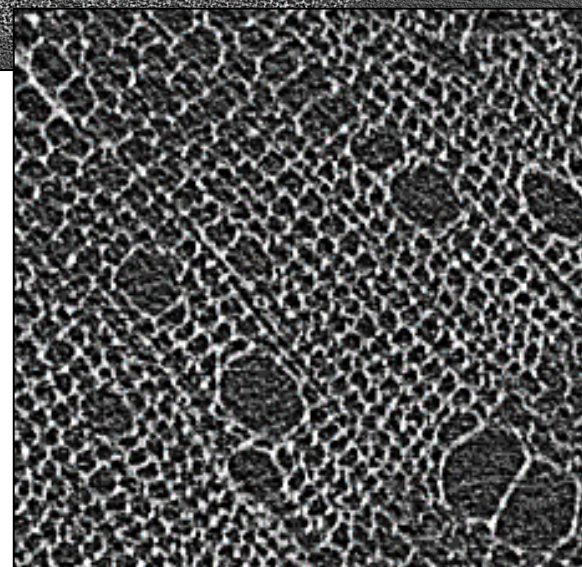
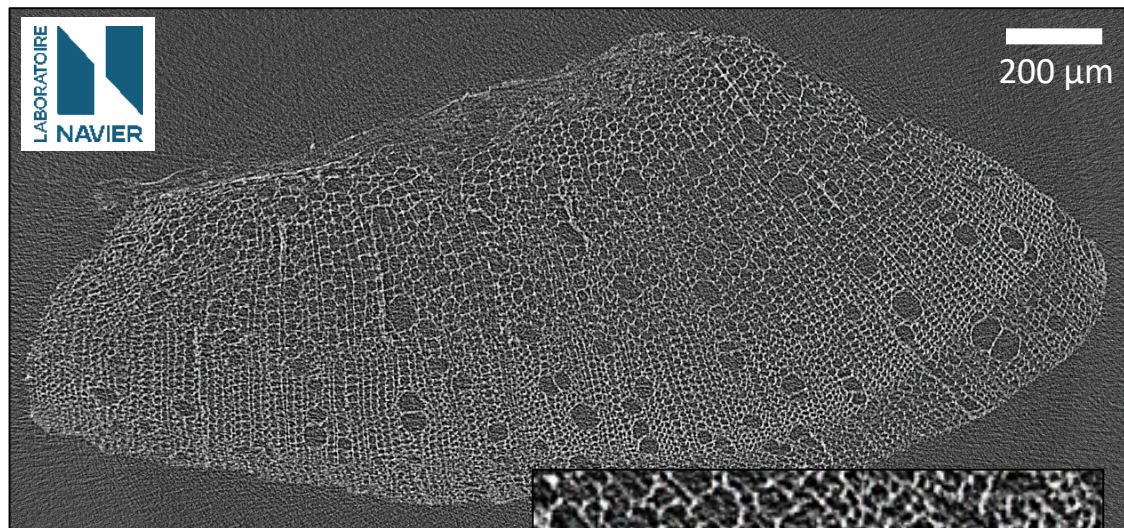
Contraintes synchrotron : accès, énergie plus faible, échantillon de petite taille





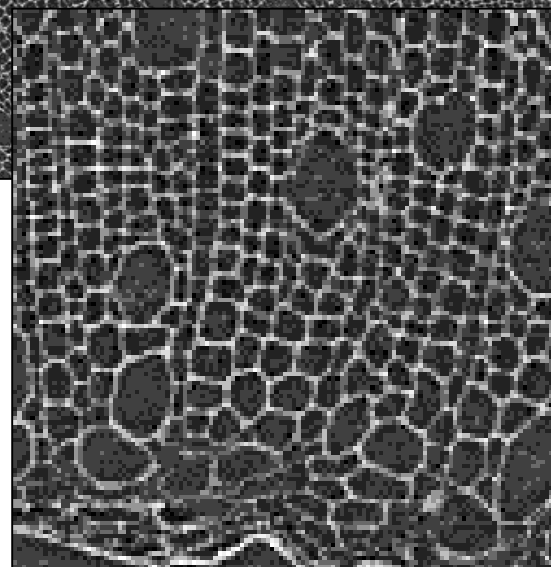
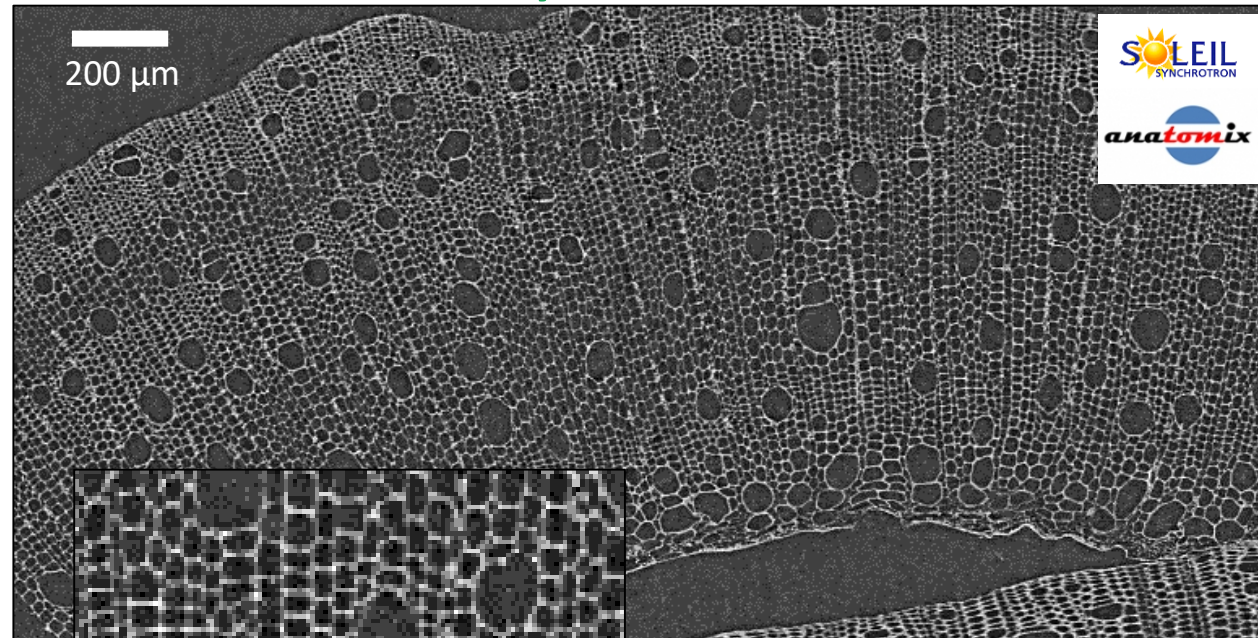
# Comparatif

## Laboratoire



- Navier 2020
- voxel :  $1.3 \mu\text{m}^3$
- temps de scan : 26 h

## Synchrotron



- SOLEIL – Anatomix 2021
- voxel :  $1.3 \mu\text{m}^3$
- temps de scan : 9 min



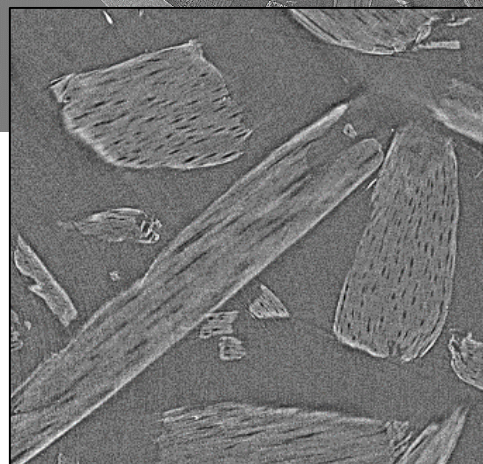
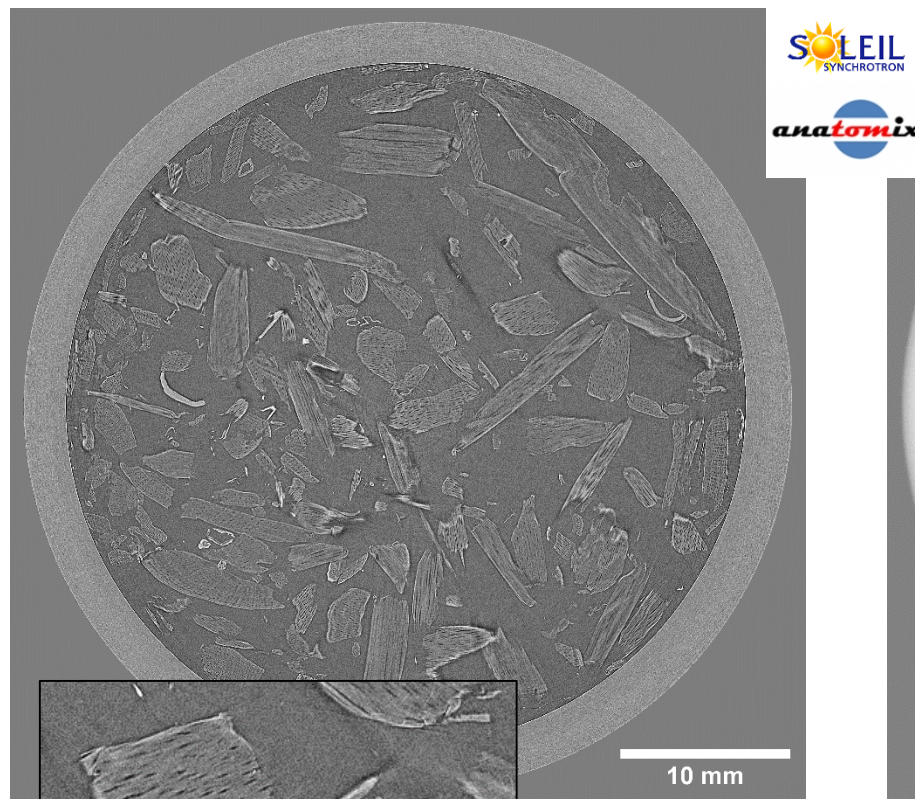


# Exemple synchrotron

SOLEIL - Anatomix

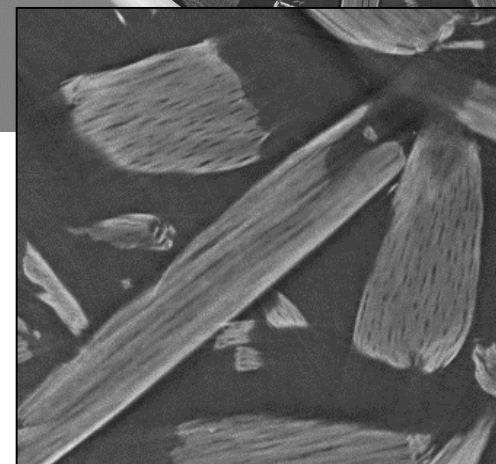
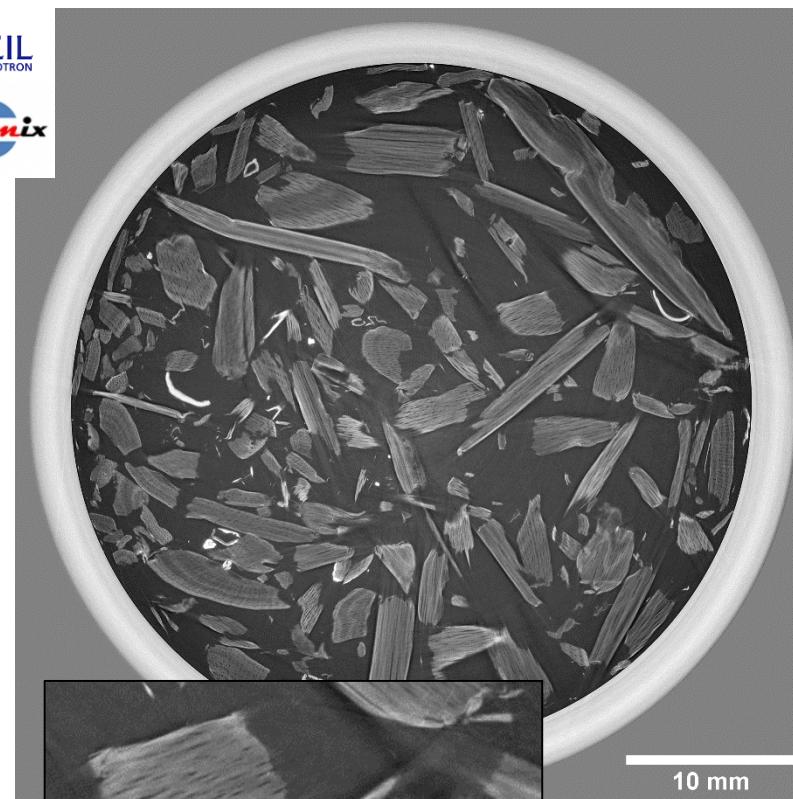


Reconstruction « classique »



contraste  
d'absorption  
→ Densitométrie  
(fraction poreuse locale  
 $\propto$  niveau de gris)

Reconstruction avec méthode Paganin



contraste de phase  
→ microstructure





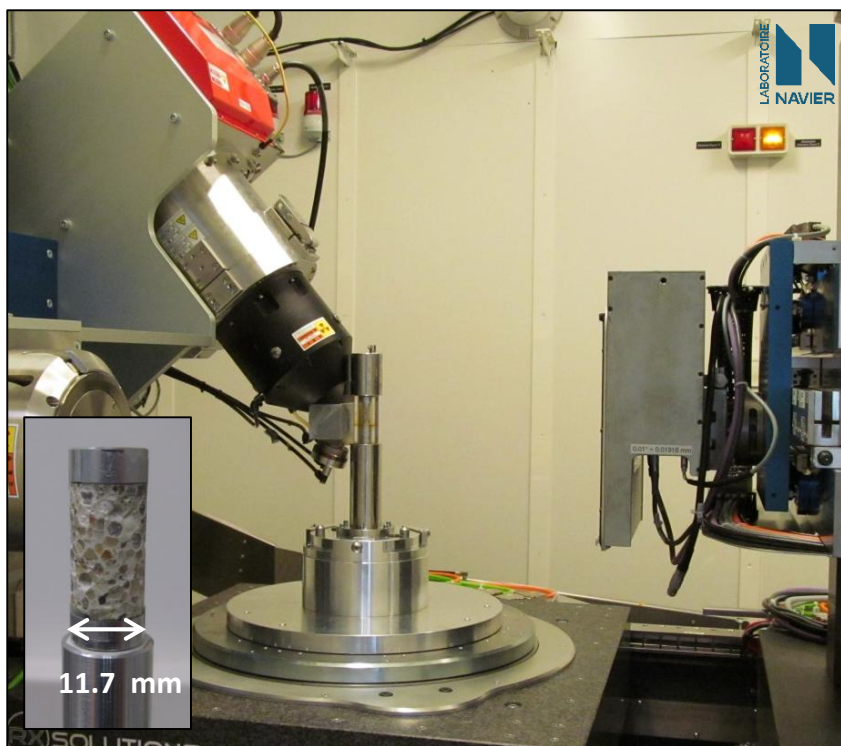
## Essais in situ

Machine de sollicitation mécanique + technique d'observation



Caractérisation du matériau à différents niveaux de déformation / humidité / température ...

