

Etude du comportement mécanique de la neige à partir d'images micro-tomographiques

Pascal Hagenmuller

UR ETGR Erosion torrentielle, neige et avalanches, Irstea, Centre de Grenoble
Centre d'Etudes de la Neige, Météo-France / CNRS, Grenoble



Guillaume Chambon
Mohamed Naaim

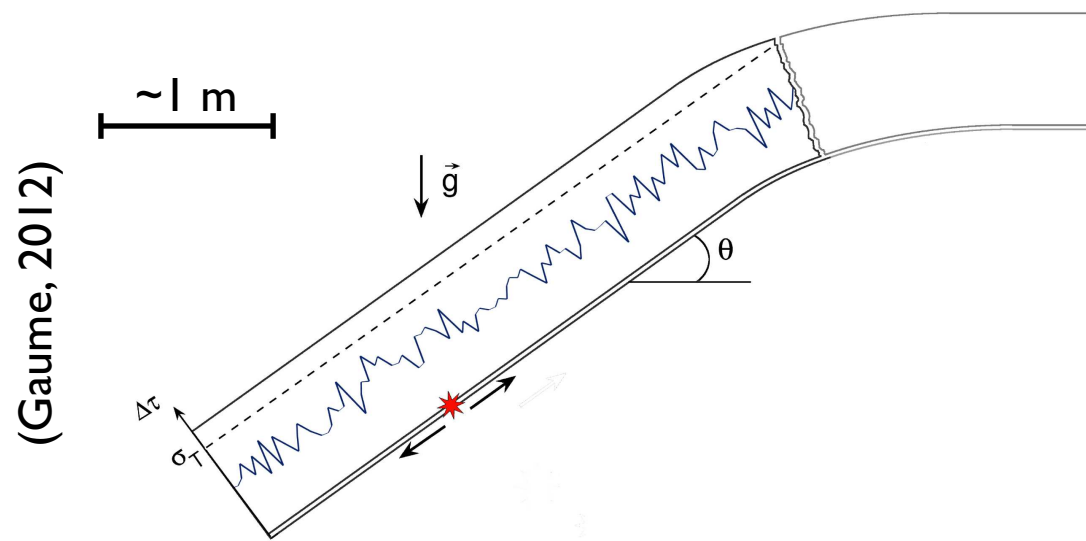


Frédéric Flin
Samuel Morin
Equipe « Manteau neigeux »



Contexte

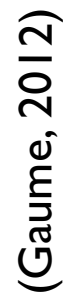
Avalanche:
modèle à l'échelle de la plaque



Contexte

Avalanche:

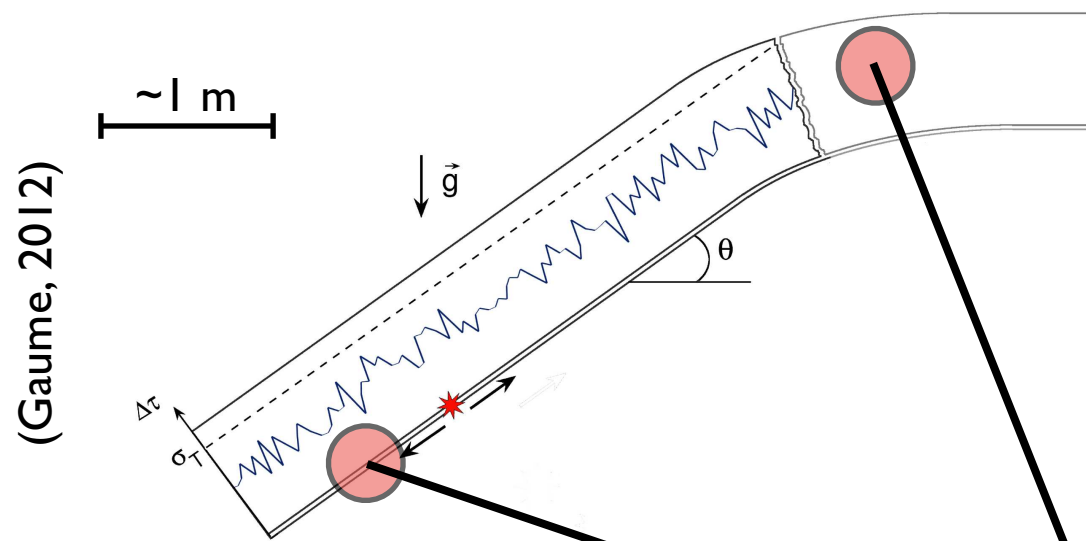
modèle à l'échelle de la plaque



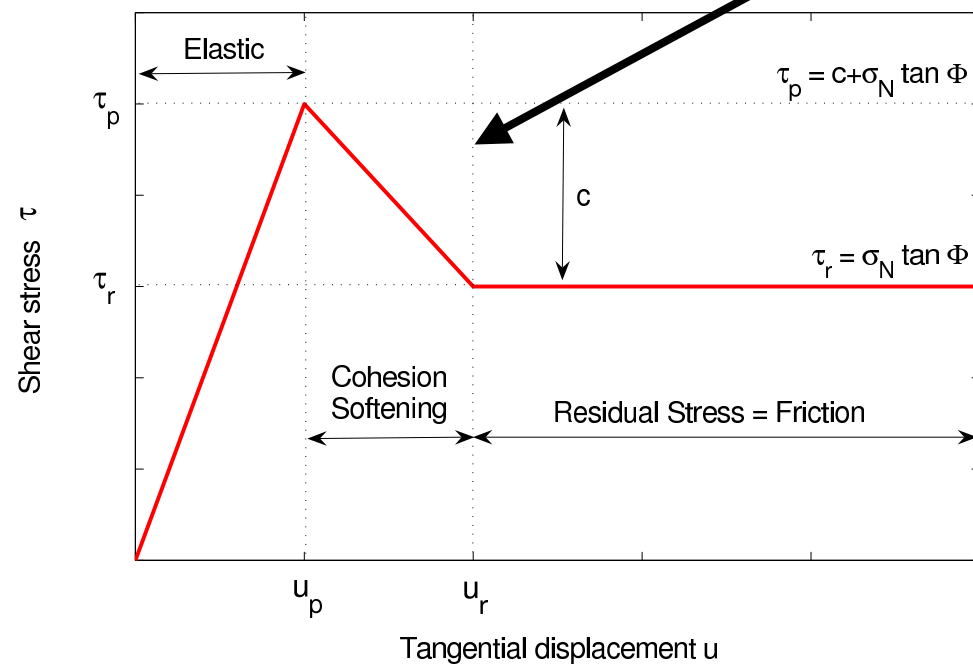
« Ingrédients » mécaniques à l'échelle du matériau neige

Contexte

Avalanche:
modèle à l'échelle de la plaque

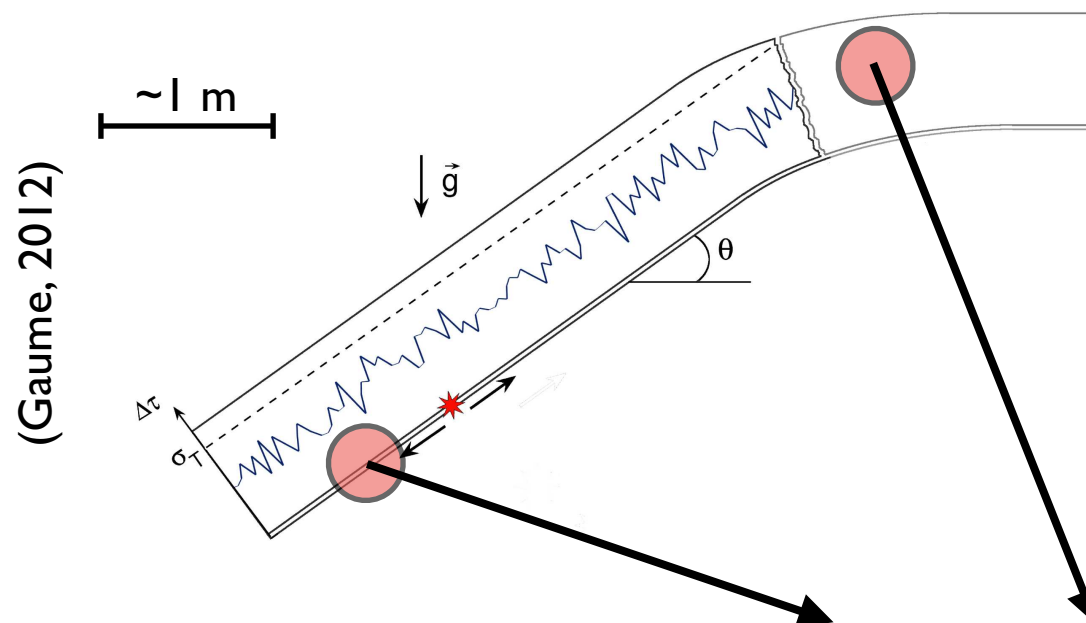


« Ingrédients » mécaniques à
l'échelle du matériau neige

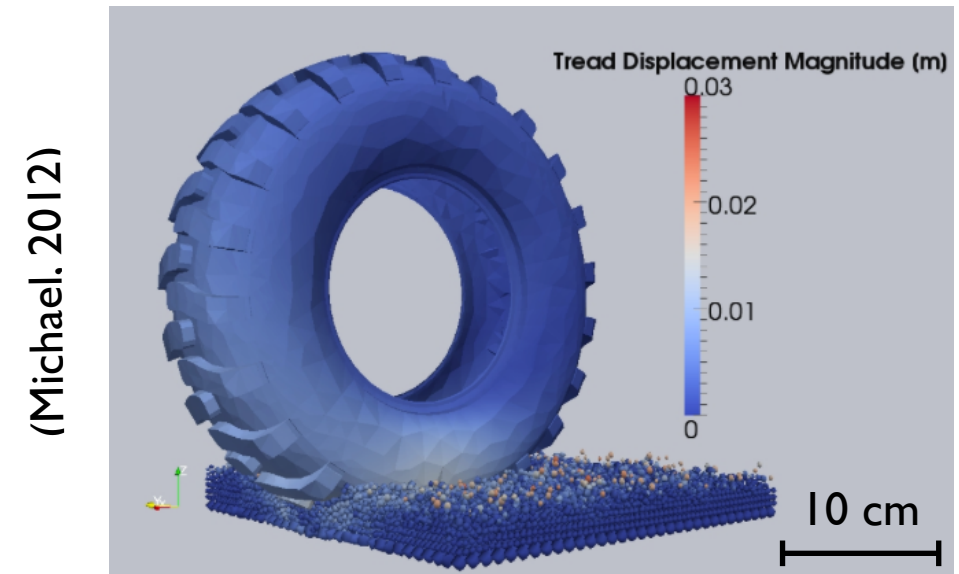


Contexte

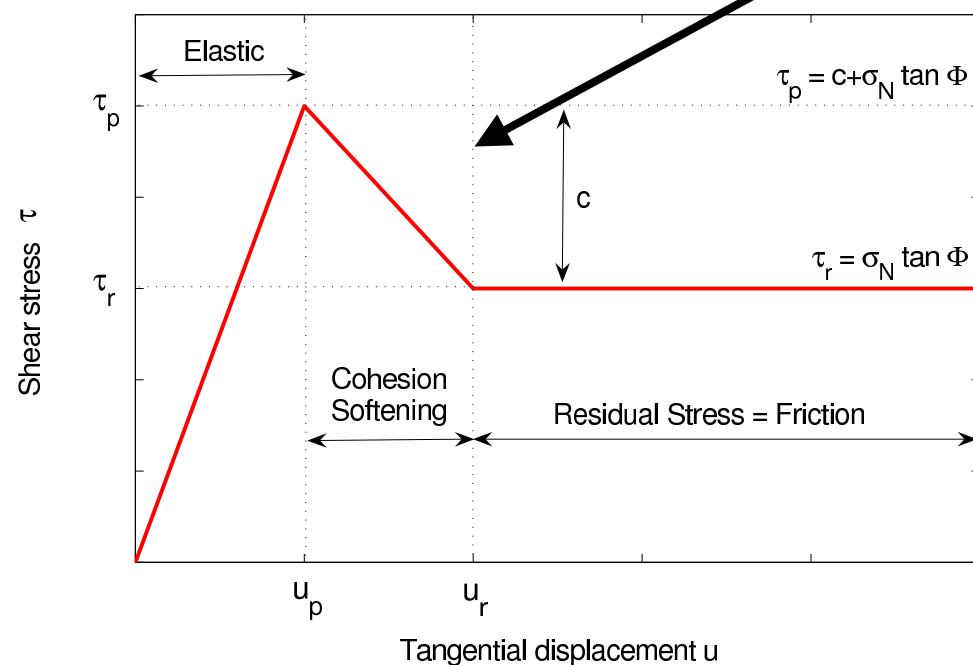
Avalanche:
modèle à l'échelle de la plaque