Laboratoire



Synchrotron





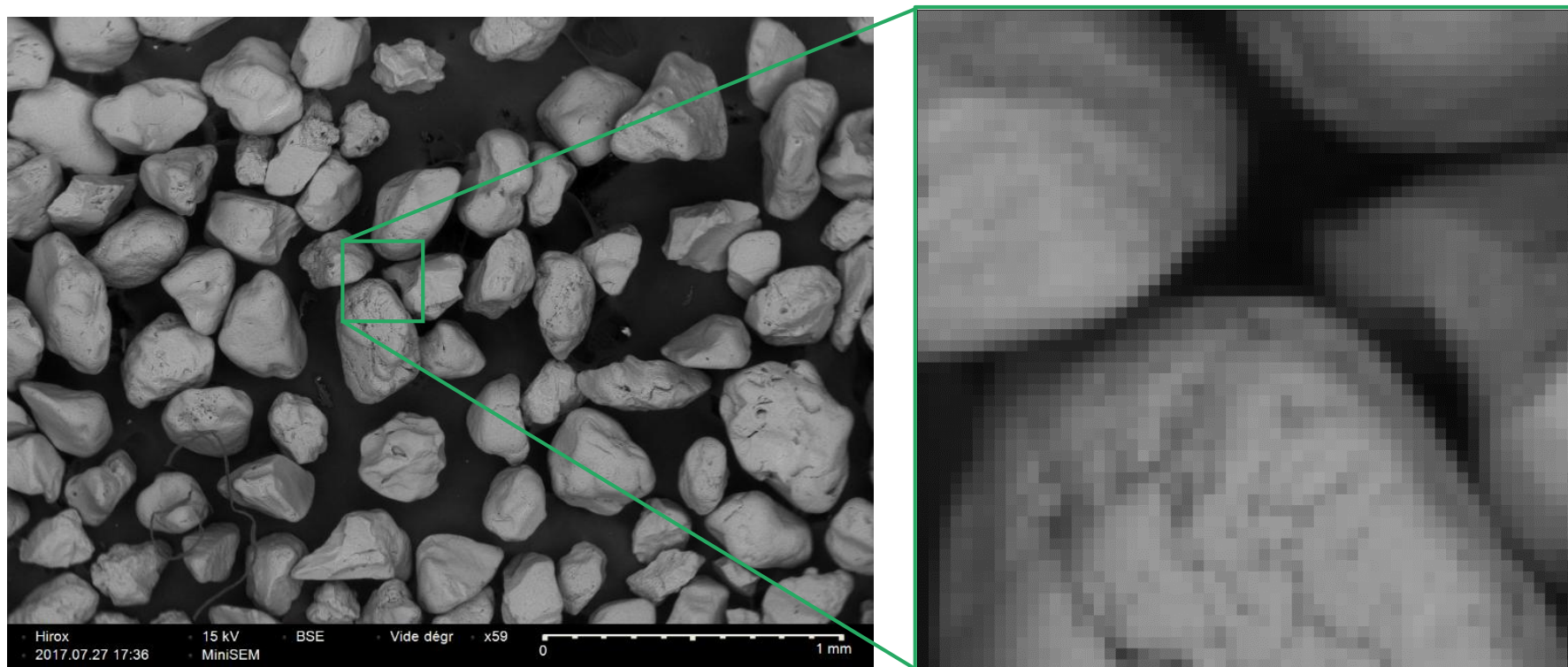


## Notions d'analyse d'images

---



# Qu'est-ce qu'une image numérique ?



**Description discrète : résolution spatiale + profondeur de l'image**

Nombre/taille de pixels (ou voxels)

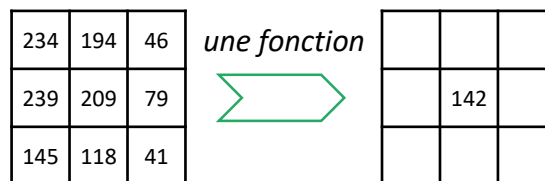
Nombre de valeurs par pixel (niveaux de gris)



# Outils d'analyse d'image

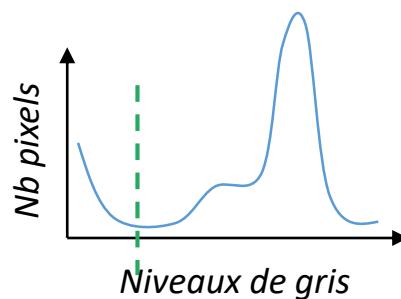
## ❑ Filtrage

réduction de bruit, accentuation de contours ...

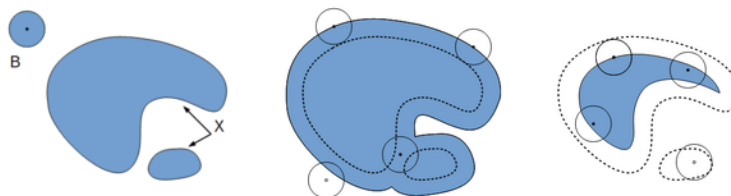


## ❑ Seuillage des niveaux de gris

→ Image binaire (pixel = 0 ou 1)



## ❑ Opérations logiques et morphologiques



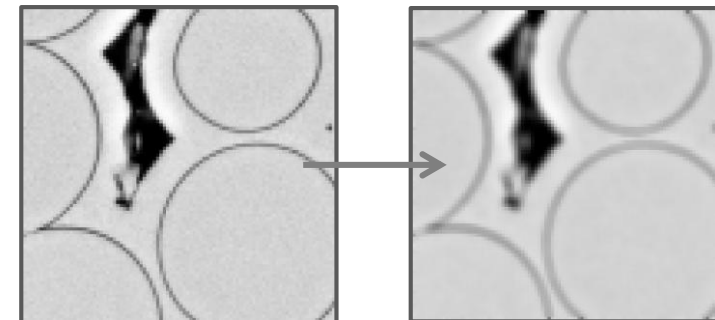
<https://www6.inrae.fr/pfl-cepia/Axe-images/Tutoriel/Morphologie-Mathematique>

## ❑ Analyse/sélection de particules

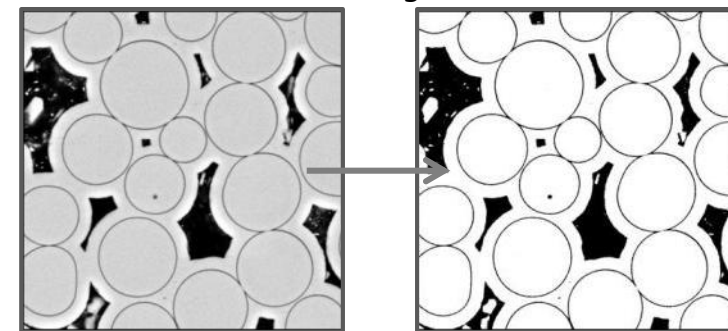
(ensembles de pixels connexes)

→ **Segmentation** (1 pixel = 1 catégorie)

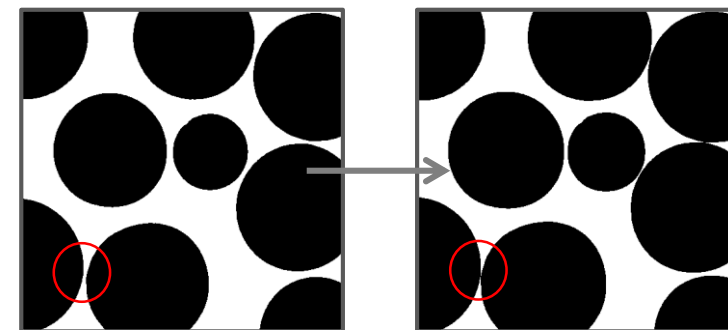
filtre moyen



seuillage

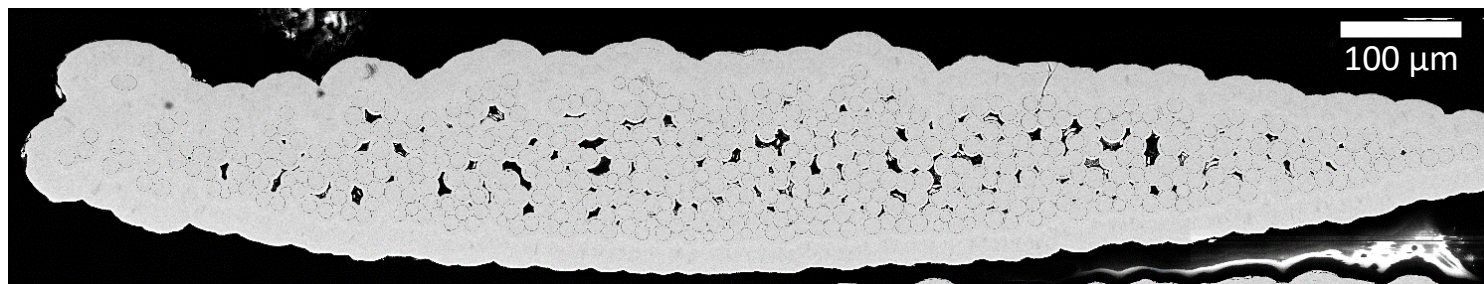


dilatation

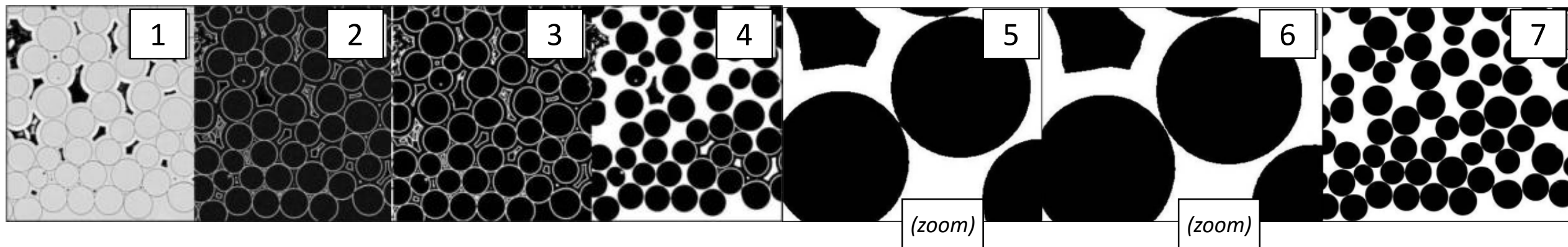




## Exemple 2D : segmentation des fibres dans un composite



Logiciel : ImageJ



1. Lissage (filtre moyen)
2. Détection de contour (gradient)
3. Seuillage

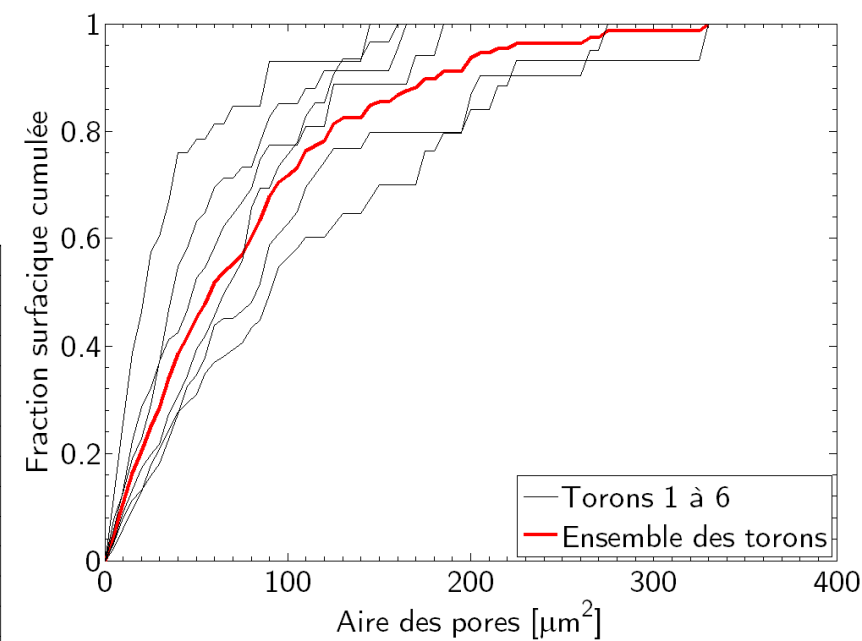
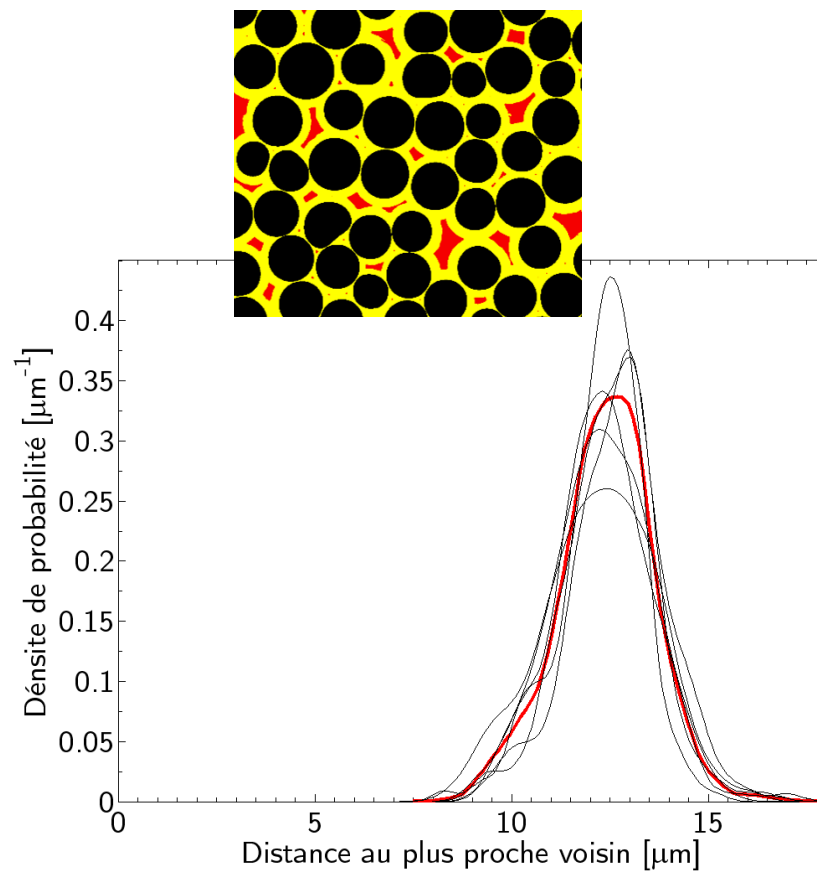
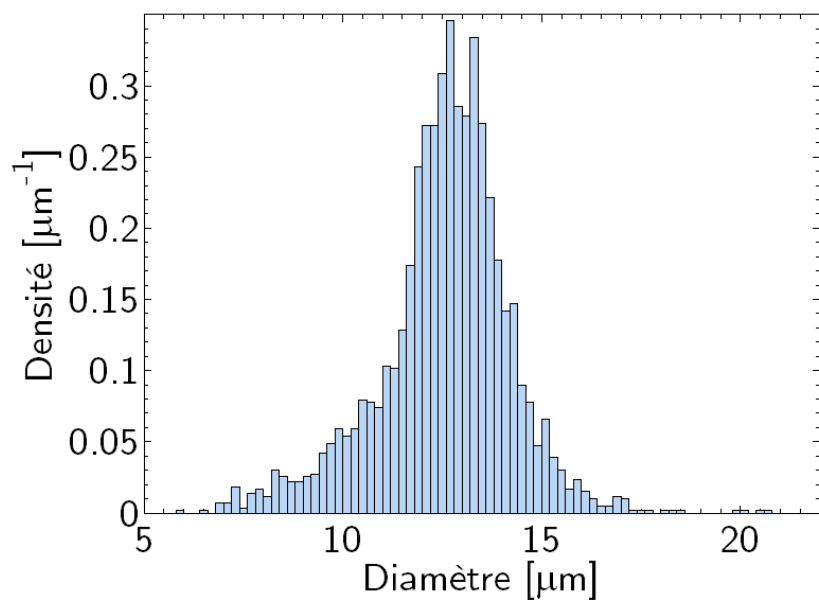
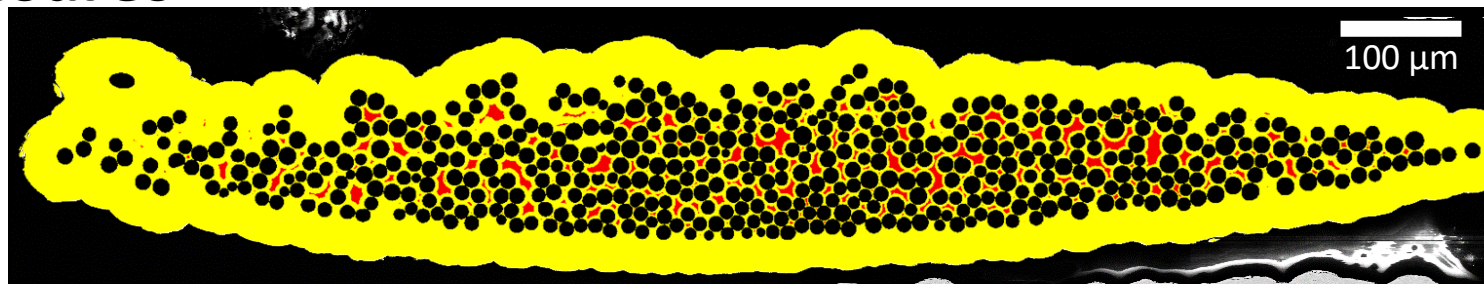
4. Sélection des particules (critère = surface)
5. Dilatation
6. Individualisation des particules (watershed)