Interaction pneu/neige:
modèle à l'échelle du pneu

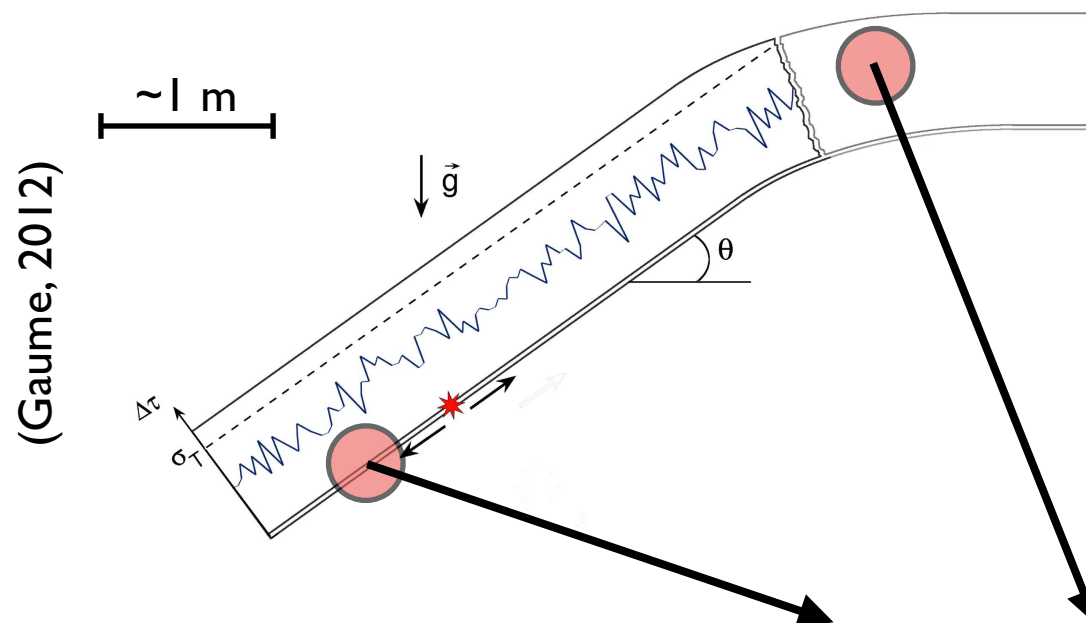


« Ingrédients » mécaniques à
l'échelle du matériau neige

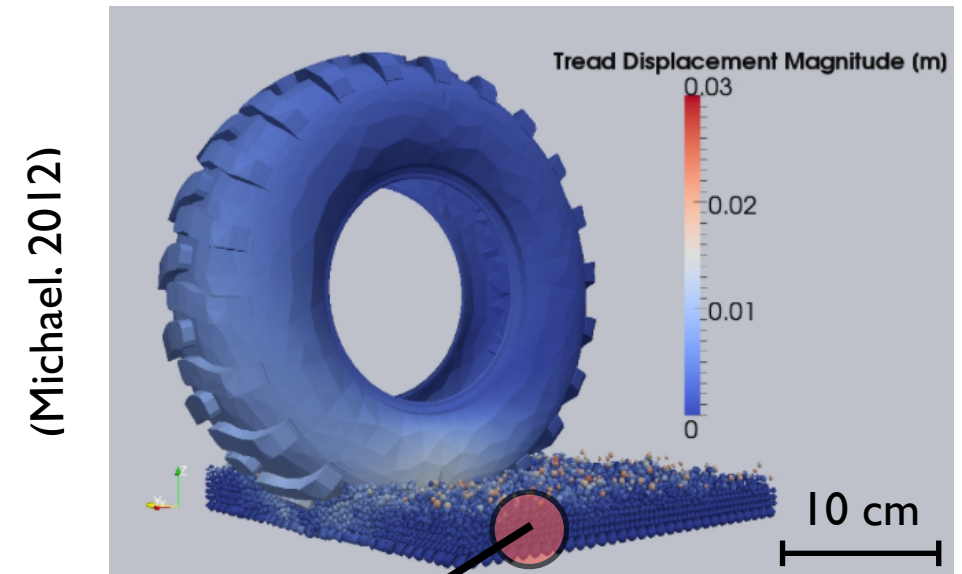


Contexte

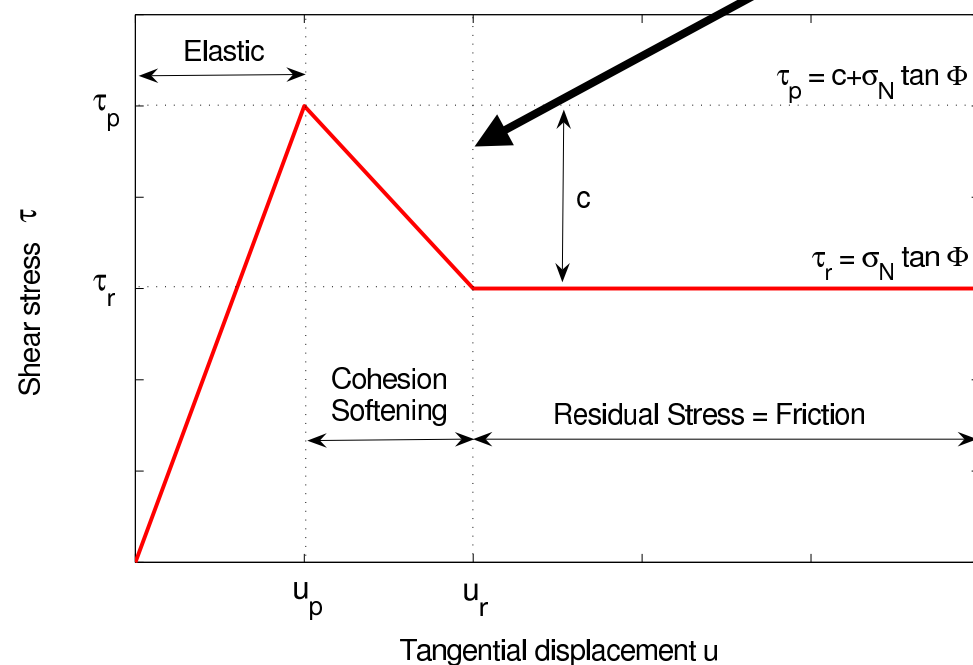
Avalanche:
modèle à l'échelle de la plaque