7. Sélection des particules  
(critère = circularité)





## Exemple 2D : mesures





# Segmentation utilisant l'IA

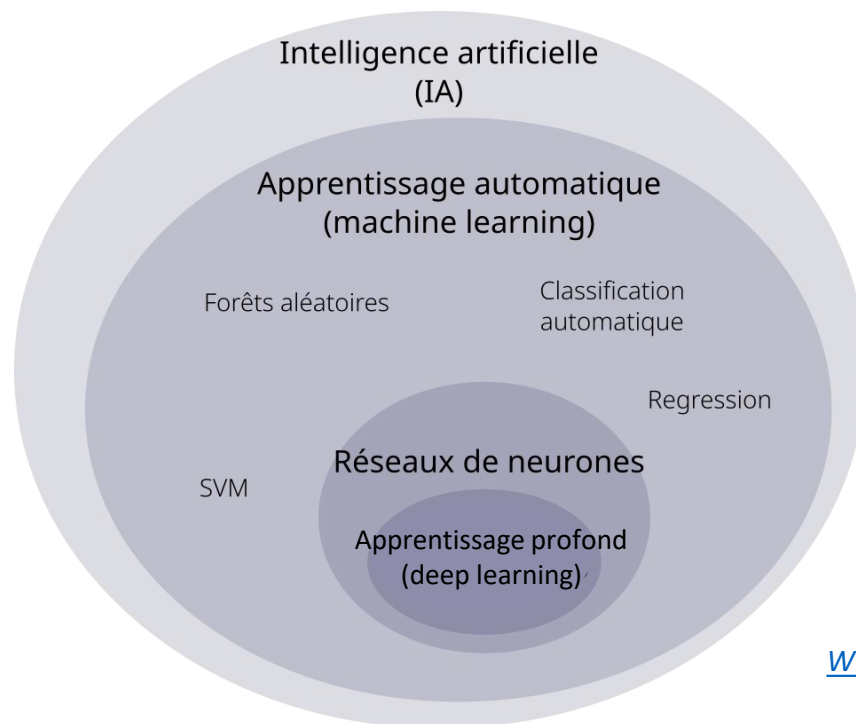
## Machine learning :

[wikipedia]

« approches mathématiques et statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité d'« apprendre » à partir de données, i.e. d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. »

## Deep learning :

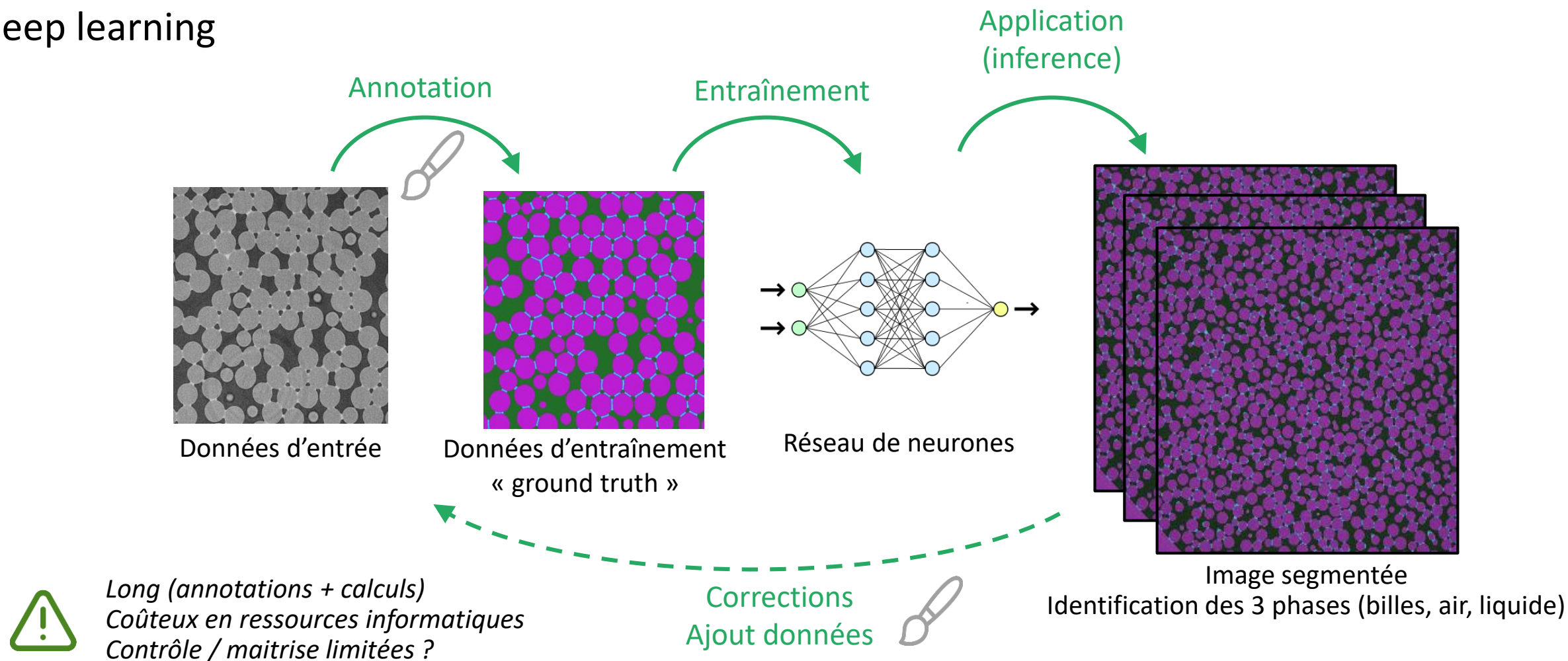
« utilise des réseaux neuronaux artificiels formant de nombreuses couches pour résoudre des tâches complexes. »





# Segmentation utilisant l'IA

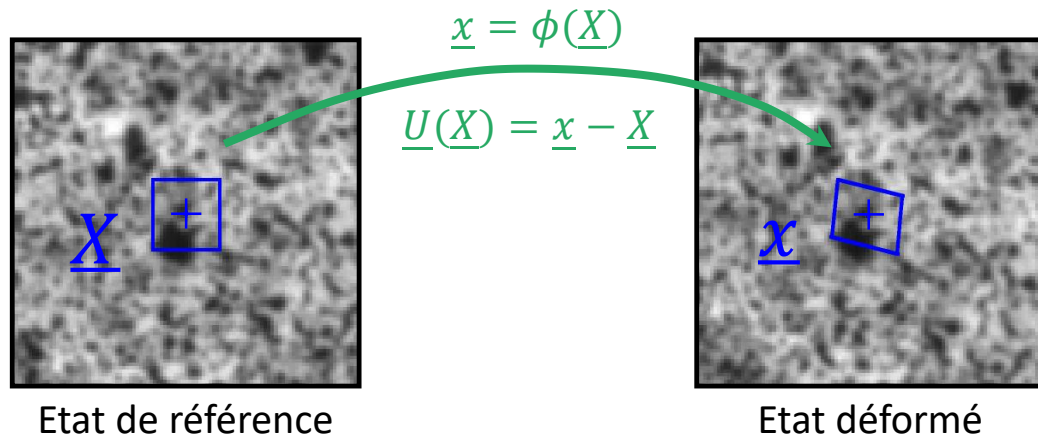
## Deep learning



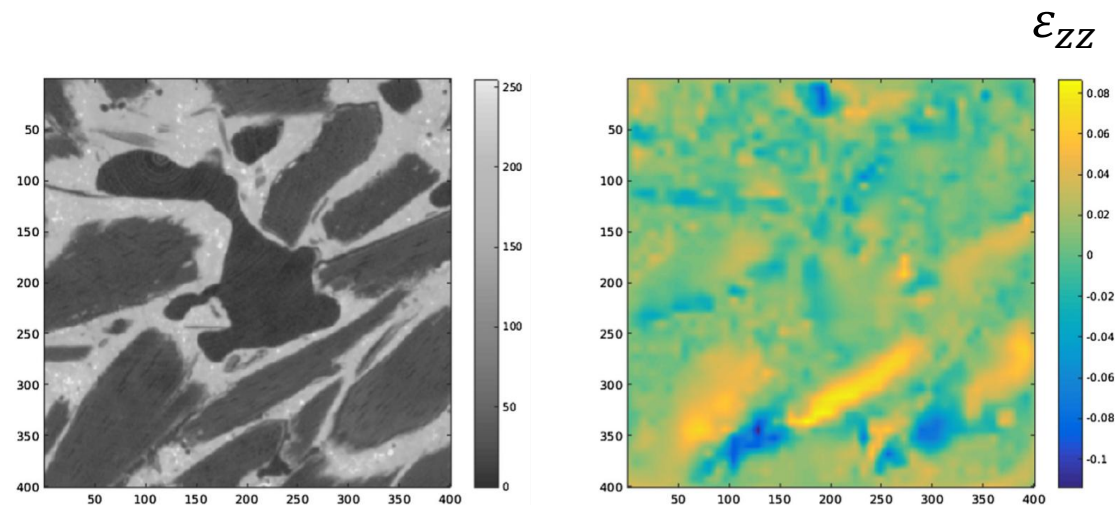
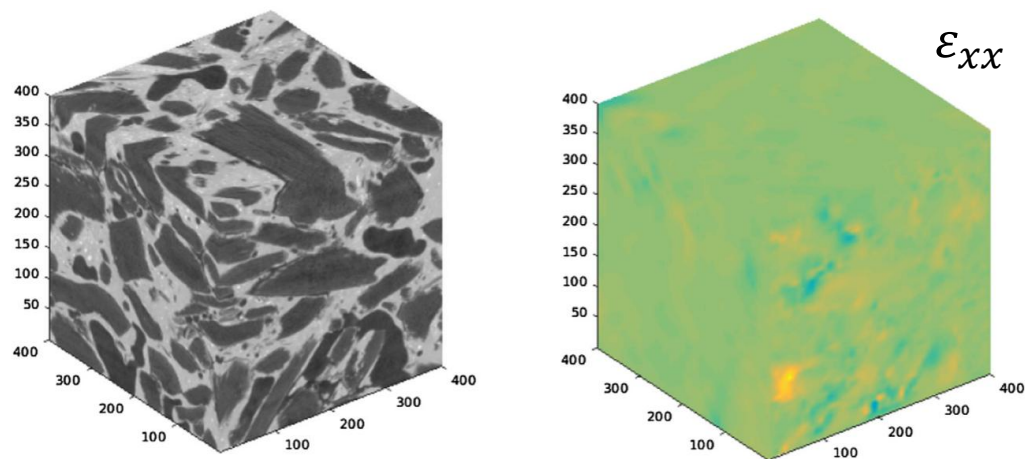
→ Pour microstructures complexes et/ou images avec artefacts non traitables avec les méthodes classiques



## Corrélation d'images numériques (2D) ou volumiques (3D)



- Appariement des points d'après la « ressemblance » de leur voisinage  
→ cf cours E. Toussaint, Mesures de champs, Ecole GDR MBS 2022
- Image 3D : marquage = microstructure







## Quelques outils

- ❑ ImageJ / Fiji (dont Weka) [visualisation][analyse]
- ❑ Paraview [visualisation]
- ❑ 3D Slicer [visualisation][analyse]
- ❑ Dragonfly (Comet) [visualisation][analyse]
- ❑ Python : scikit-image, spam, porespy ... [analyse]
- ❑ ...
- ❑ + logiciels commerciaux payants



# Exemples d'application sur matériaux de construction biosourcés

---



## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

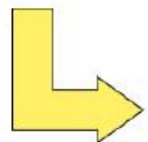
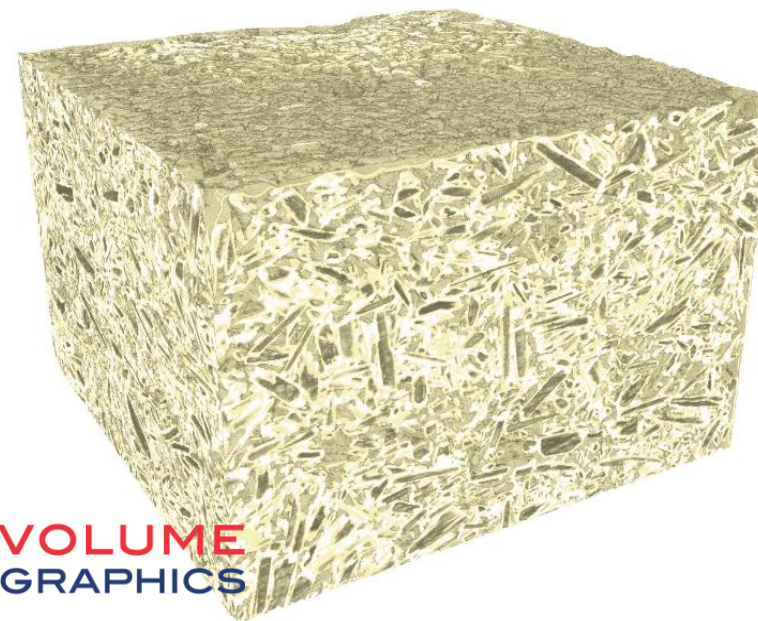


Echantillon pour l'essai MBV  
Taille de l'échantillon : 103 x 100 x 68 mm<sup>3</sup>

Paramétrage du scan : 77 kV  
Taille de voxel : 58  $\mu$ m  
Temps d'exposition de 1 415 ms



NIKON XT H 225ST  
60 – 225 kV  
Cible en tungstène  
Tâche focale de 3  $\mu$ m à 7 W



Station de reconstruction  
(poste de travail  
supplémentaire)



CT Pro 3D

VG StudioMax



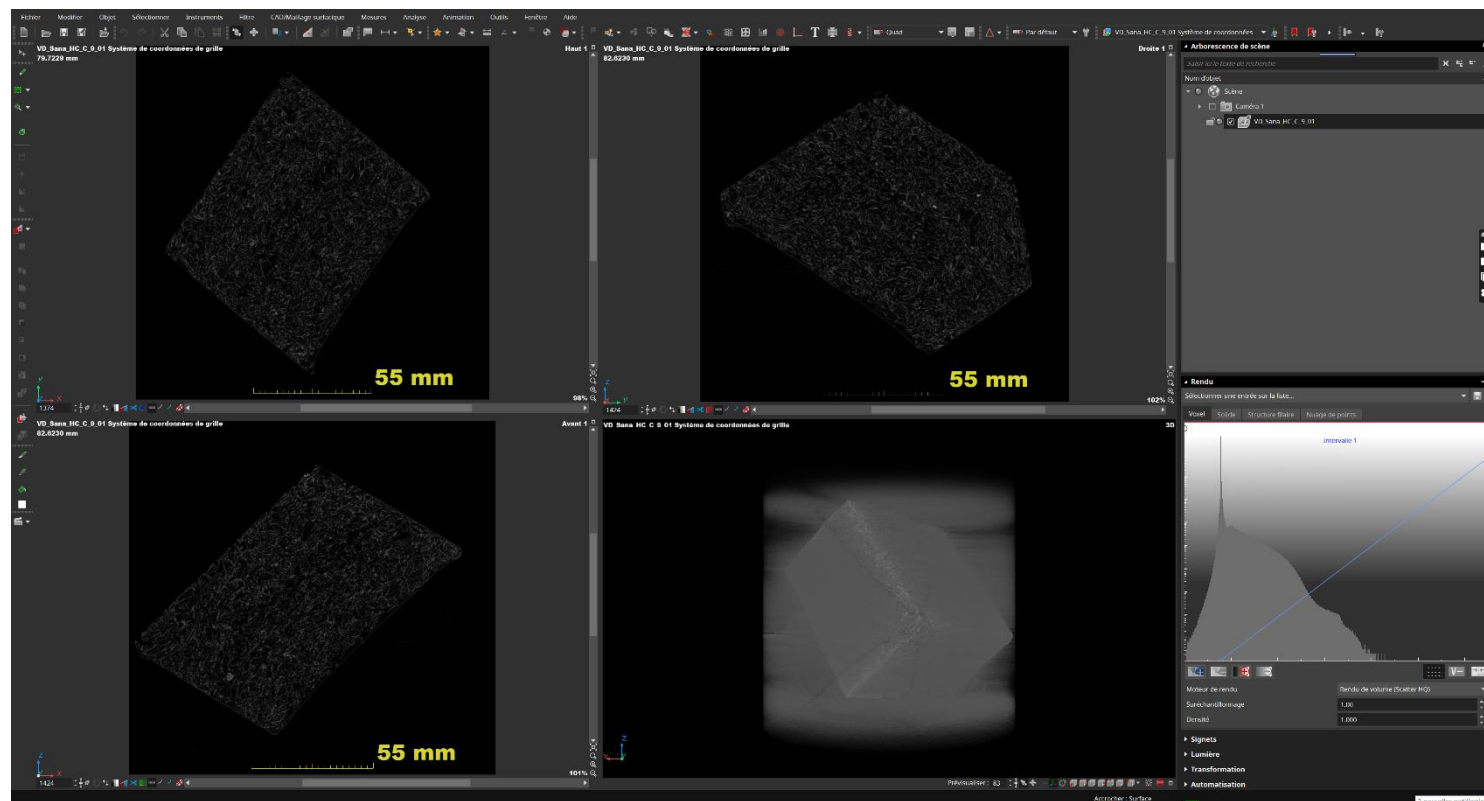
**VOLUME**  
GRAPHICS

Mémoire RAM : 384 Go  
2 processeurs Intel Xeon Gold 6230R CPU @2.10 GHz  
Carte graphique NVIDIA Quatro RTX 4000  
Stockage 12 To



# Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

## Démarrage Fichier



### Que voit-on ?

Coupes 2D (Vue Haut, Vue Avant, Vue Droite) + Vue 3D

Fenêtre d'arborescence de scène + Rendu (inclus l'histogramme de niveaux de gris et le moteur de rendu)

### Problèmes :

Distinction des éléments peu claires

Vues 2D comportant une orientation aléatoire

Vue 3D dans le brouillard

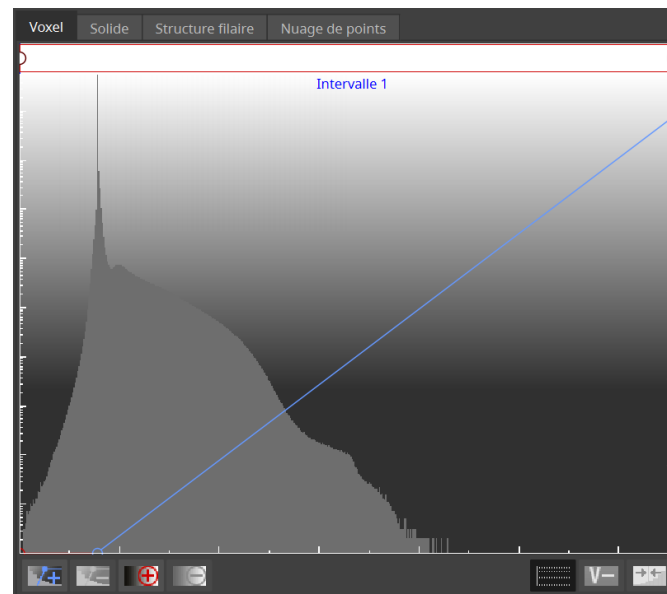
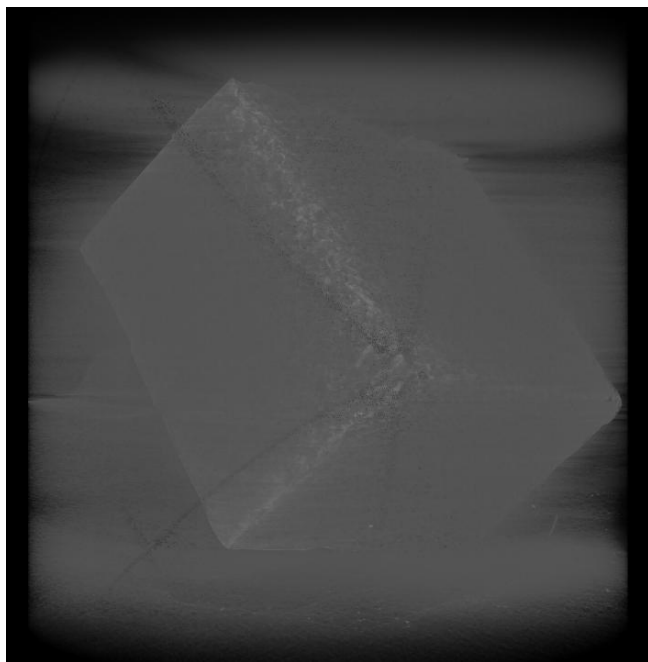
→ Réglage manuel de la gamme de niveaux de gris à afficher via l'histogramme





## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Démarrage Fichier



### Que voit-on ?

Coupes 2D (Vue Haut, Vue Avant, Vue Droite) +  
Vue 3D

Fenêtre d'arborescence de scène + Rendu (inclus  
l'histogramme de niveaux de gris et le moteur de  
rendu)

### Problèmes :

Distinction des éléments peu claires

Vues 2D comportant une orientation aléatoire

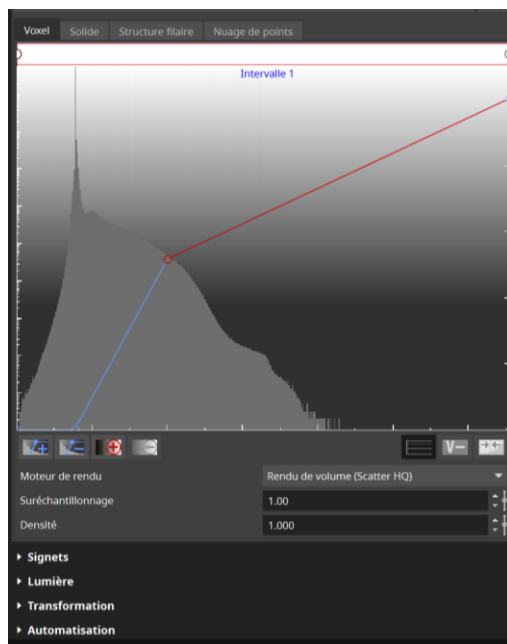
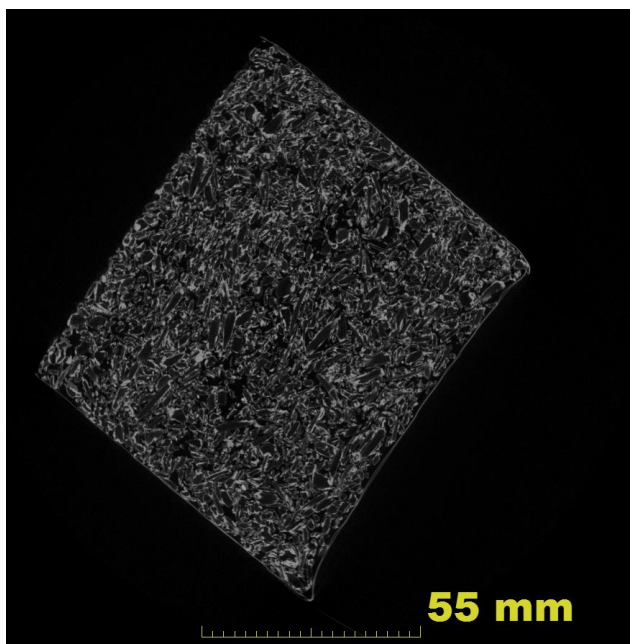
Vue 3D dans le brouillard

→ Réglage manuel de la gamme de niveaux de gris  
à afficher via l'histogramme

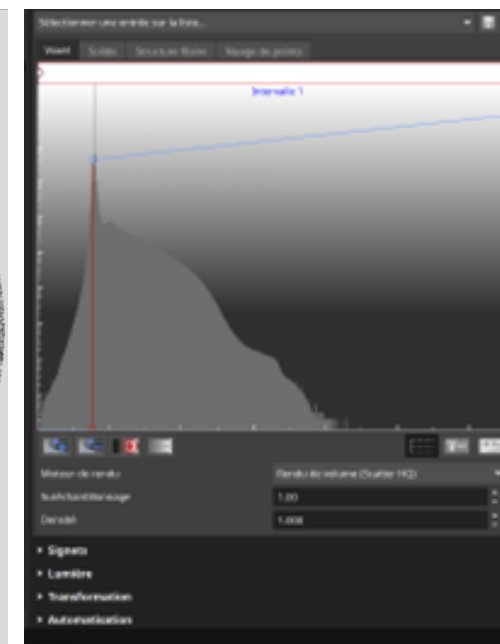
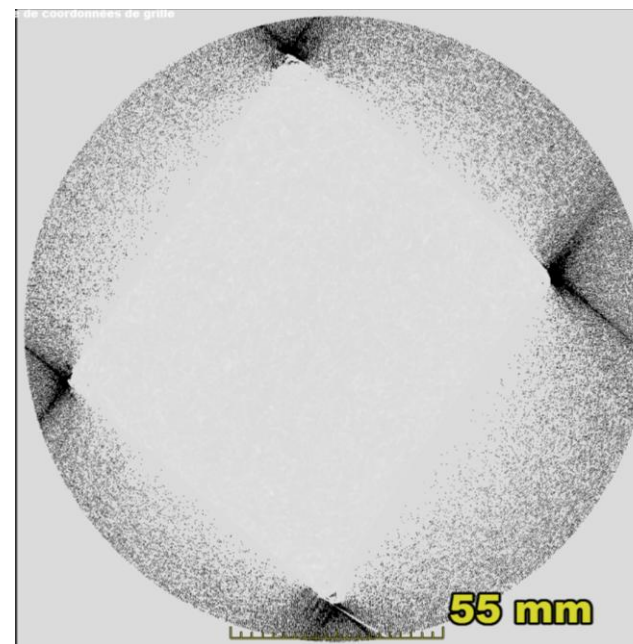


## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Réglage manuel



Amélioration

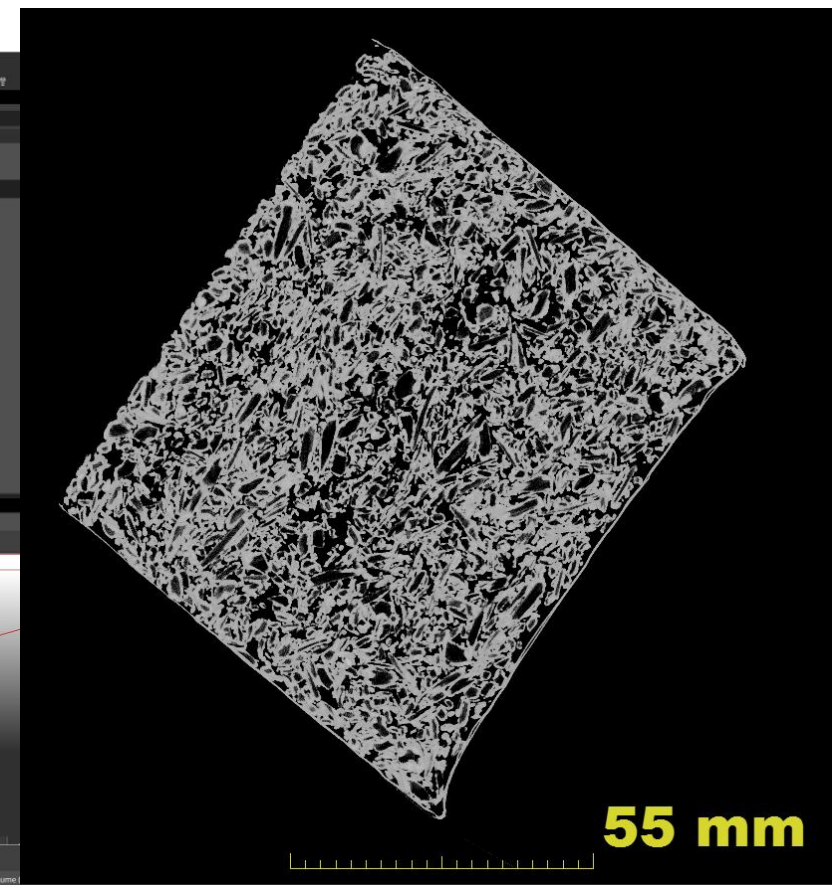
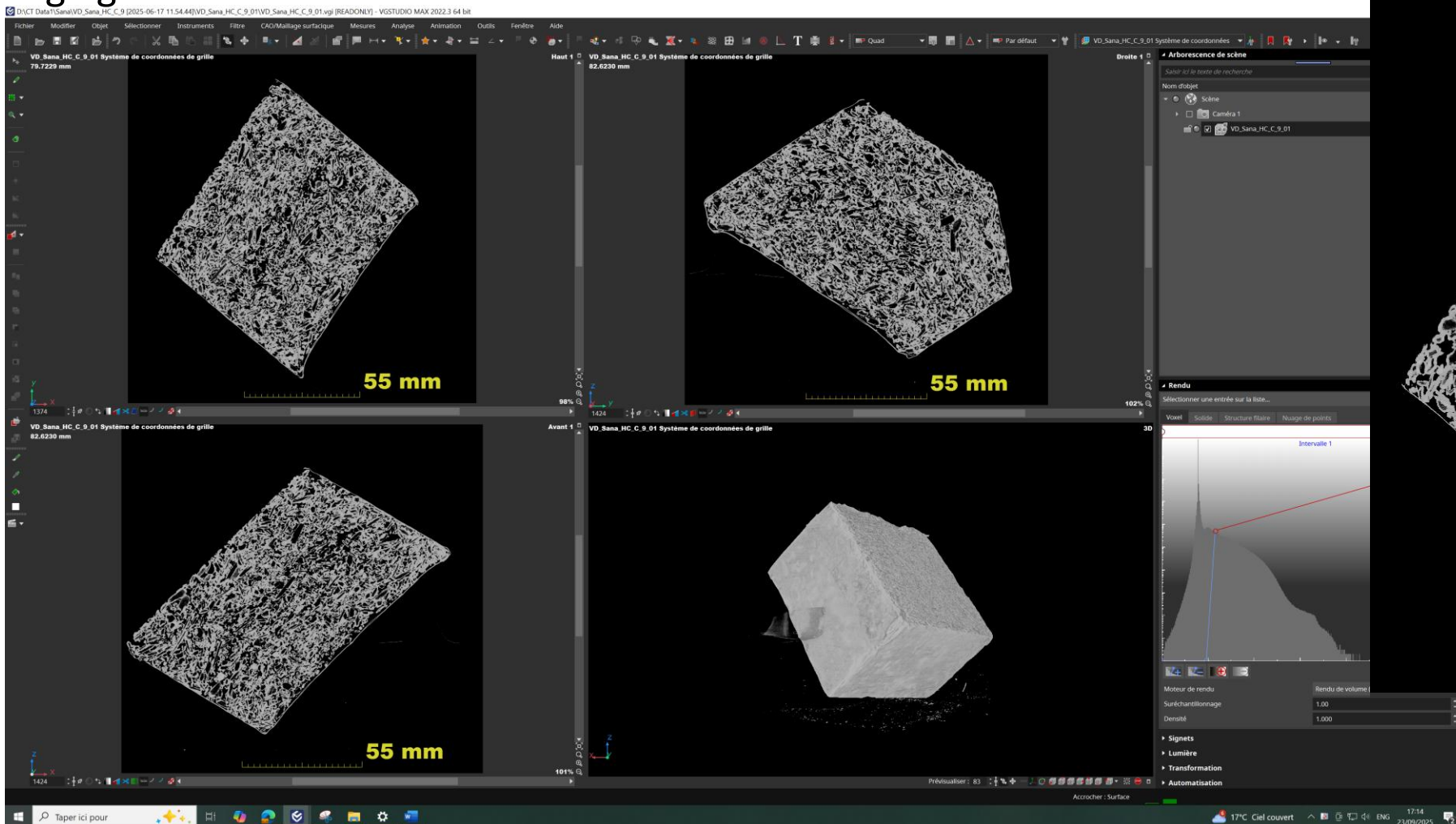


Saturation – Image bruitée



# Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

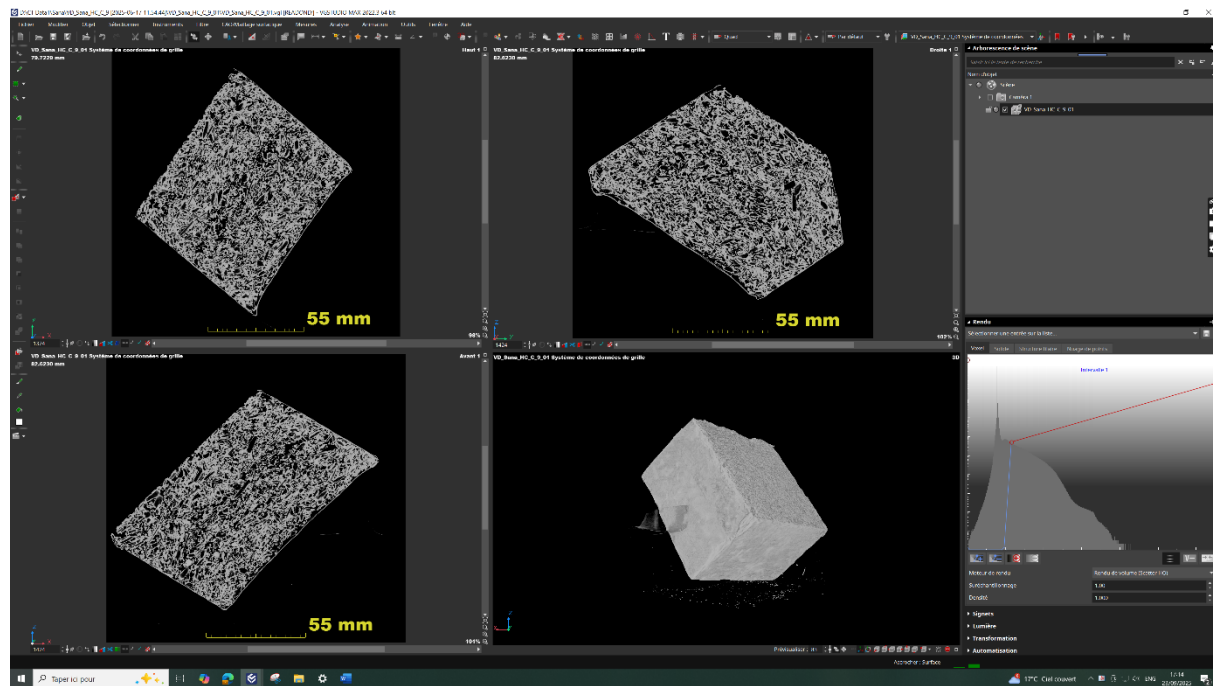
## Réglage manuel





## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

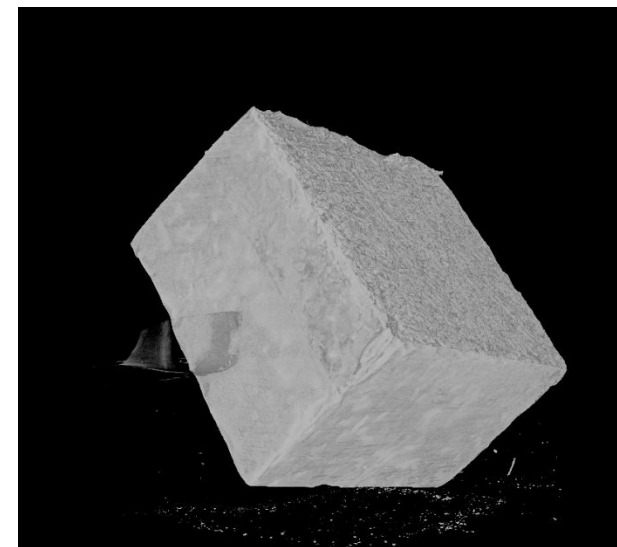
Repositionner l'objet et supprimer le contour de l'échantillon (contour en scotch aluminium)



- Ici, les vues 2D sont orientées incorrectement : repère XYZ à aligner sur la forme de l'objet

- Dans la vue 3D, on voit des éléments présents (particules → bruit ou autre) autour de l'échantillon lui-même : supprimer l'espace autour

En effet, l'échantillon fait 700 400 mm<sup>3</sup> et le logiciel donne, dans l'onglet Propriétés de l'objet, 4 335 338 mm<sup>3</sup>



Avant de pouvoir supprimer l'espace autour, il faut recalibrer l'objet.

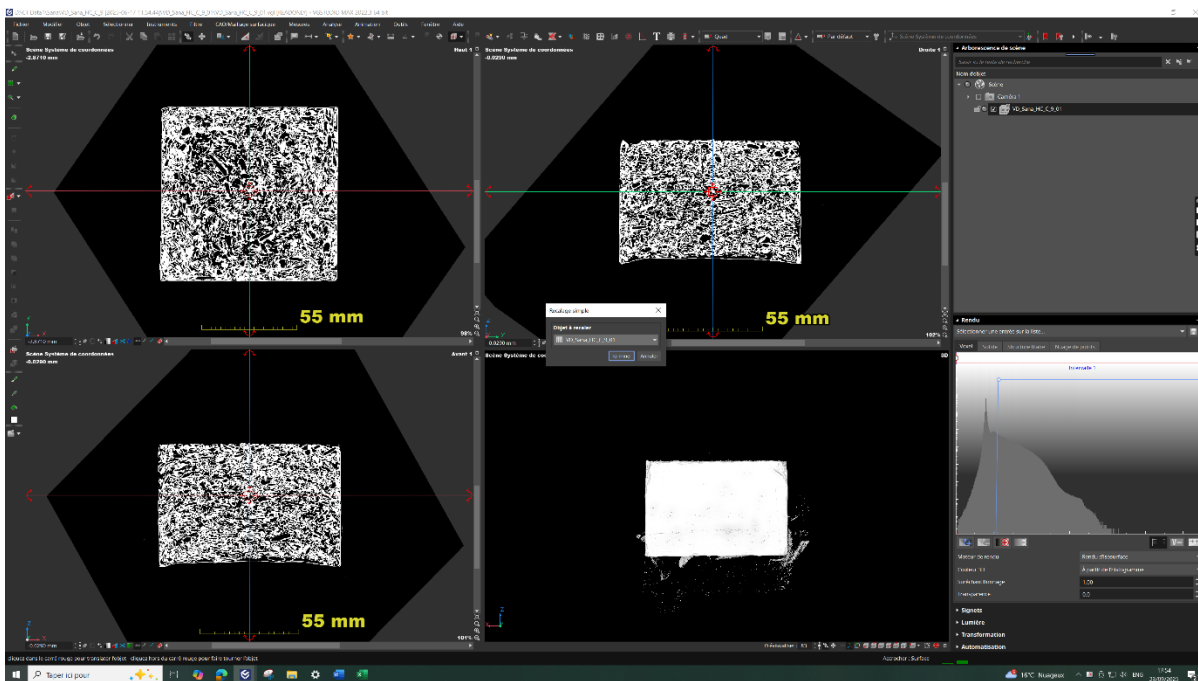




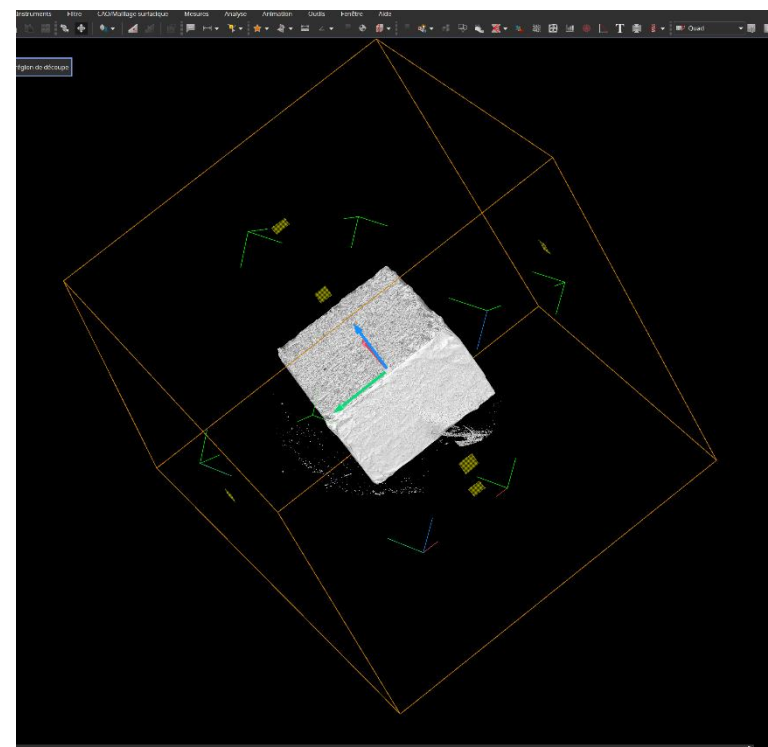
## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Repositionner l'objet et supprimer le contour de l'échantillon (contour en scotch aluminium)

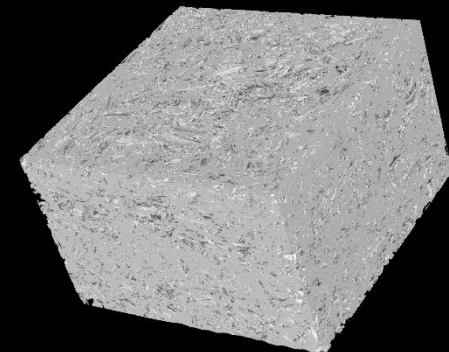
Recalage



Suppression de l'espace autour



Utilisation d'une  
boîte de découpe



Après découpe : Volume total = 613 632 mm<sup>3</sup> → perte de 12.4% d'objet  
(contour incluant le ruban métallique et les zones de défaut de surface)



## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Indiquer au logiciel la limite entre matière et air

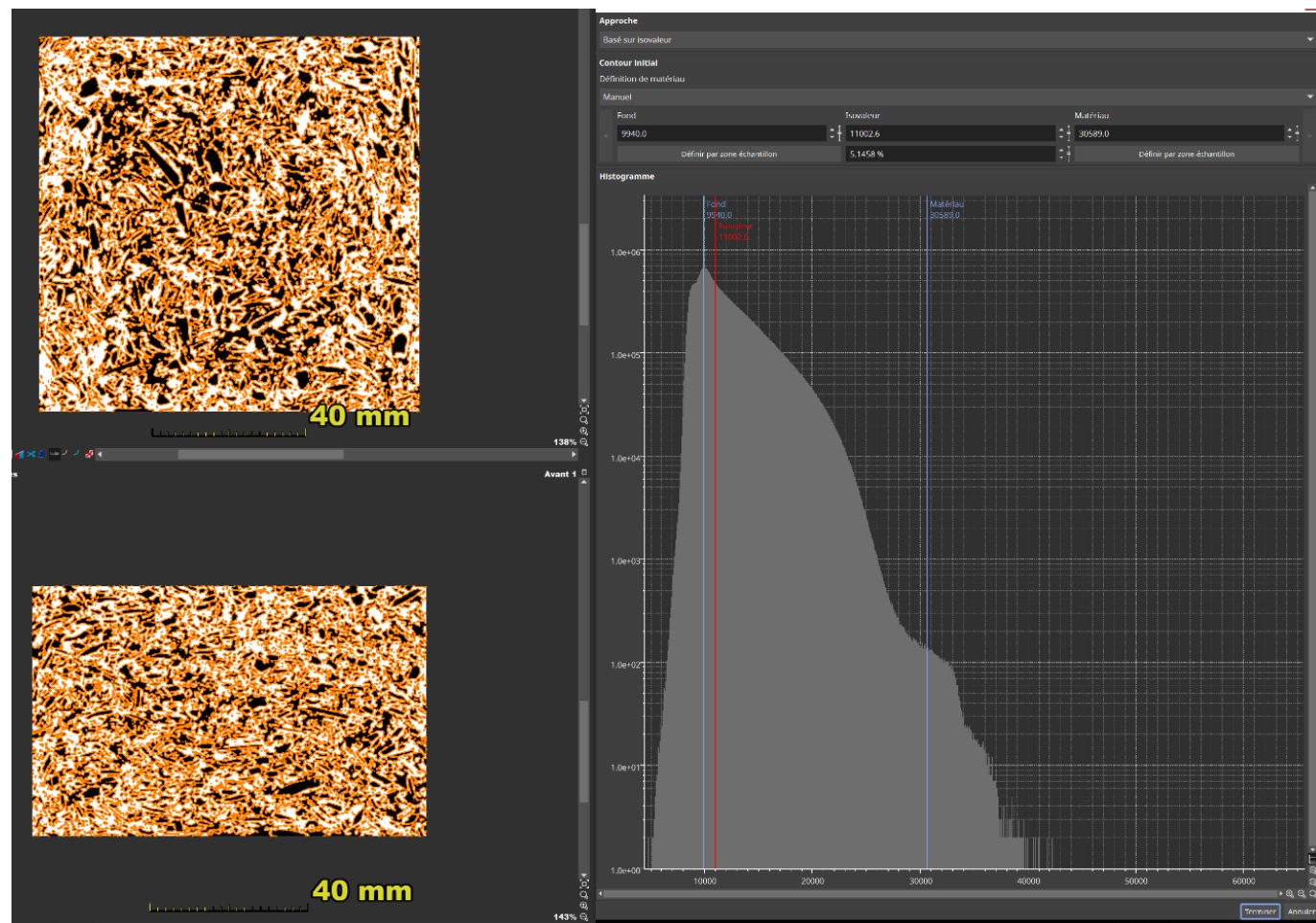
→ Segmentation par seuillage

Matière = liant (blanc + orange sur l'image)

Air = porosité + chènevotte (noir sur l'image)

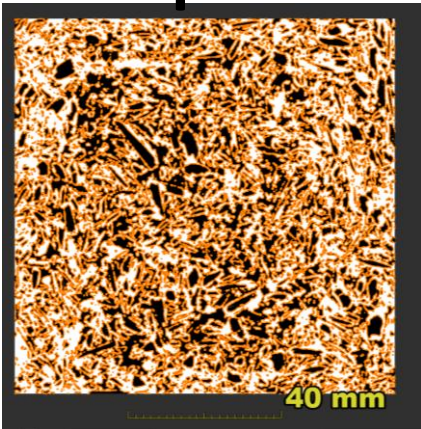
→ Nécessaire pour faire de l'analyse  
(comptage, mesures)

Mais est-ce conforme à la porosité  
de mon échantillon ?





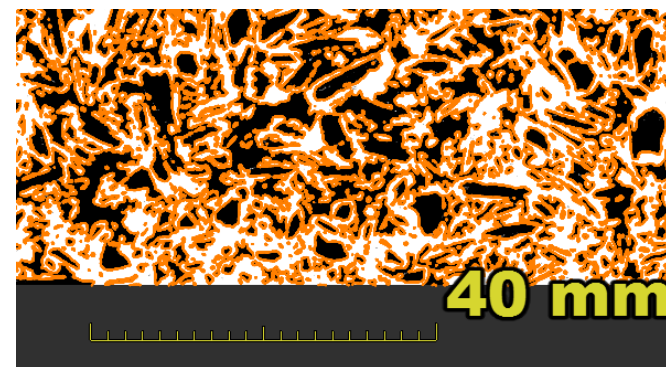
## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse



→ Menu Propriétés :

- Volume total = 613 632 mm<sup>3</sup>
- Volume vides = 274 016 mm<sup>3</sup>

→ Porosité = 44.7 %

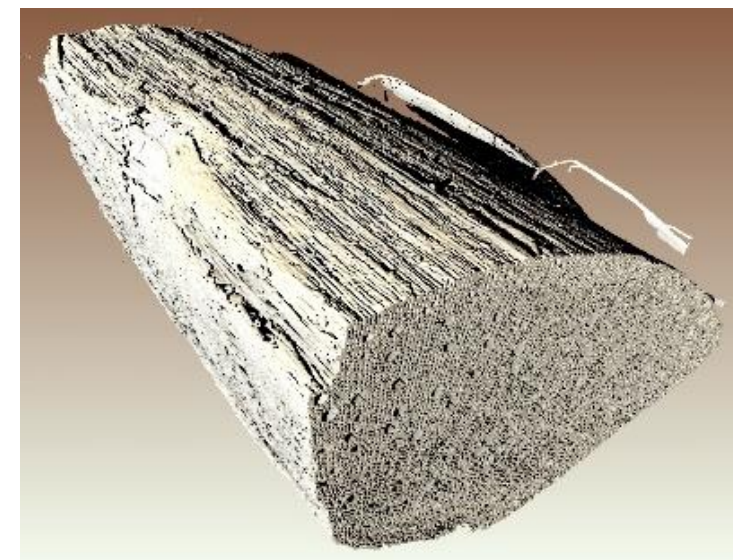
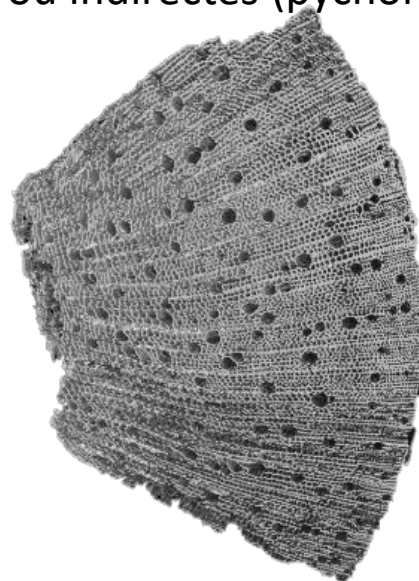


Evaluation de porosité par mesures directes ou indirectes (pycnomètre à azote, pesée hydrostatique, mesures des échantillons)

Composition / Rapports massiques :