Interaction pneu/neige:
modèle à l'échelle du pneu

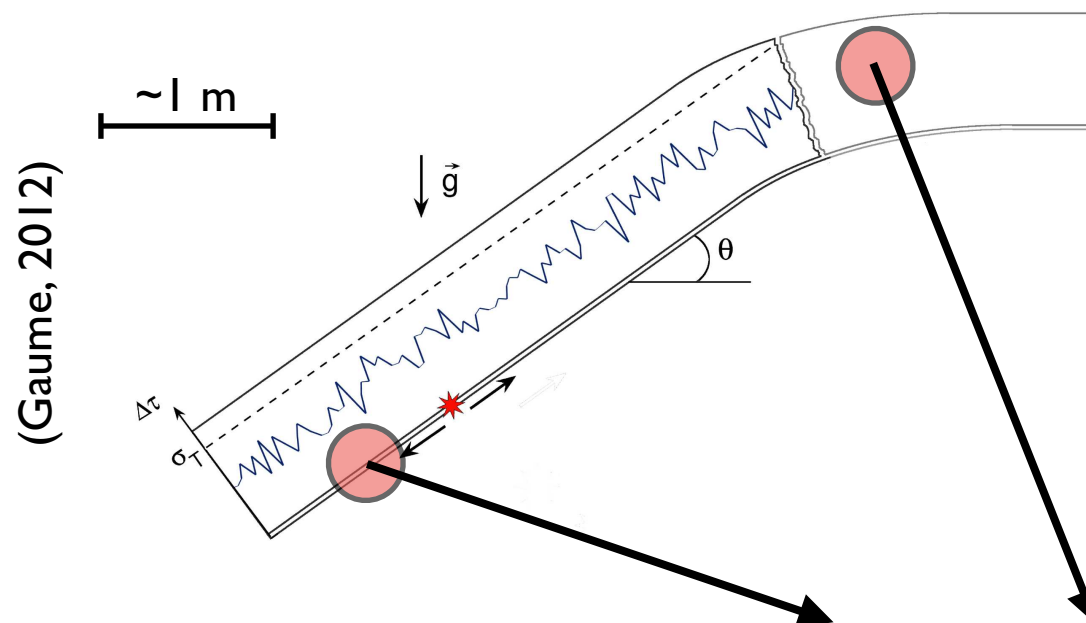


« Ingrédients » mécaniques à
l'échelle du matériau neige

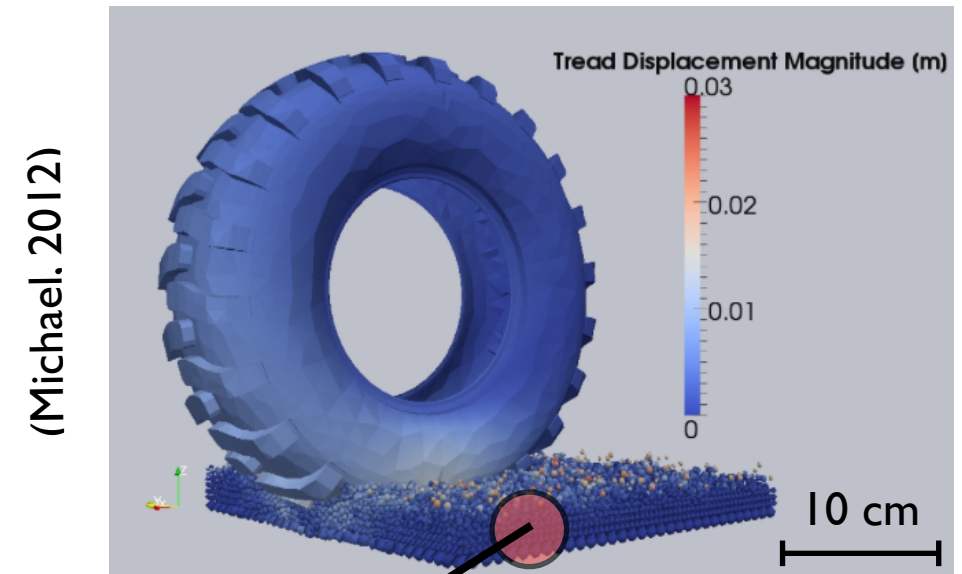


Contexte

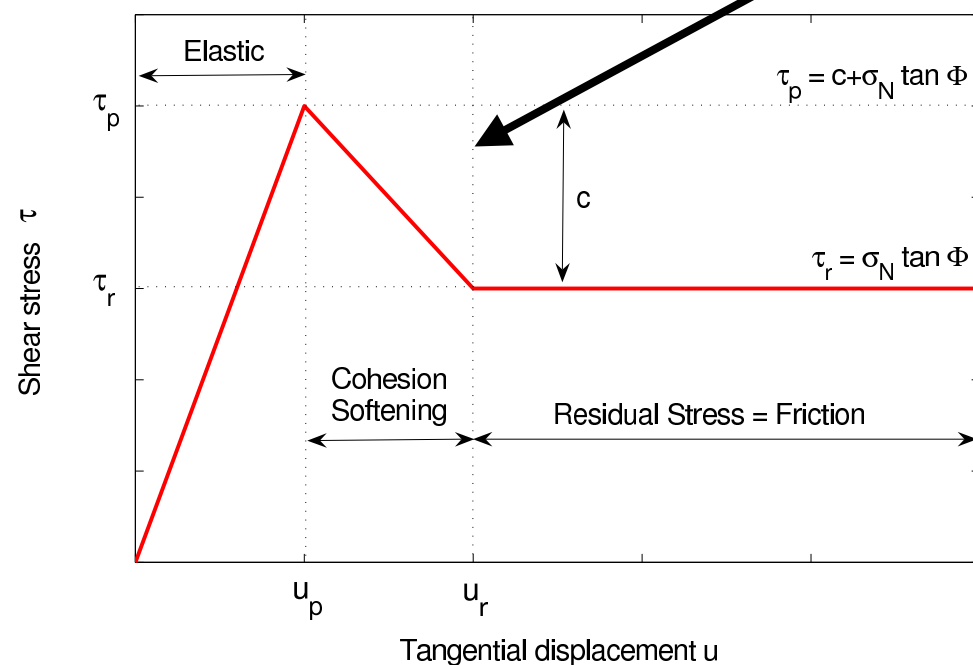
Avalanche:
modèle à l'échelle de la plaque



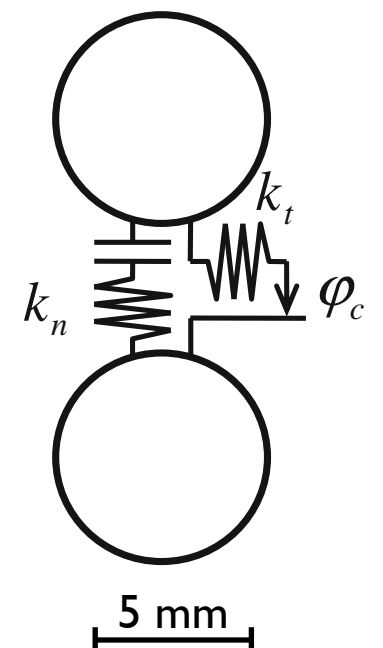
Interaction pneu/neige:
modèle à l'échelle du pneu



« Ingrédients » mécaniques à
l'échelle du matériau neige



Loi de contact
« phénoménologique »



Contexte

But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

1 mm

1 mm

1 mm

Contexte

But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

→ **DES** matériaux neiges !!!

1 mm

1 mm

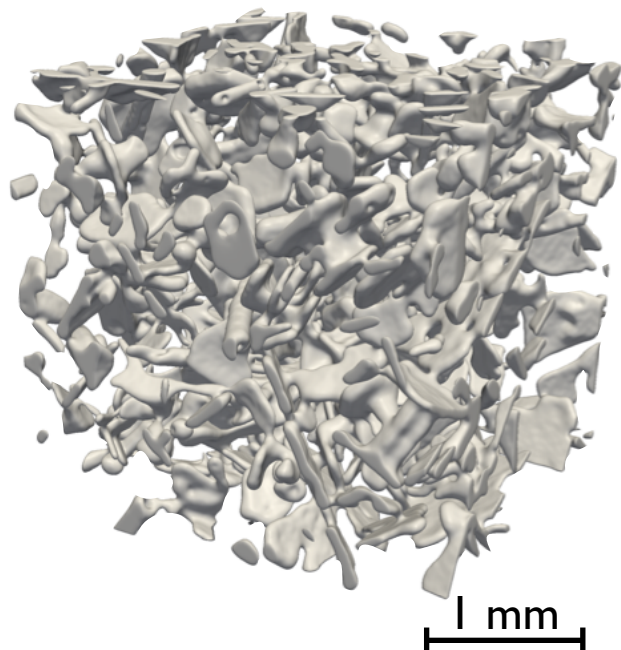
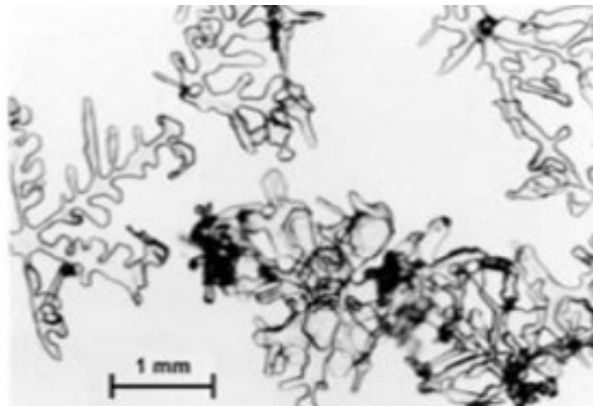
1 mm

Contexte

But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

→ **DES** matériaux neiges !!!

Neige fraîche



1 mm

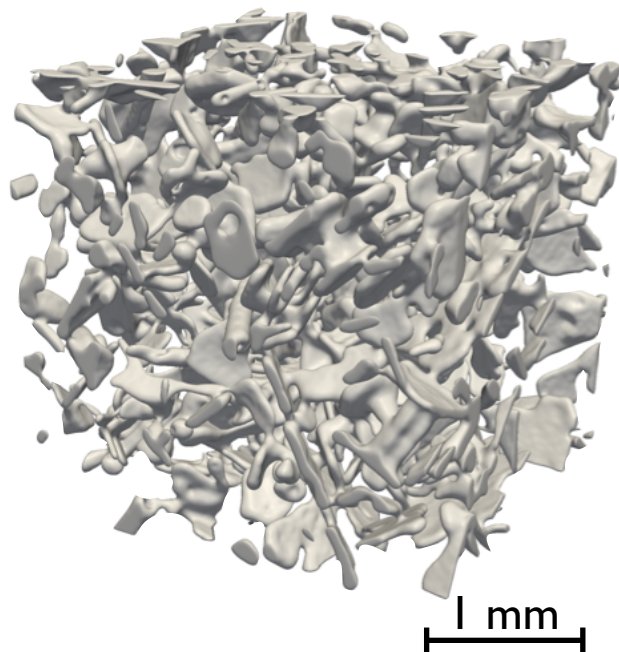
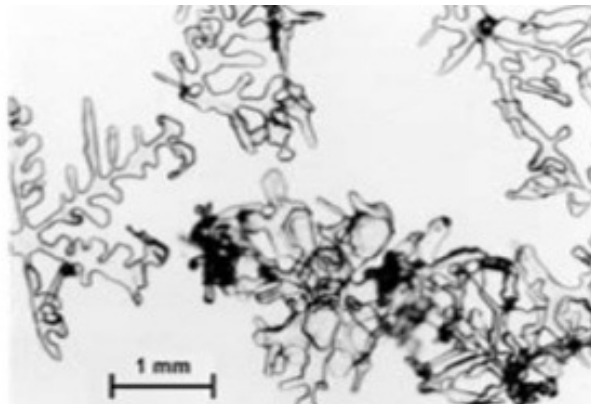
1 mm

Contexte

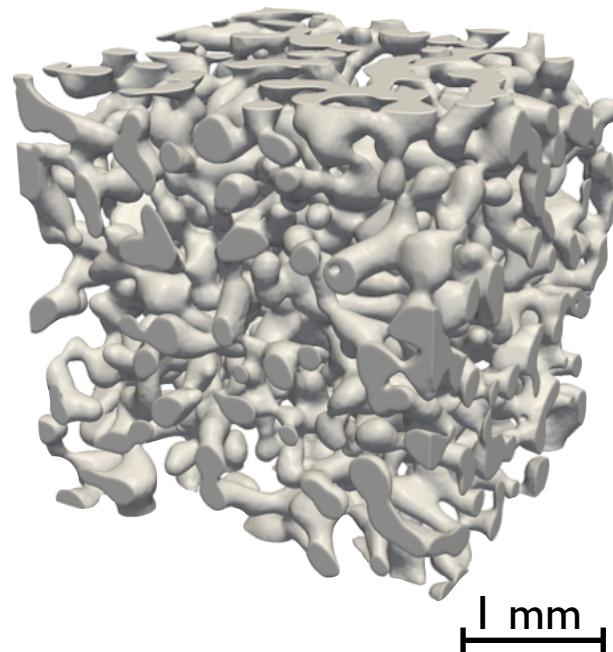
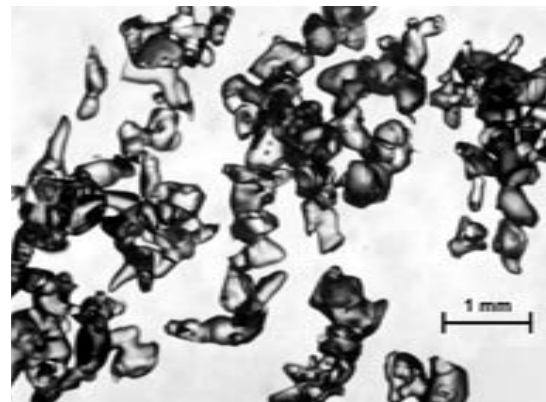
But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

→ **DES** matériaux neiges !!!