- Liant/Eau = 0.9
- Chènevotte/Liant = 0.5

Porosité totale :  $V_{\text{vides}}/V_{\text{total}} = 81.2\%$

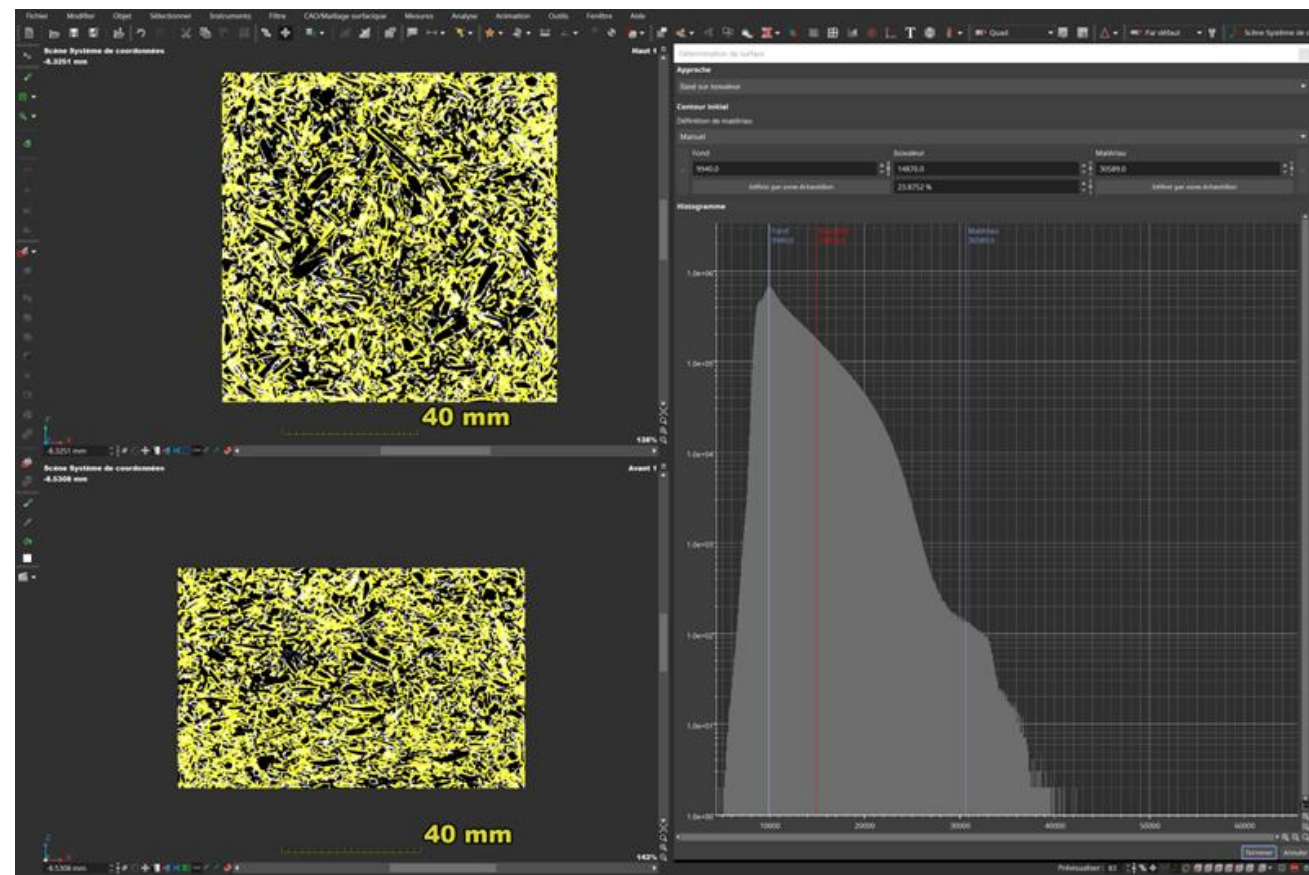
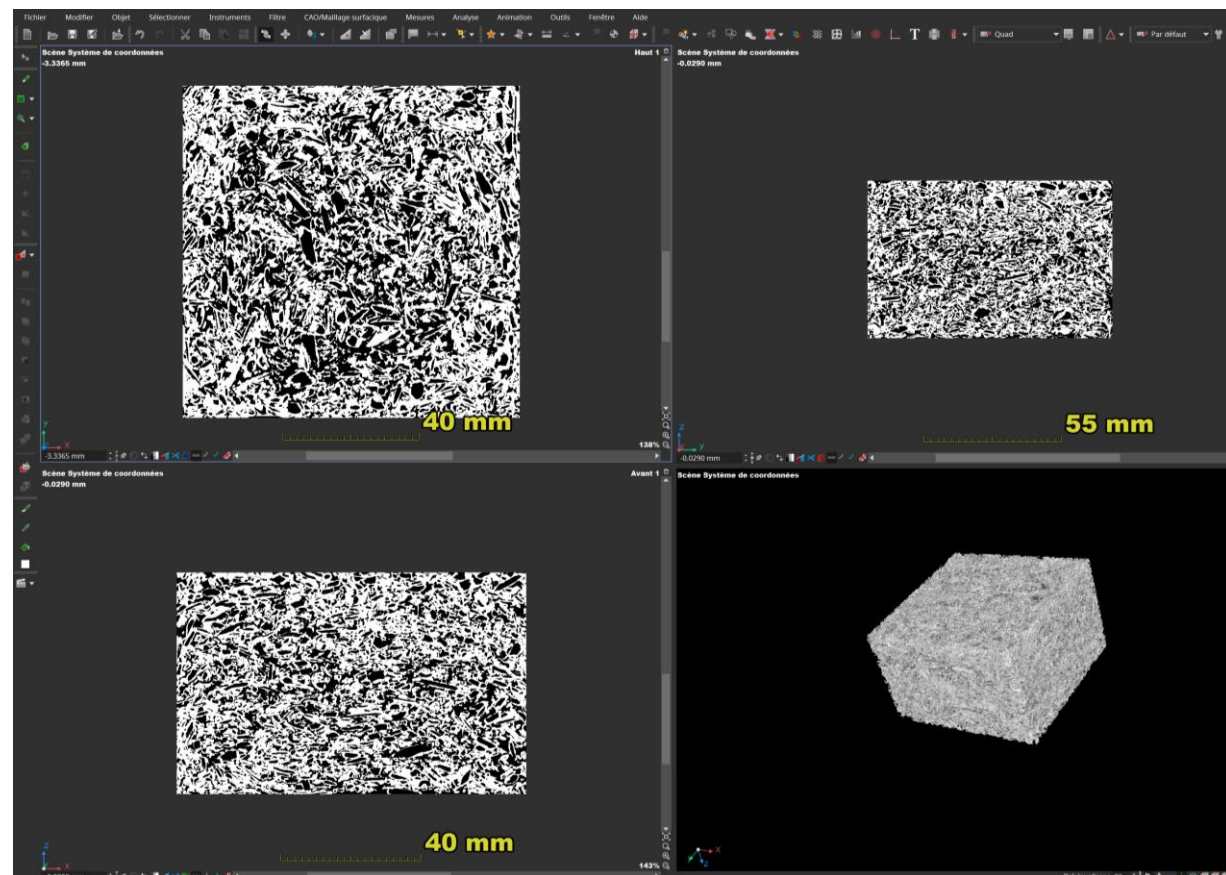






## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

➔ Revenir sur les réglages de seuillage en cherchant à obtenir la porosité totale de 81,2%



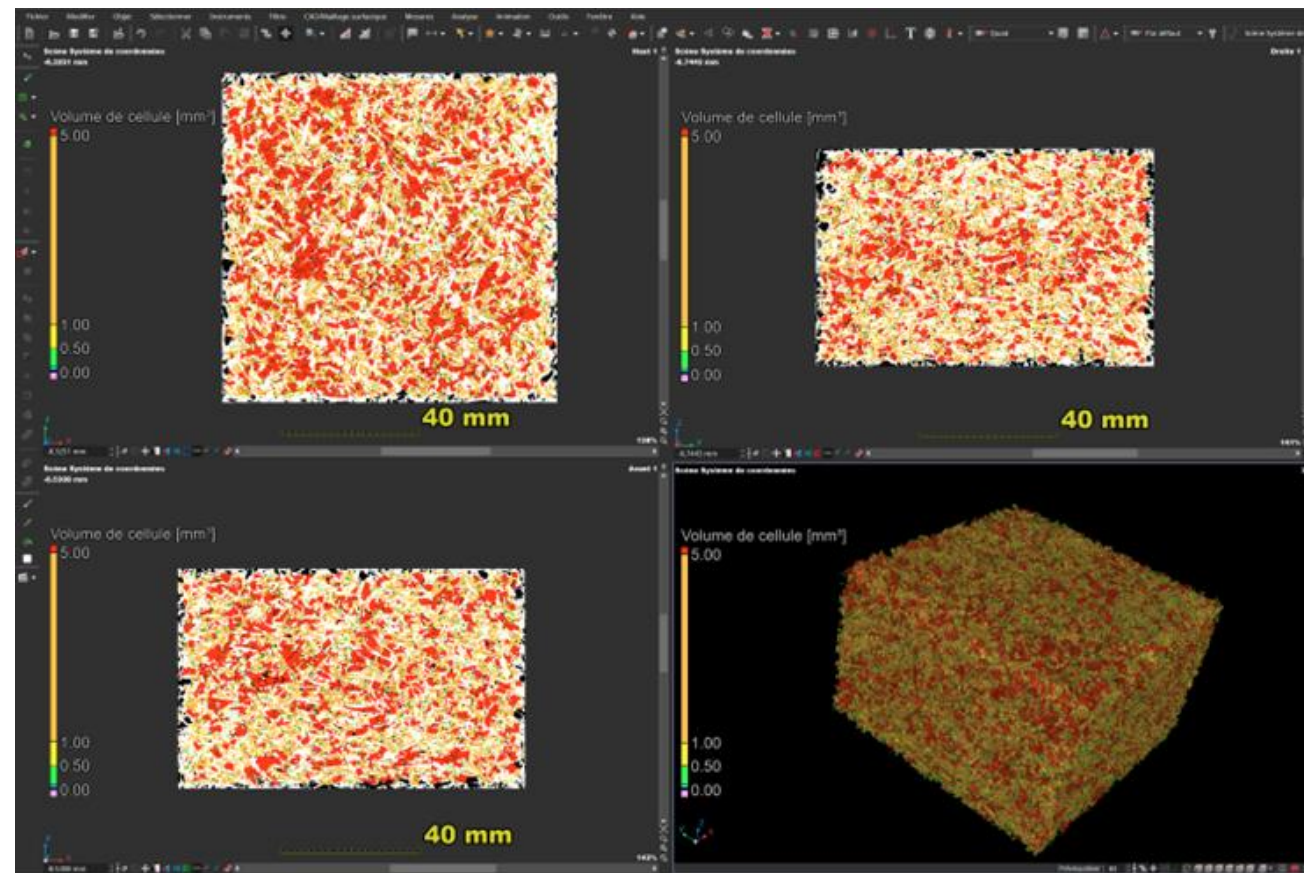
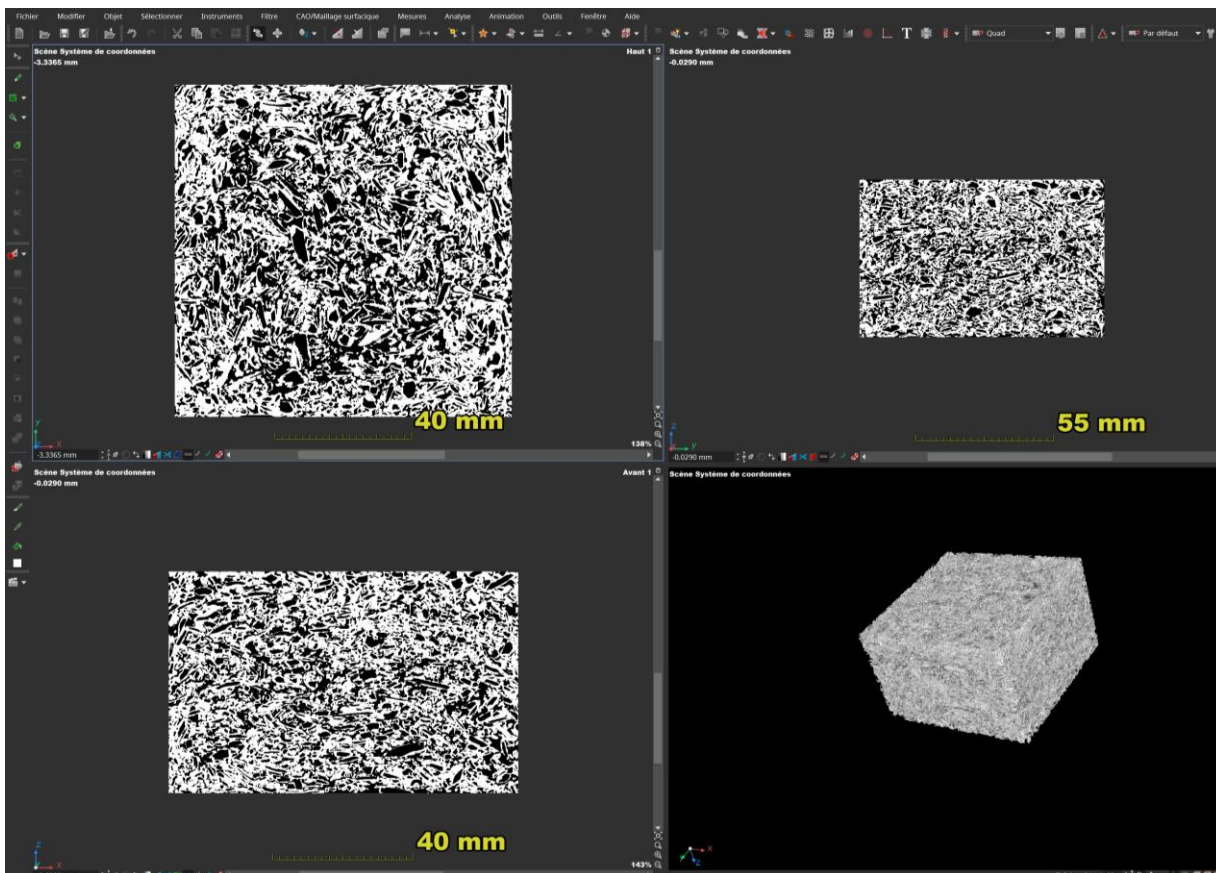




## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

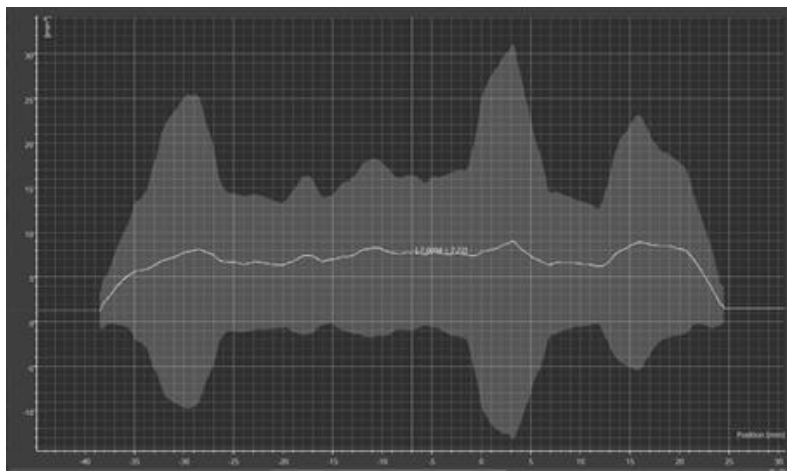
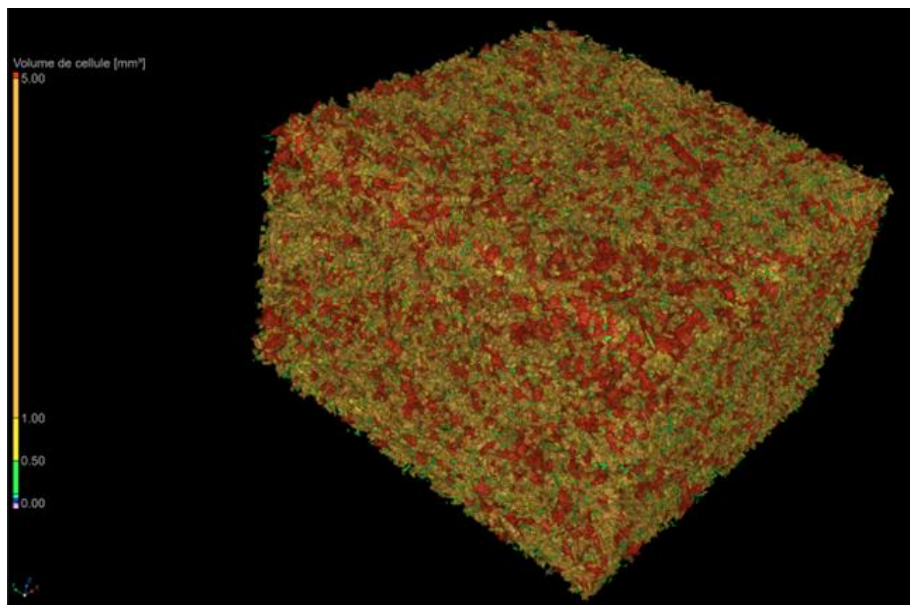
Menu propriétés : porosité = 81.2%