Neige fraîche



Grains fins



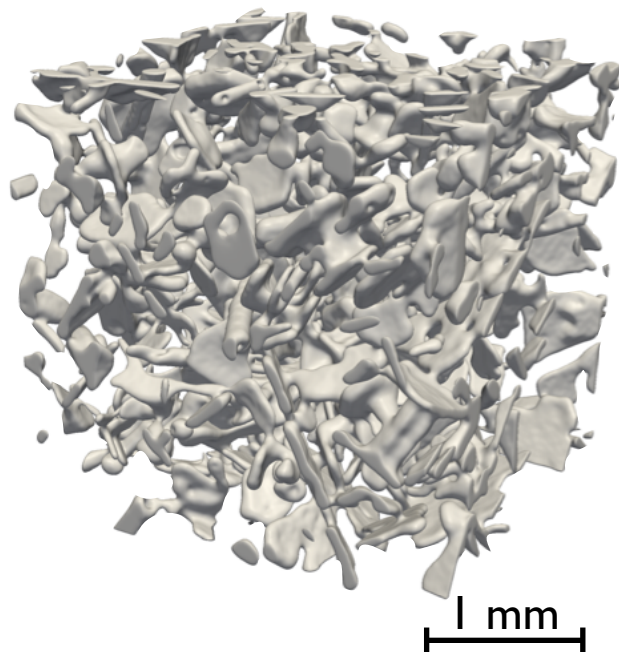
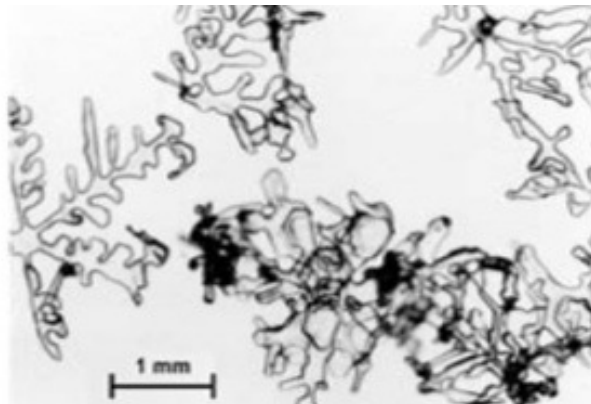
1 mm

Contexte

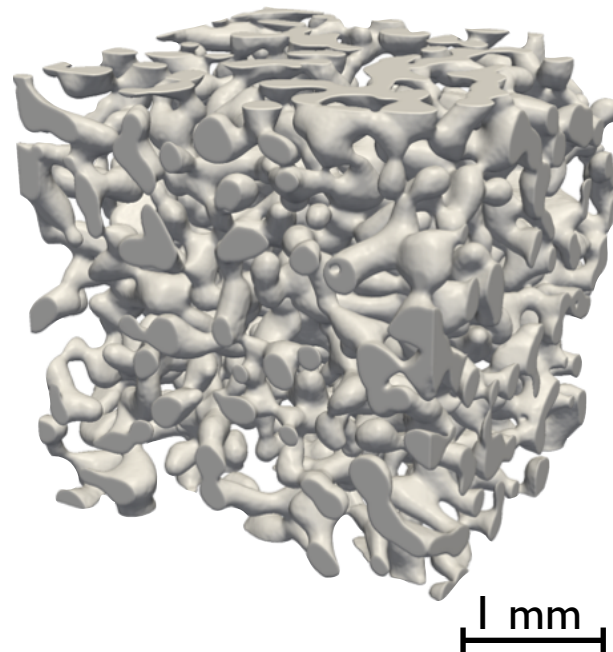
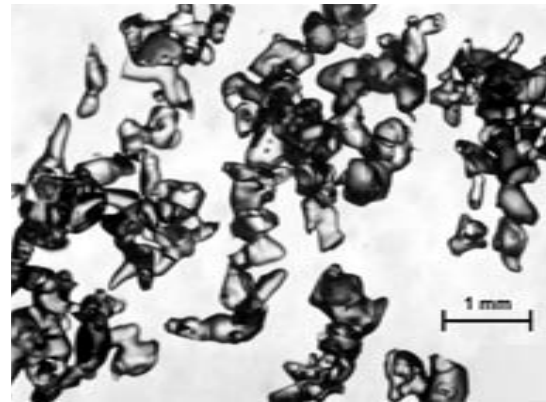
But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

→ **DES** matériaux neiges !!!

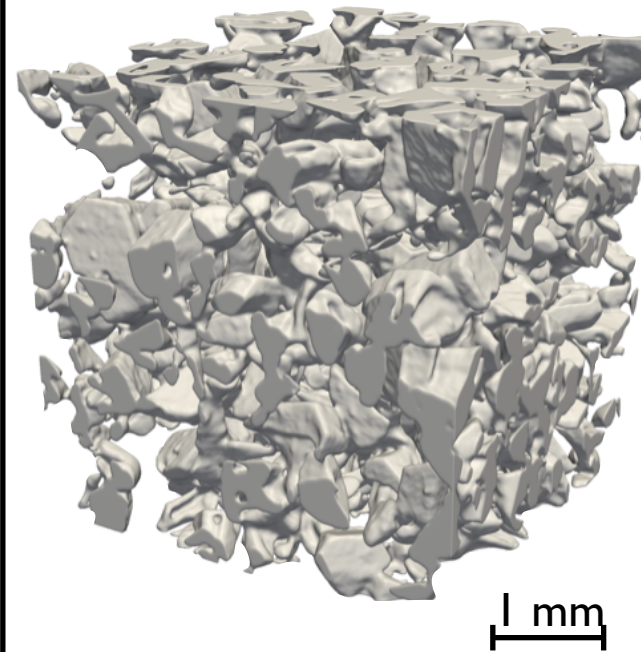
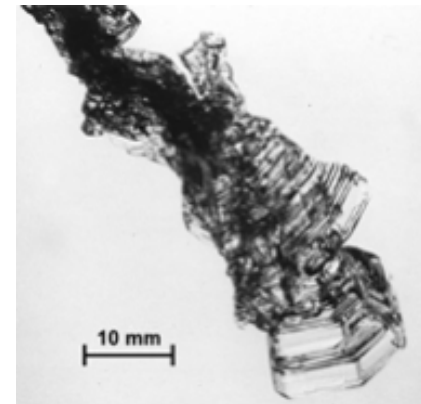
Neige fraîche



Grains fins



Givre de profondeur

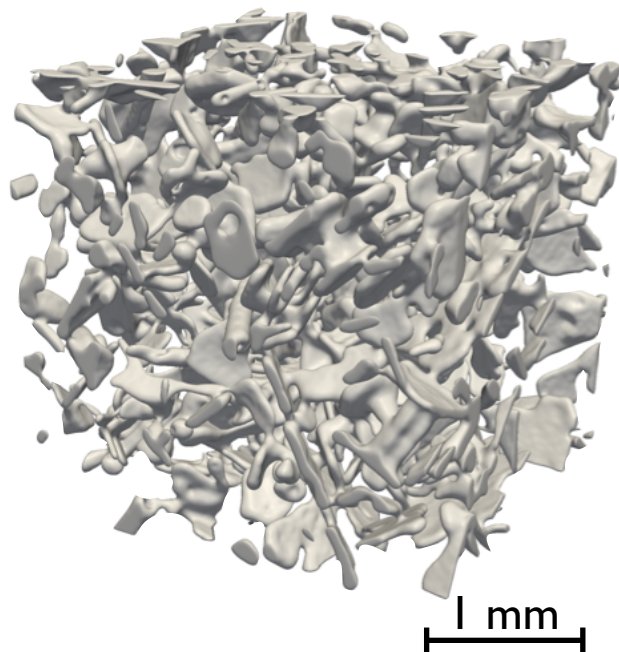
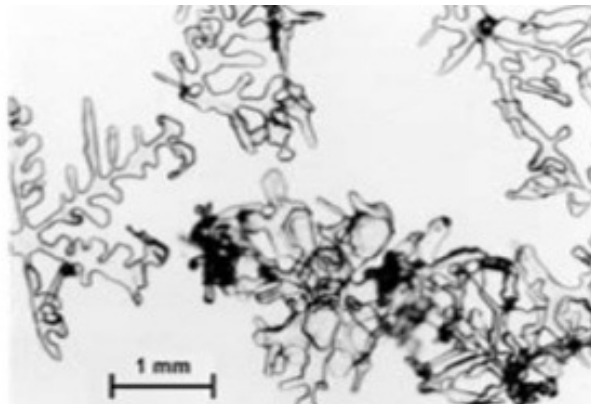


Contexte

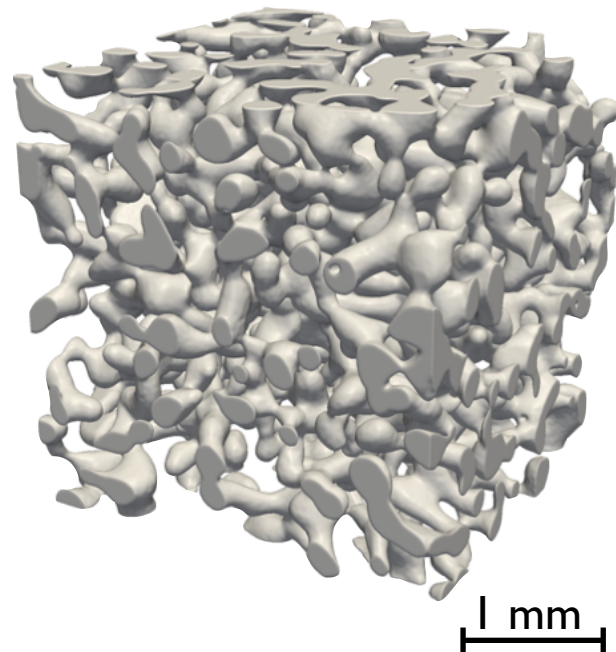
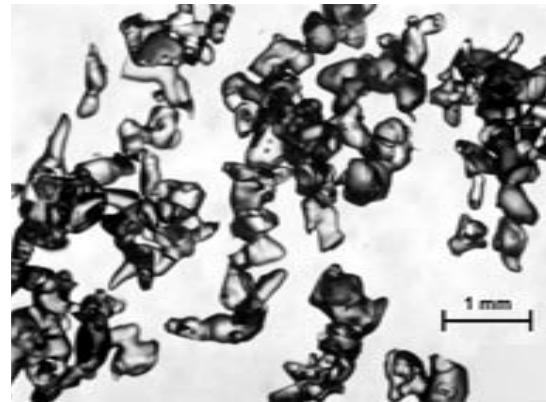
But: déterminer loi de comportement mécanique du matériau neige

→ **DES** matériaux neiges !!!