Module de détection des pores → cartographie



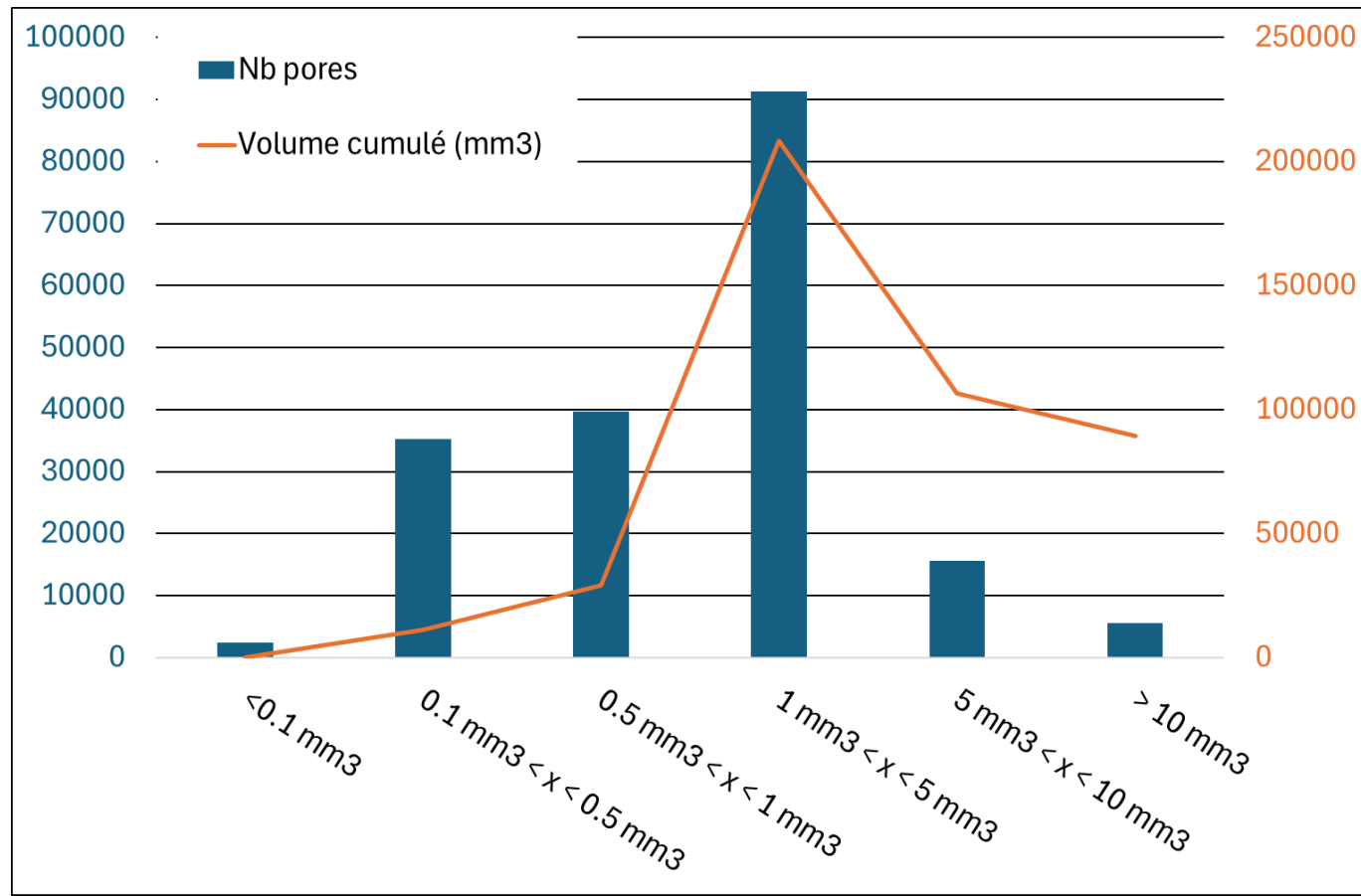


## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse



Variabilité  
directionnelle

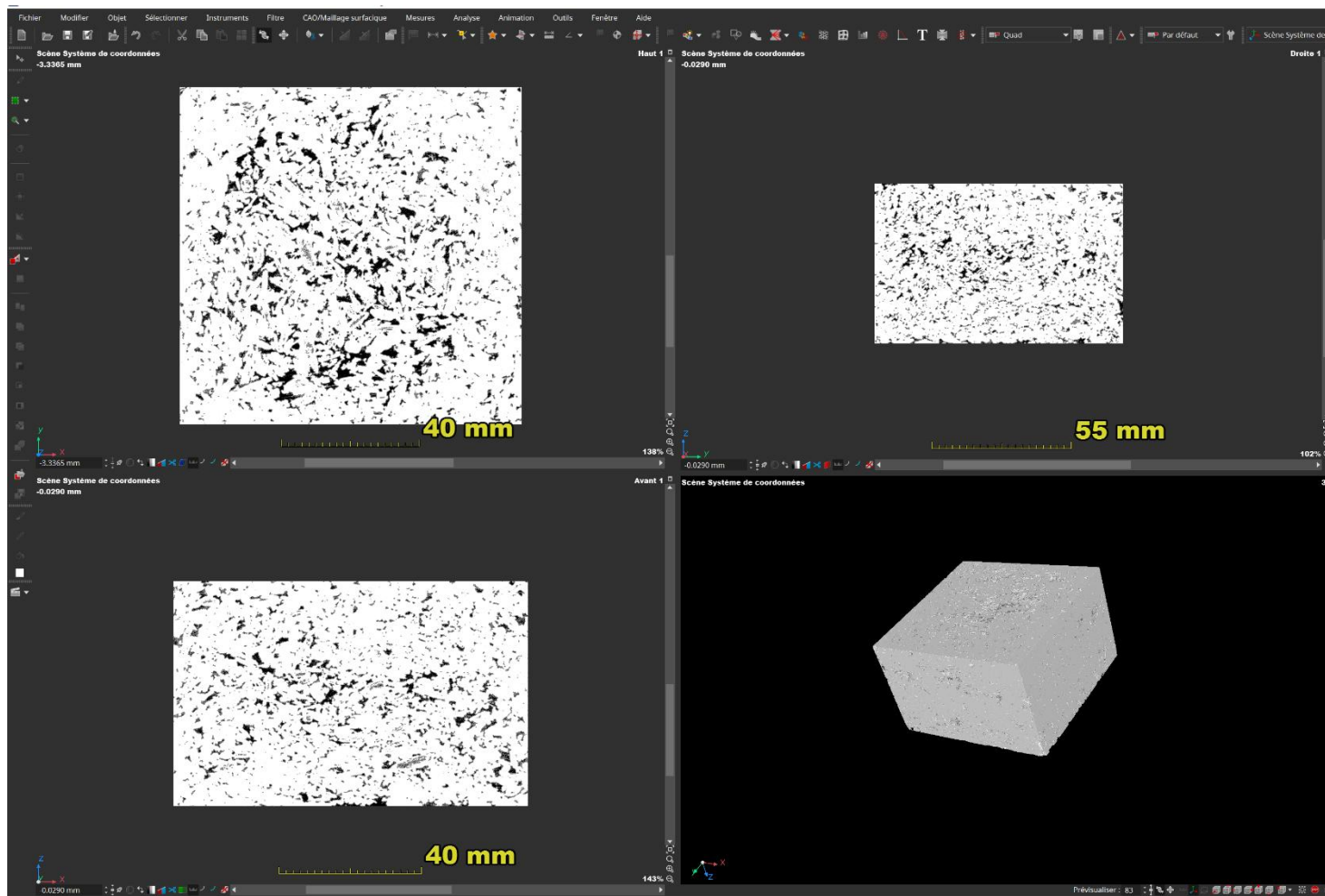
Classification de répartition des pores par intervalle de volume





# Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Analyse de la porosité matricielle ?



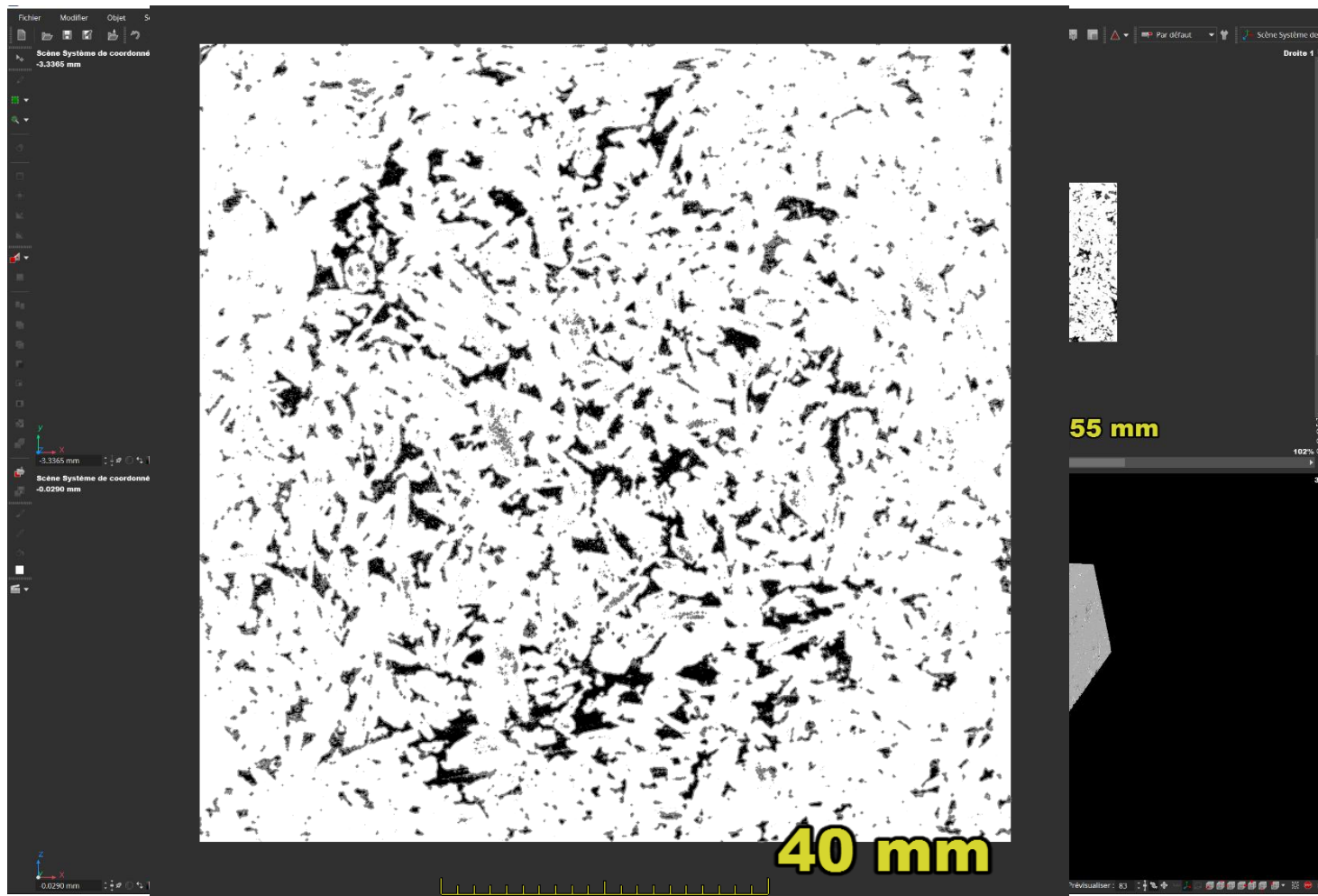
Modification du seuil pour inclure la chènevotte dans la matière





## Exemple 1 : Béton de chanvre – Du scan à un 1<sup>er</sup> niveau d'analyse

Analyse de la porosité matricielle ?



Modification du seuil pour inclure la chènevotte dans la matière

Menu propriétés :

porosité estimée = 10.0%

→ différent de la porosité calculée à partir de la porosité totale et de la porosité interne de chènevotte (38.0%)

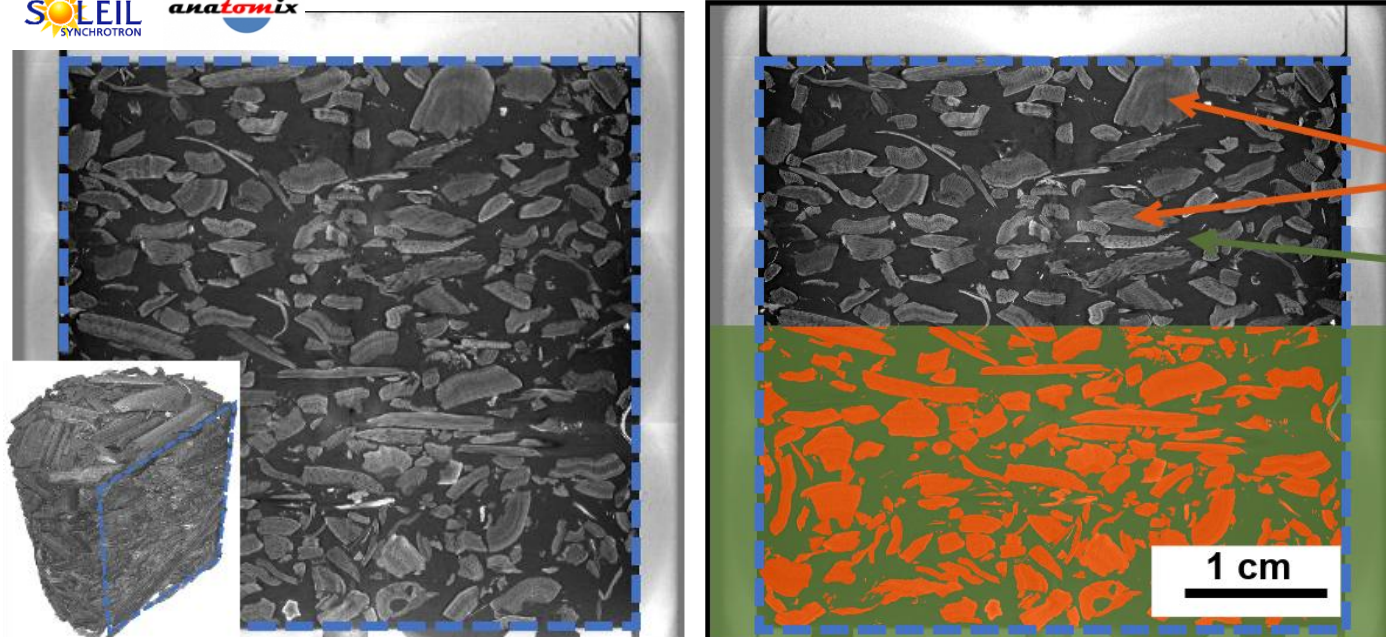
→ Contraste air / chènevotte insuffisant, segmentation impossible par seuillage simple





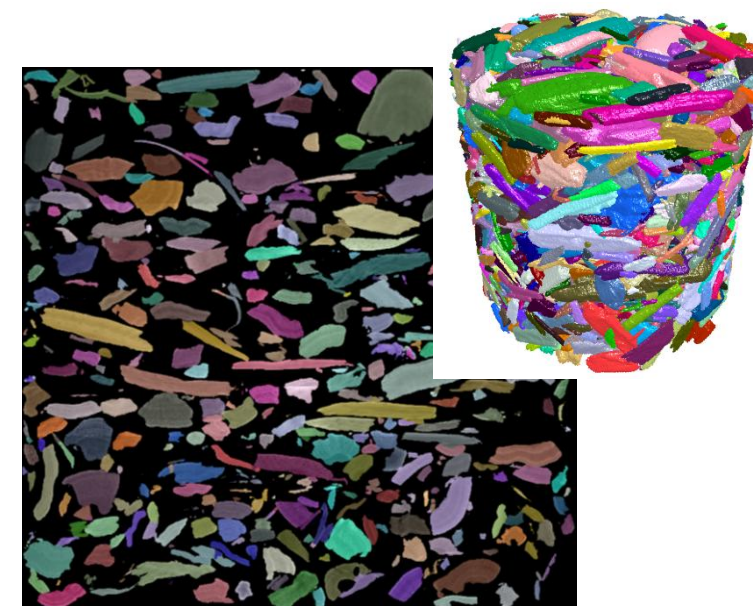
## Exemple 2 : empilement de chènevotte [Post-doc Tinhinane Chekai (Navier, Cerema, IRDL)]