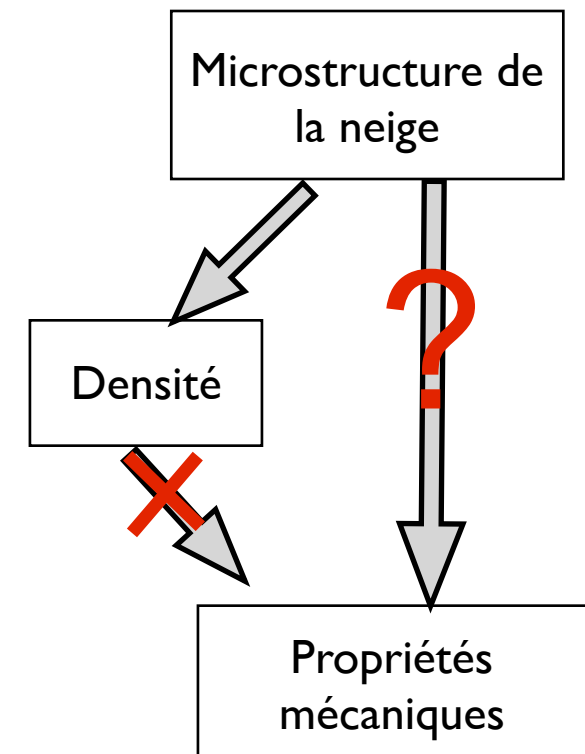
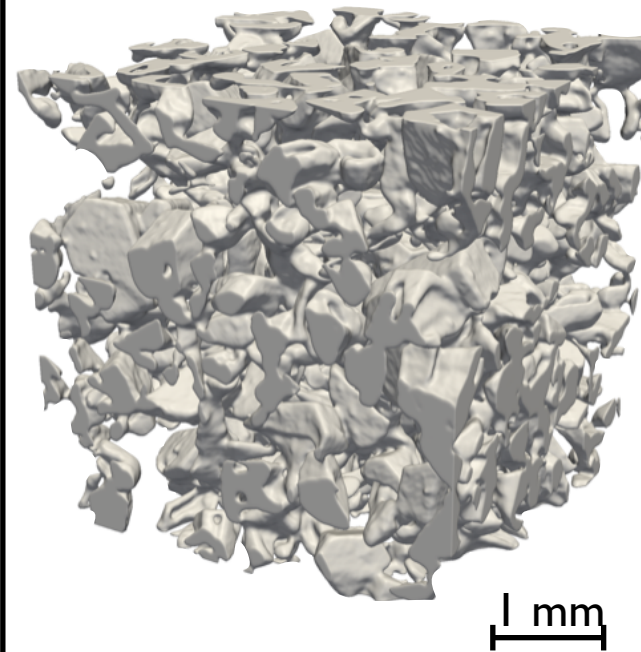
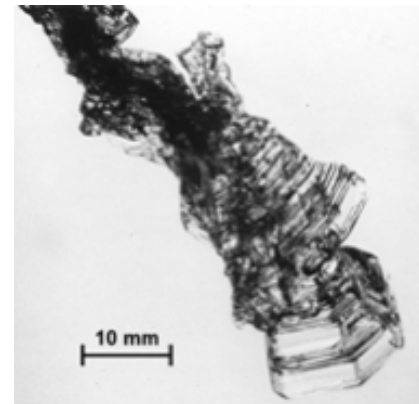
Neige fraîche



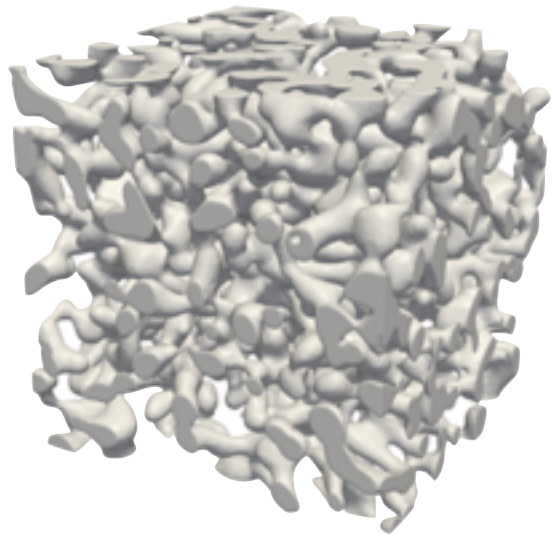
Grains fins



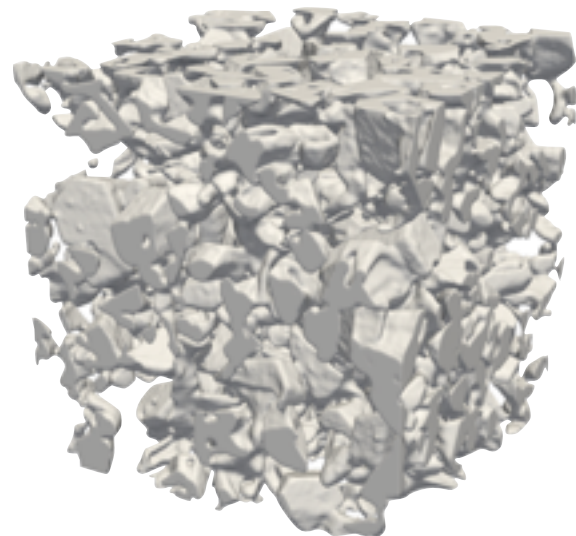
Givre de profondeur



Problématique



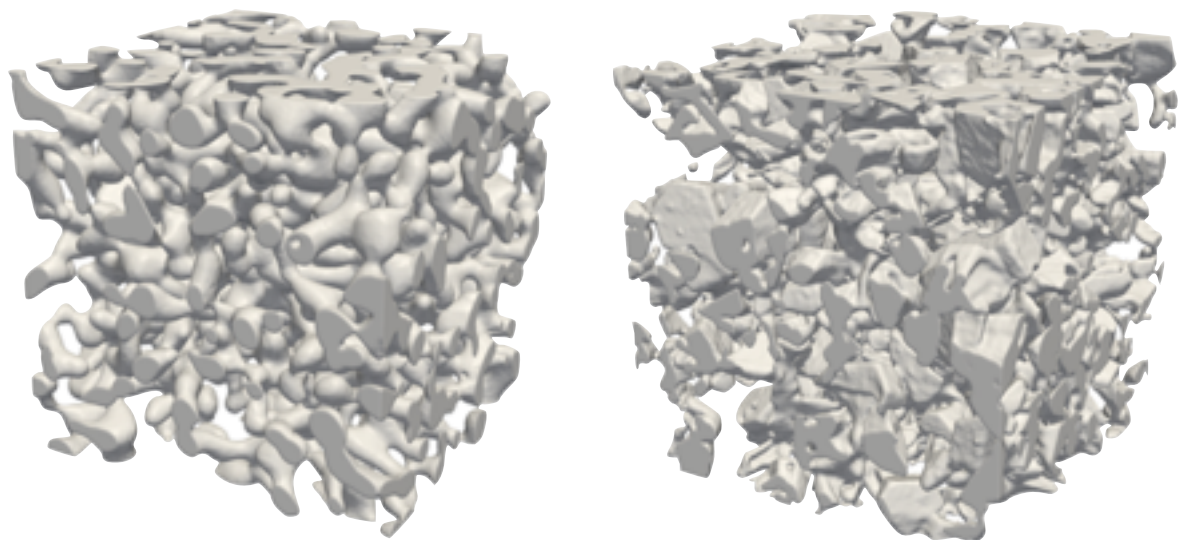
Grains fins



Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)

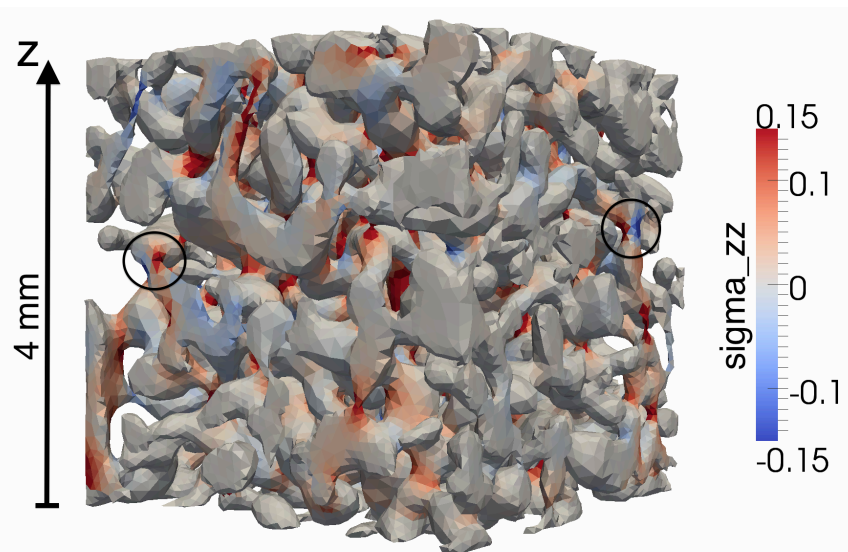
Problématique



Grains fins

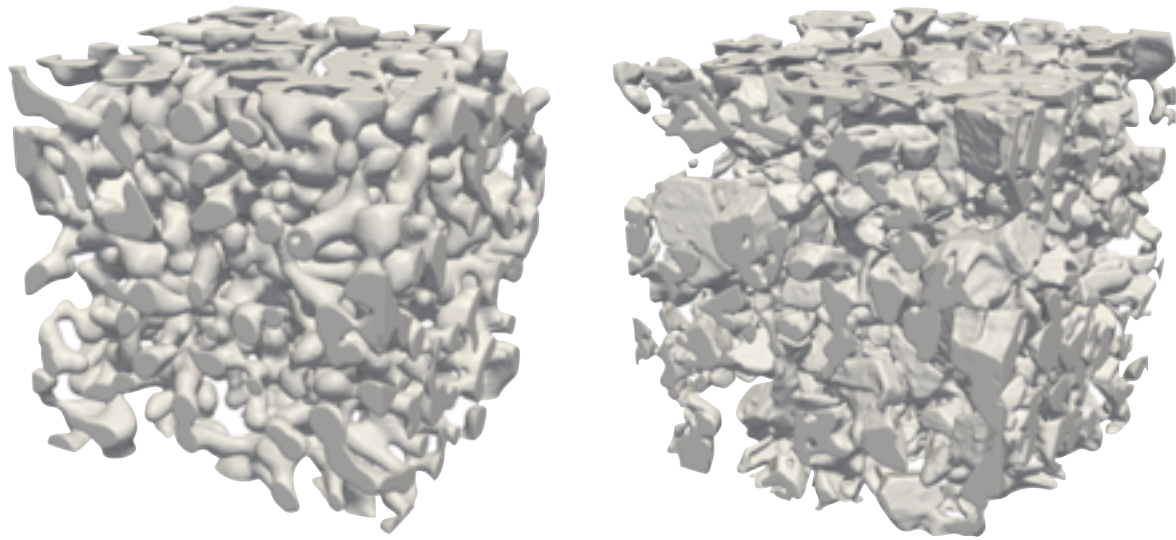
Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)



Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)

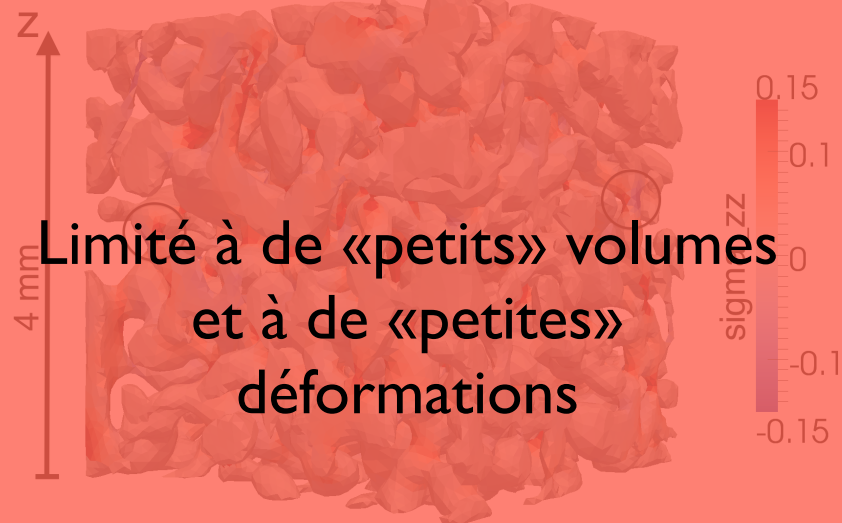
Problématique



Grains fins

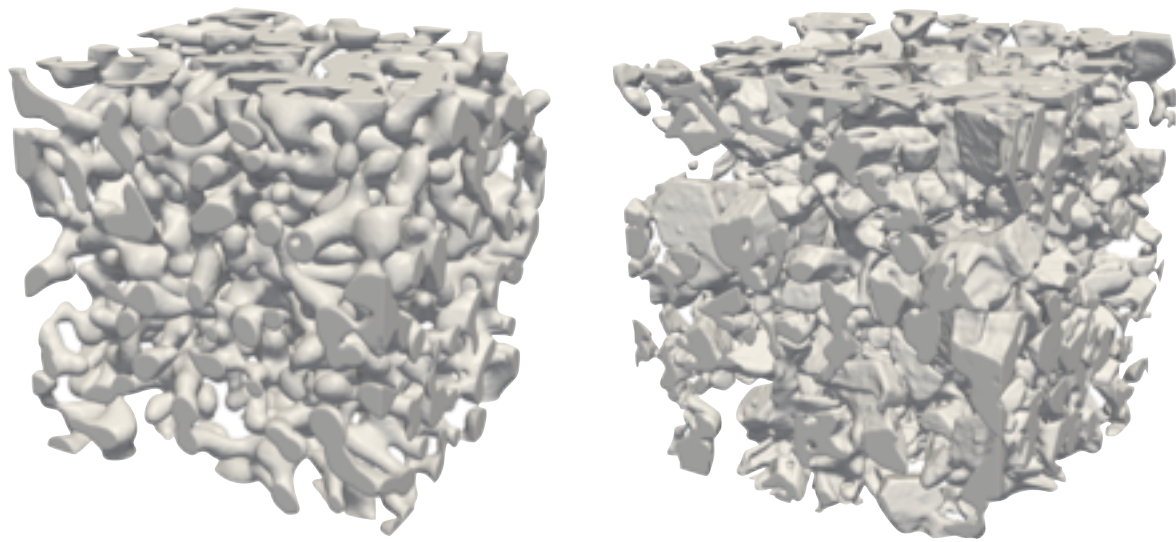
Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)



Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)

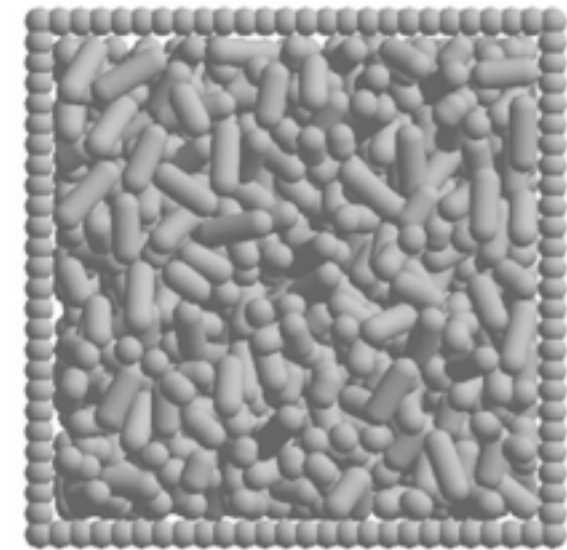
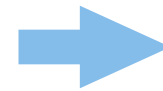
Problématique



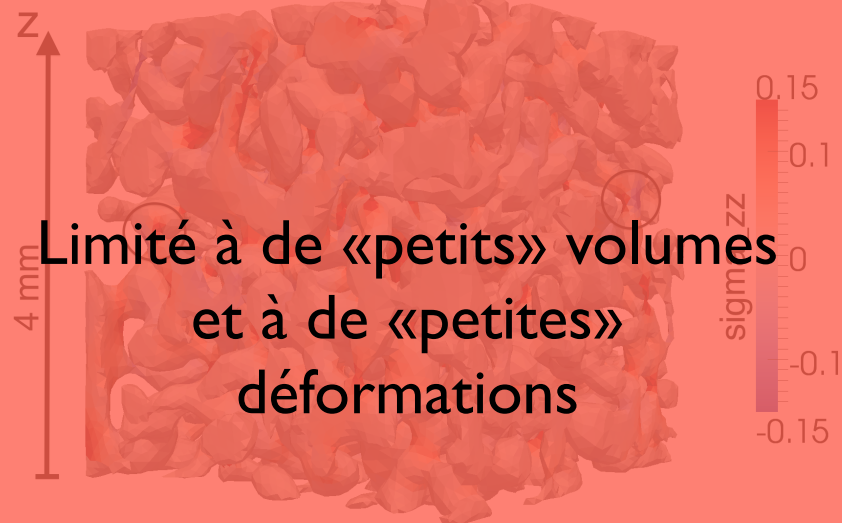
Grains fins

Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)

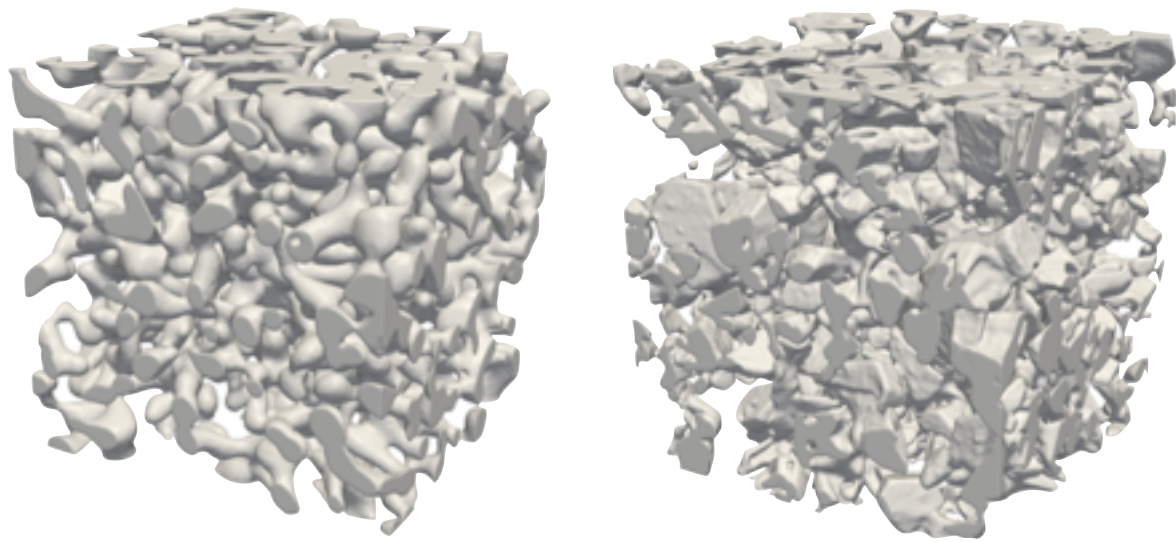


Description granulaire «conceptuelle»
(Johnson et al, 2005)



Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)

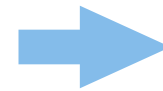
Problématique



Grains fins

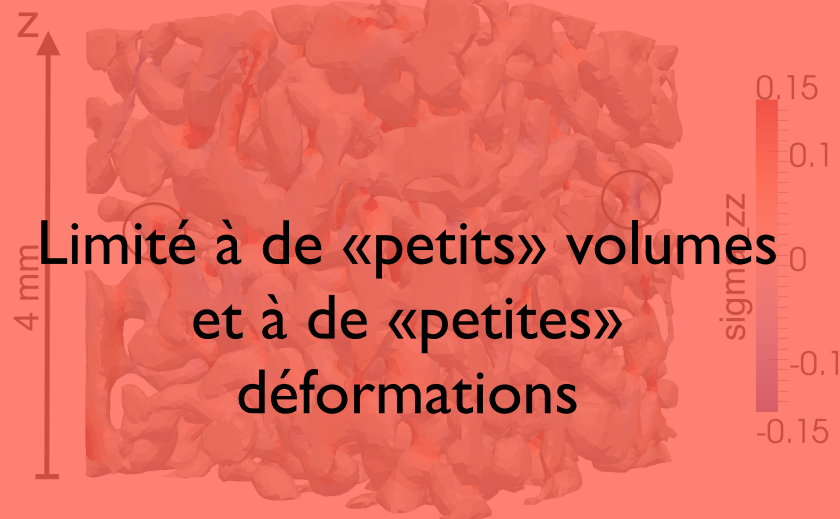
Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)



Lien avec images de neige ?

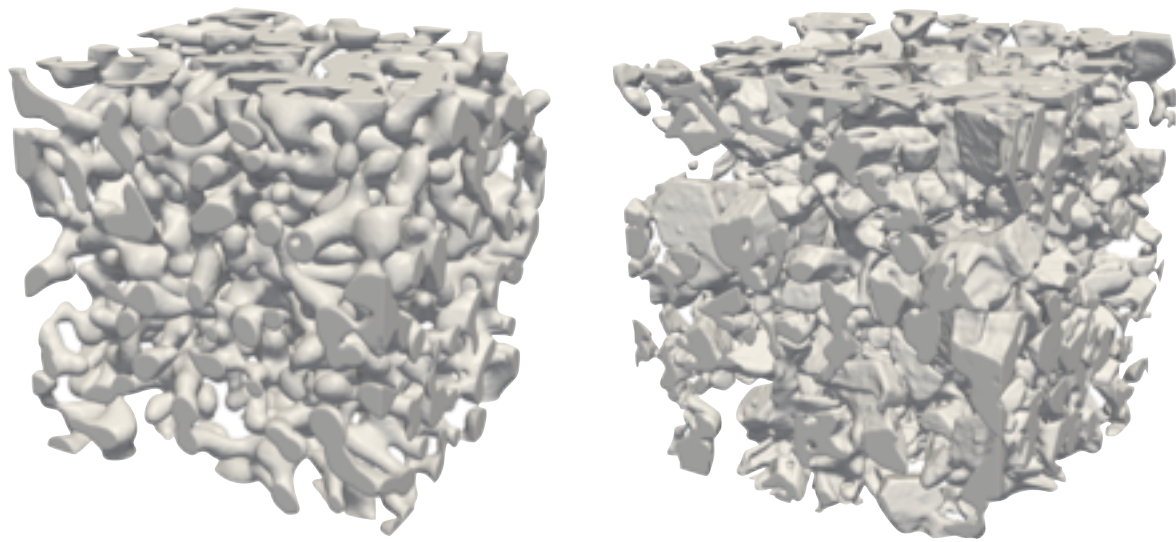
Description granulaire «conceptuelle»
(Johnson et al, 2005)



Limité à de «petits» volumes
et à de «petites»
déformations

Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)

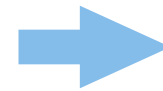
Problématique



Grains fins

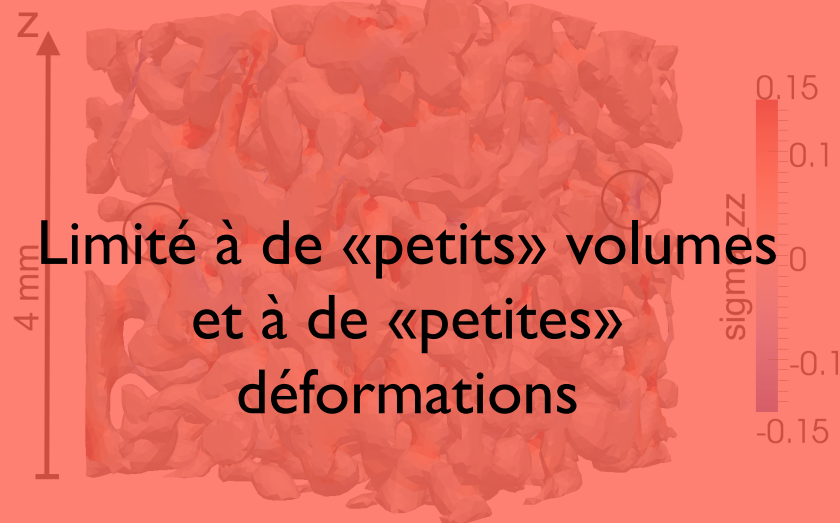
Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)

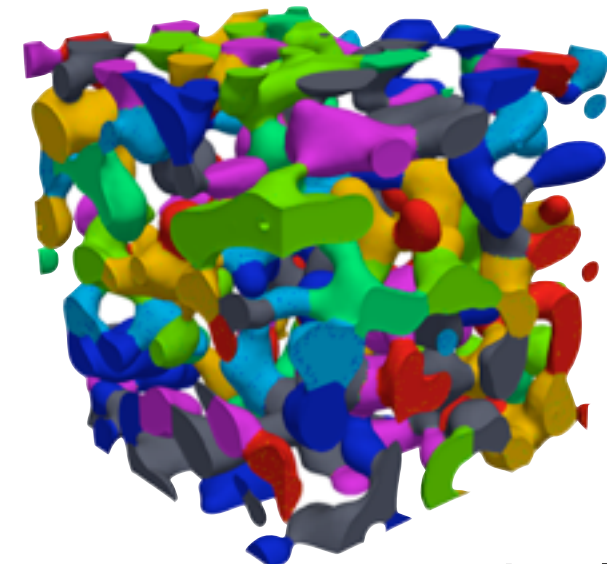


Lien avec images de neige ?