### Segmentation par deep learning (IA)



Particules de  
chènevotte

Air



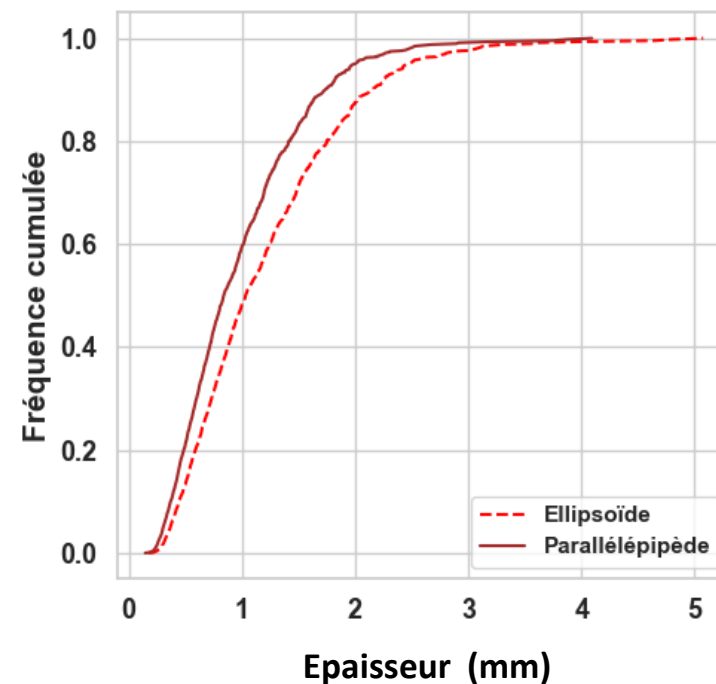
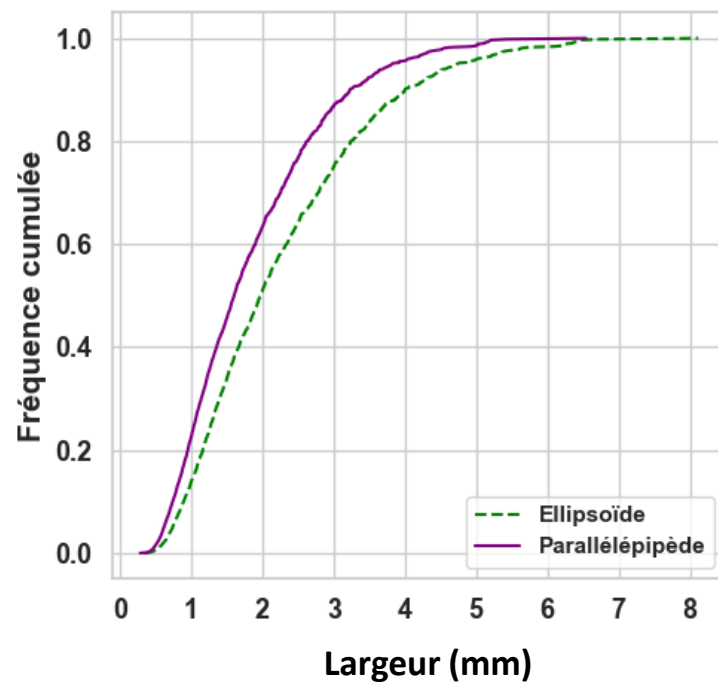
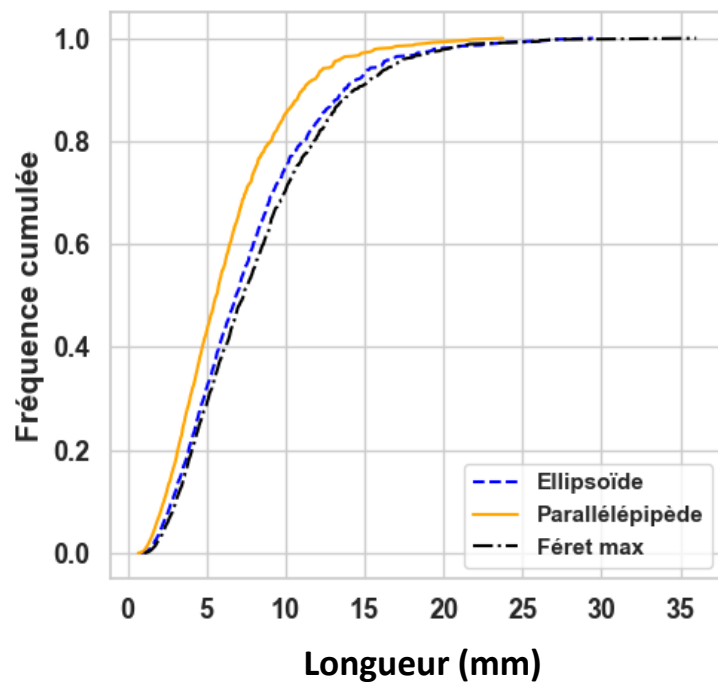
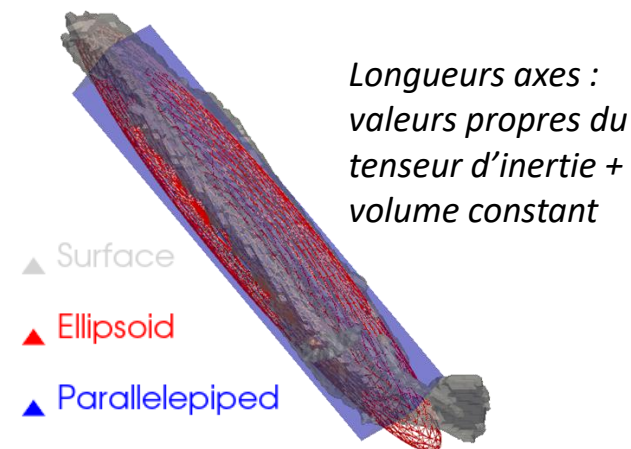
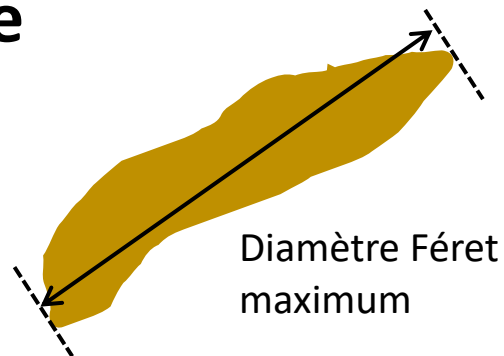
Séparation de particules 3D :  
Deep Learning + watershed

- U-Net 2.5D – modèle entraîné par l'équipe Dragonfly ORS
- Temps d'entraînement initial : 2 jours et 18 heures (+ temps d'annotation !)



## Exemple 2 : empilement de chènevotte

Mesures : tailles

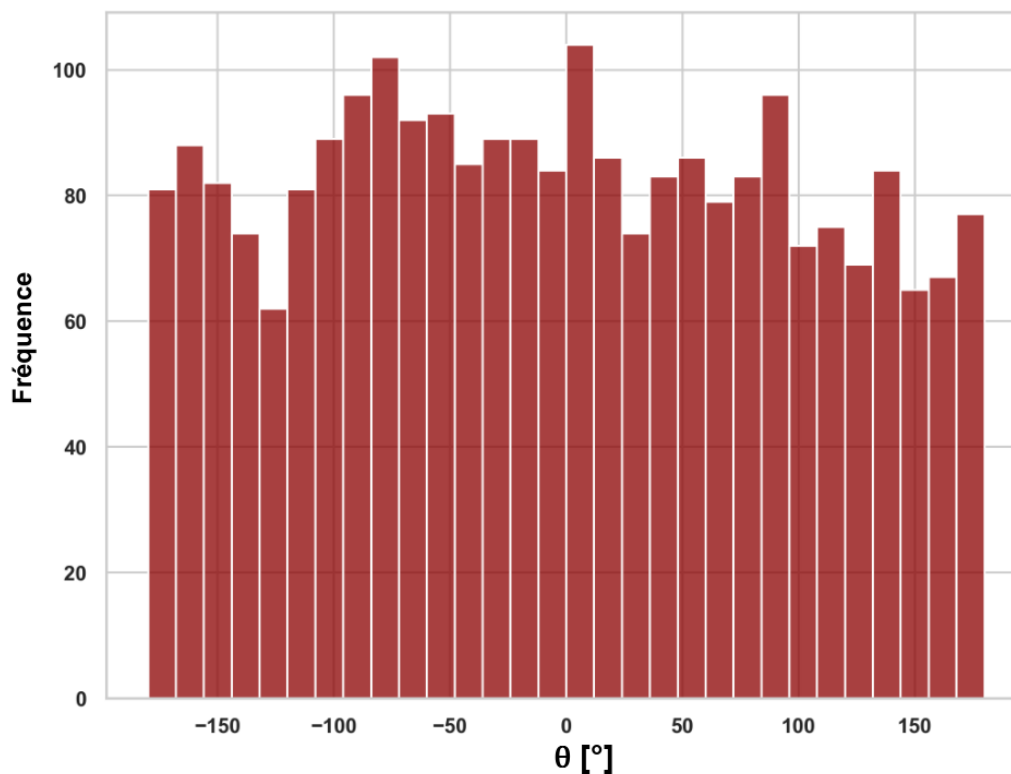
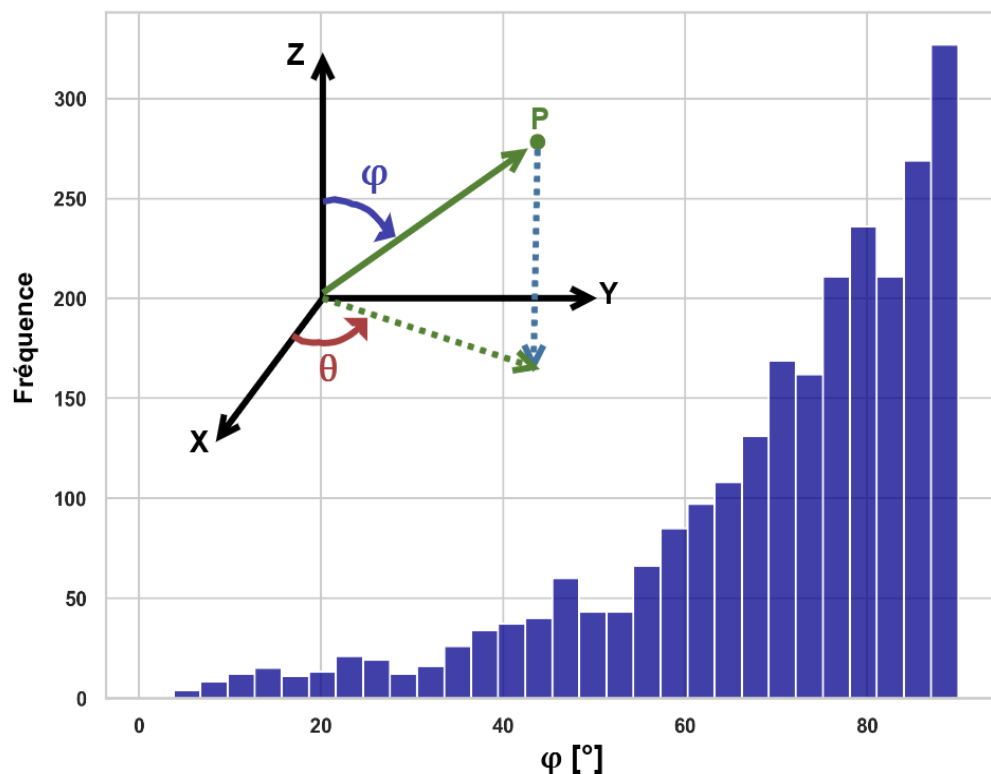




## Exemple 2 : empilement de chènevotte

Mesures : orientations

*Axe des particules issu des valeurs et vecteurs propres du tenseur d'inertie*



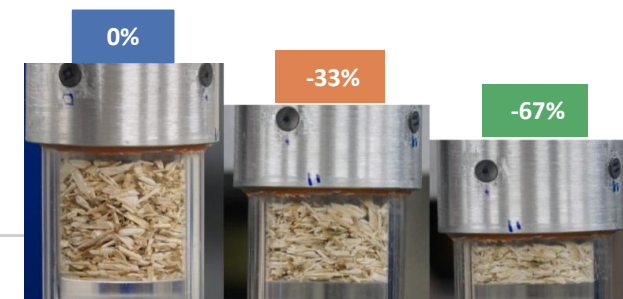
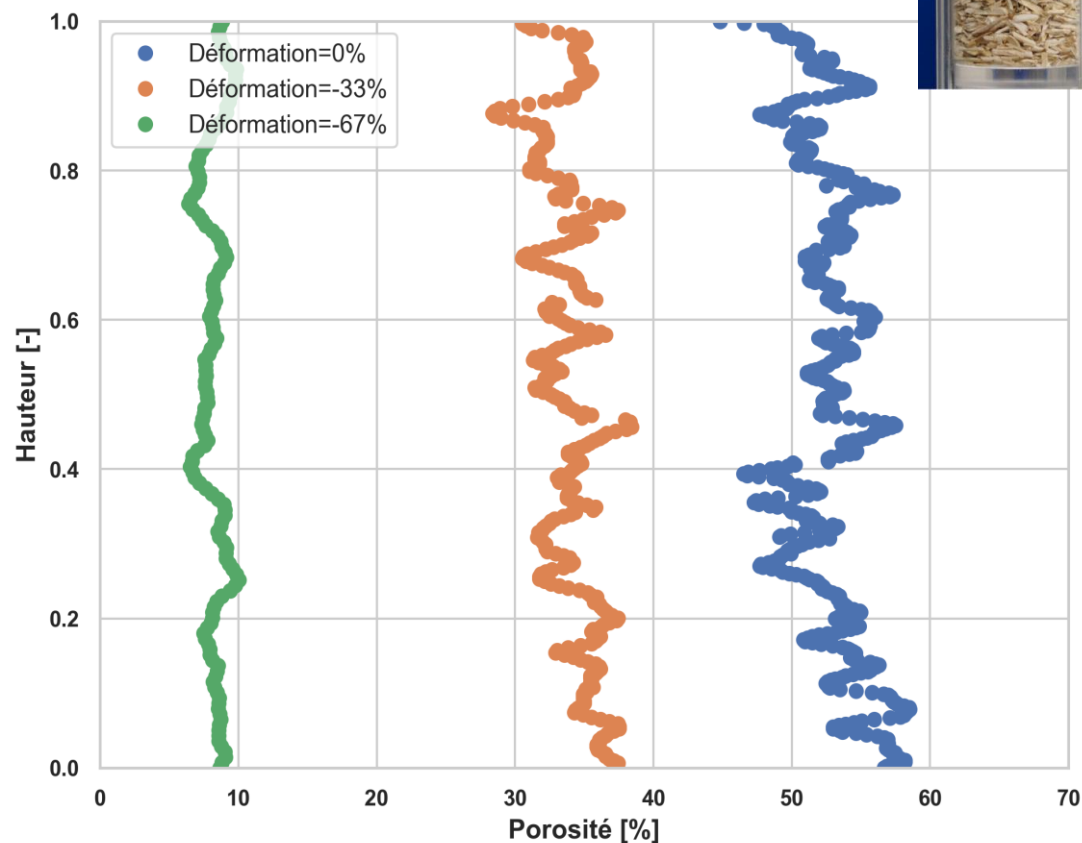
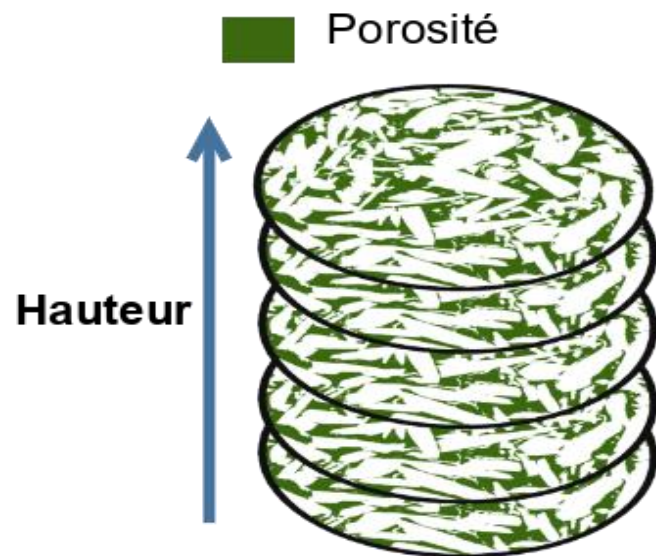
- Pas d'orientation préférentielle dans le plan horizontal
- Une orientation préférentielle de 90° par rapport à la verticale





## Exemple 2 : empilement de chènevotte

Mesures : porosité sous compression



→ Diminution homogène de la porosité dans le volume à différentes étapes de compression



## QUELQUES CONCLUSIONS