Description granulaire «conceptuelle»
(Johnson et al, 2005)

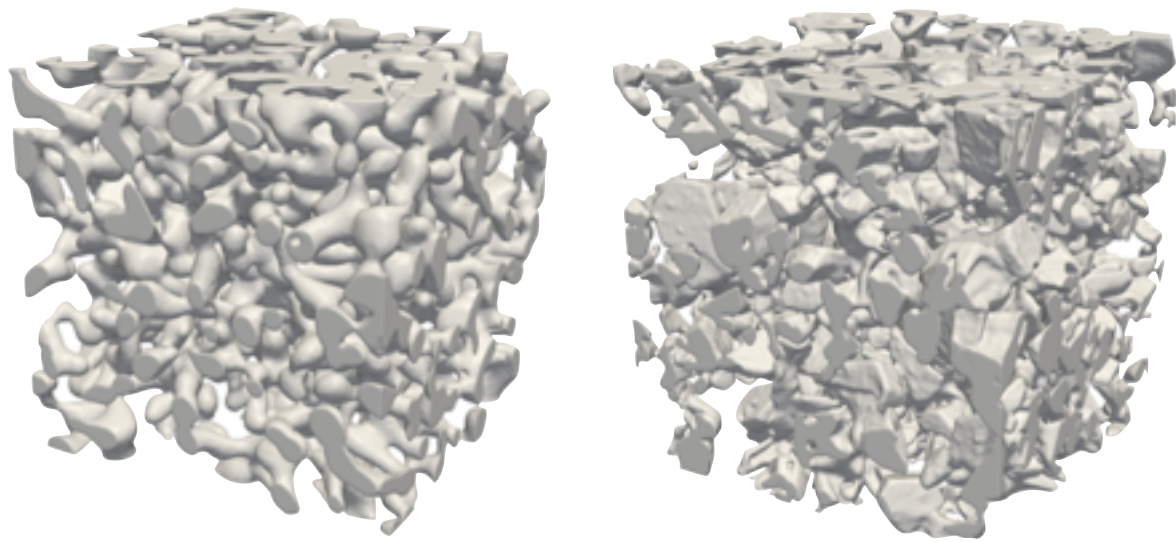


Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)



Description granulaire basée sur
des images tomographiques

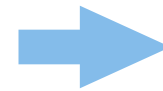
Problématique



Grains fins

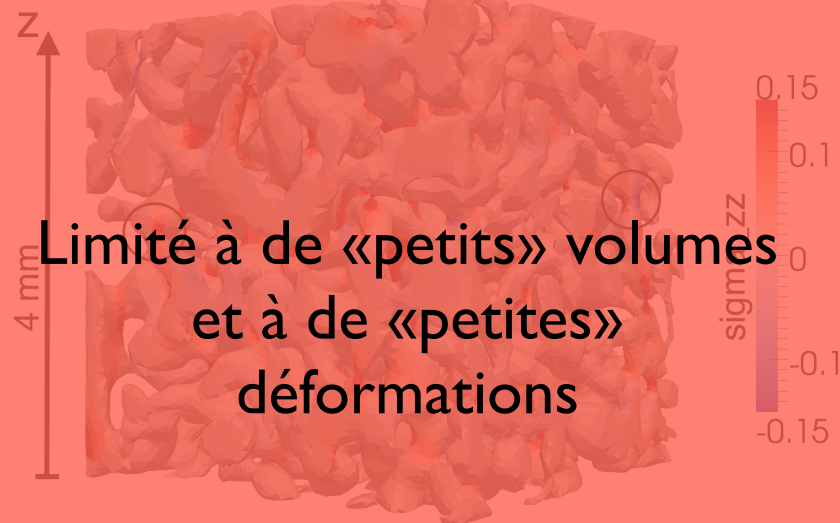
Grains facettés

Micro-tomographie (rayons X)



Lien avec images de neige ?

Description granulaire «conceptuelle»
(Johnson et al, 2005)



Limité à de «petits» volumes
et à de «petites»
déformations

Simulation numérique «directe»
(Hagenmuller et al., 2013)



Description granulaire basée sur
des images tomographiques

Plan

- I) Détection géométrique des grains
- II) Evaluation mécanique
- III) Éléments discrets

I) Détection géométrique de grains

Définition

- Les contraintes/déformations sont localisées dans la matrice de glace.
- On définit les jonctions des grains par ces zones de localisation de contrainte de telle sorte que les déformations soient essentiellement inter-granulaires.

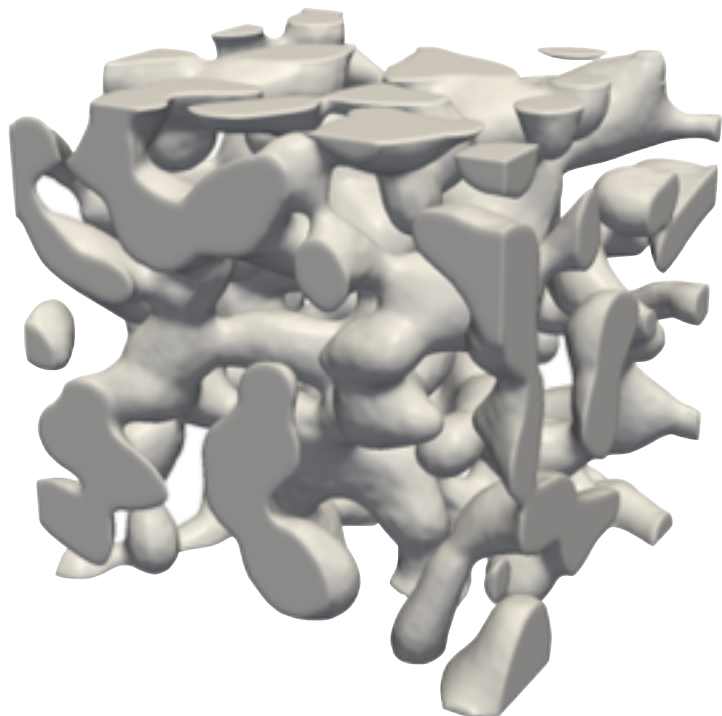
I) Détection géométrique de grains

Définition

- Les contraintes/déformations sont localisées dans la matrice de glace.
- On définit les jonctions des grains par ces zones de localisation de contrainte de telle sorte que les déformations soient essentiellement inter-granulaires.

Input

- Géométrie de la microstructure



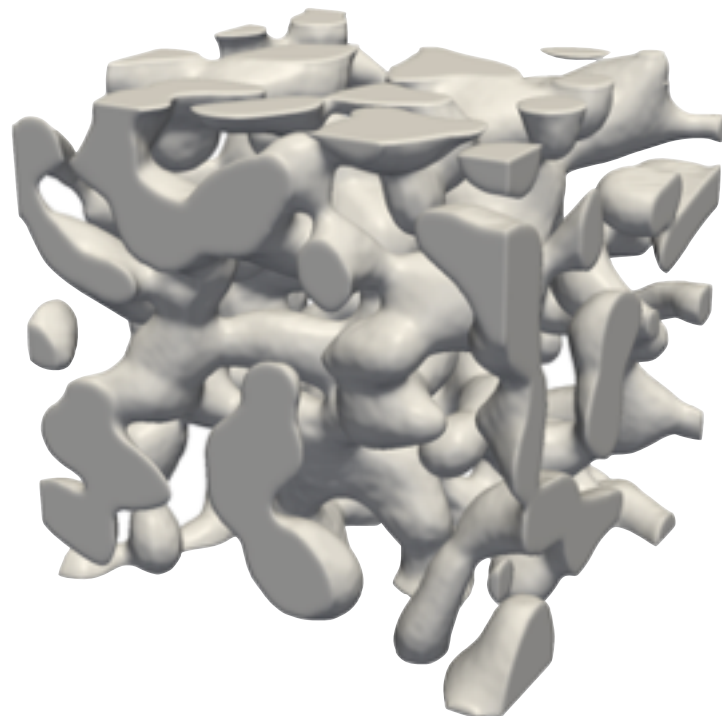
I) Détection géométrique de grains

Définition

- Les contraintes/déformations sont localisées dans la matrice de glace.
- On définit les jonctions des grains par ces zones de localisation de contrainte de telle sorte que les déformations soient essentiellement inter-granulaires.

Input

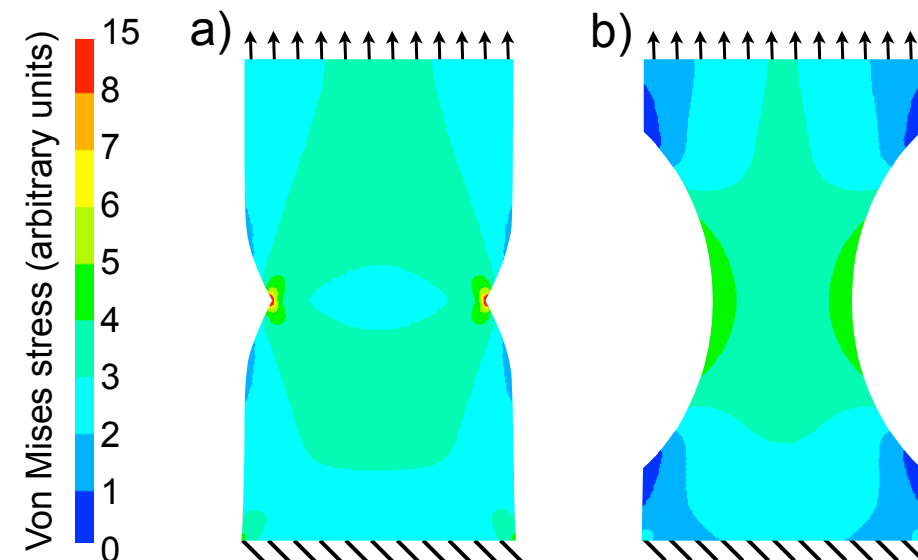
- Géométrie de la microstructure



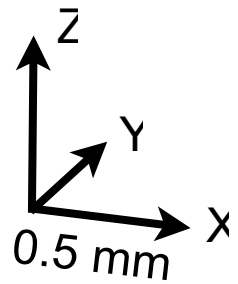
Mécanique ↔ Géométrie

Deux critères géométriques permettent d'expliquer (en partie) la localisation des contraintes mécaniques:

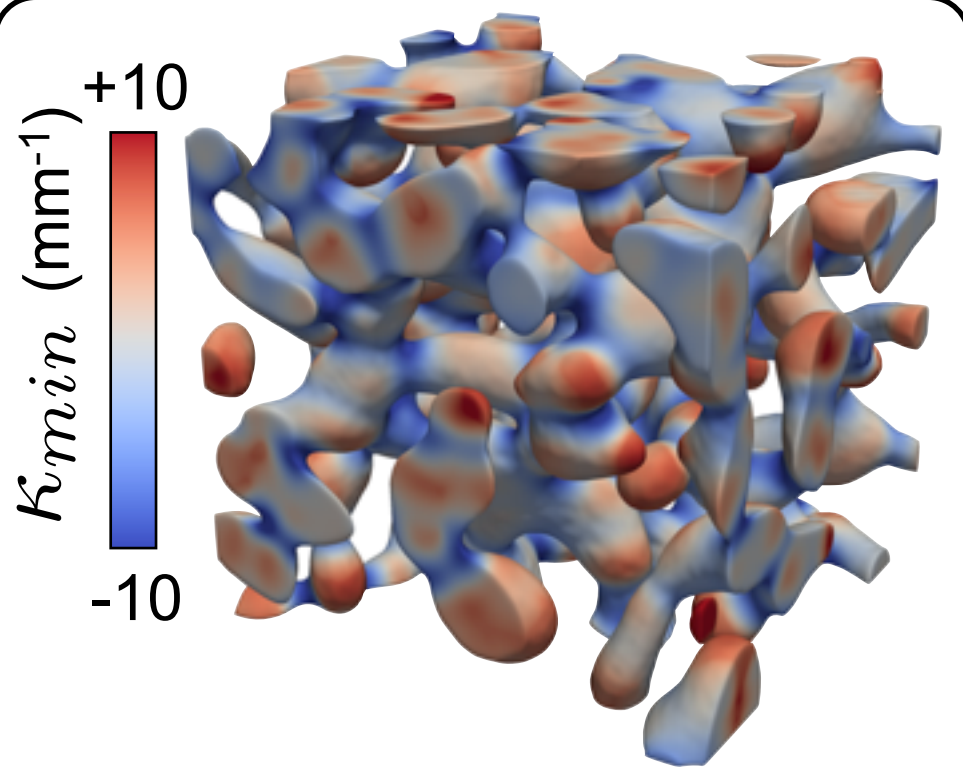
- a) forte courbure négative
- b) zones de constriction



I) Détection géométrique de grains

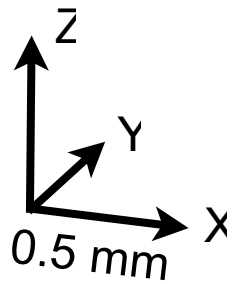


Méthode



Calcul de la courbure
principale minimale

I) Détection géométrique de grains

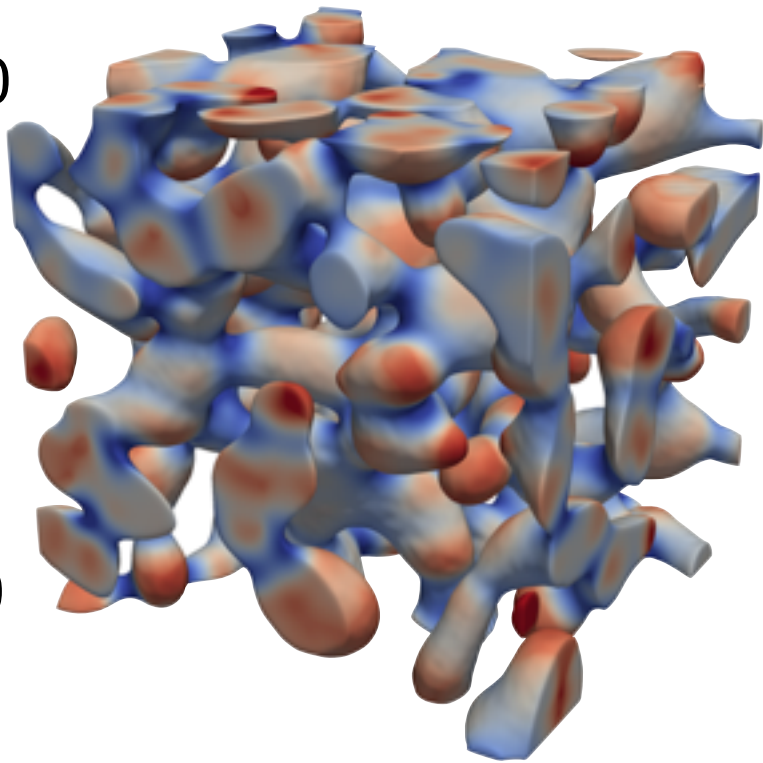


Méthode

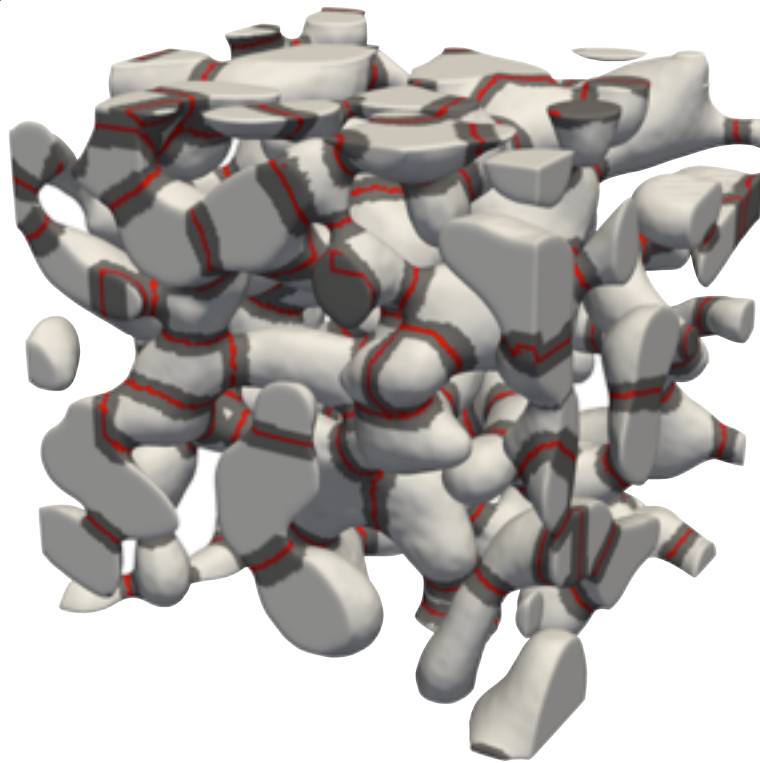
κ_{min} (mm⁻¹)

+10

-10

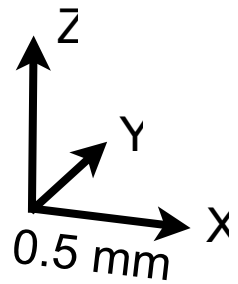


Calcul de la courbure
principale minimale



Pré-segmentation basée sur
la courbure

I) Détection géométrique de grains

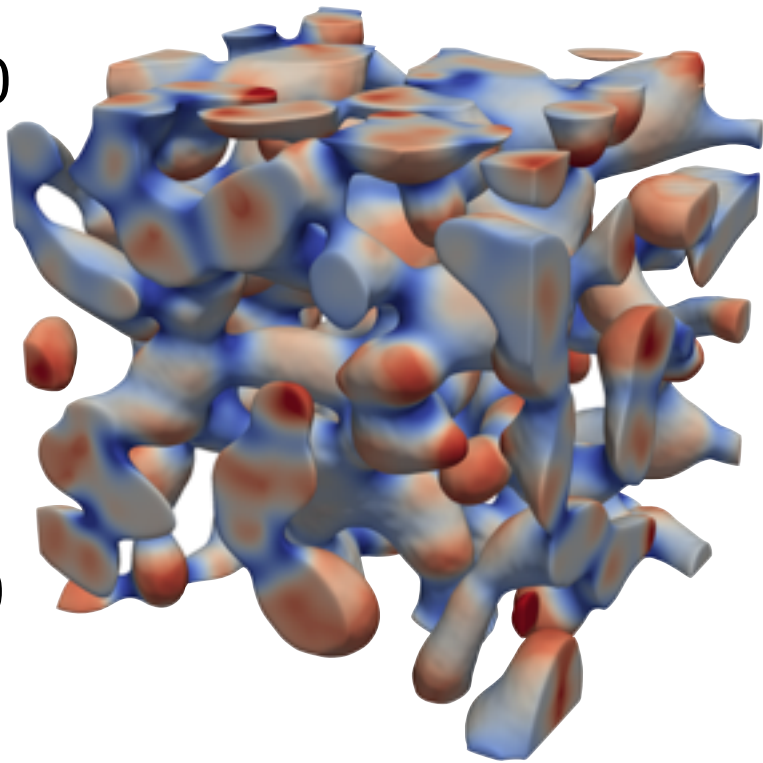


Méthode

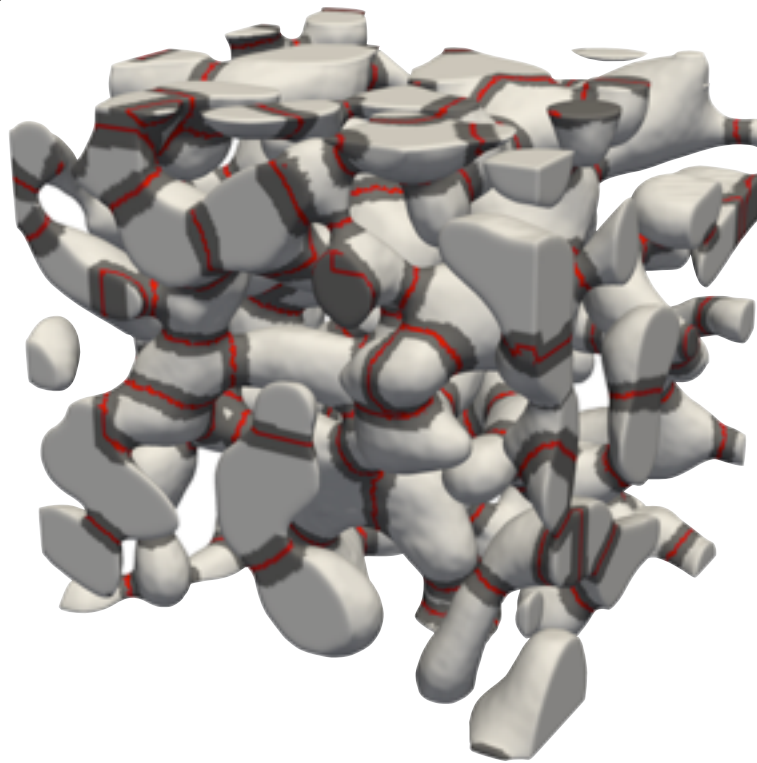
k_{min} (mm⁻¹)

+10

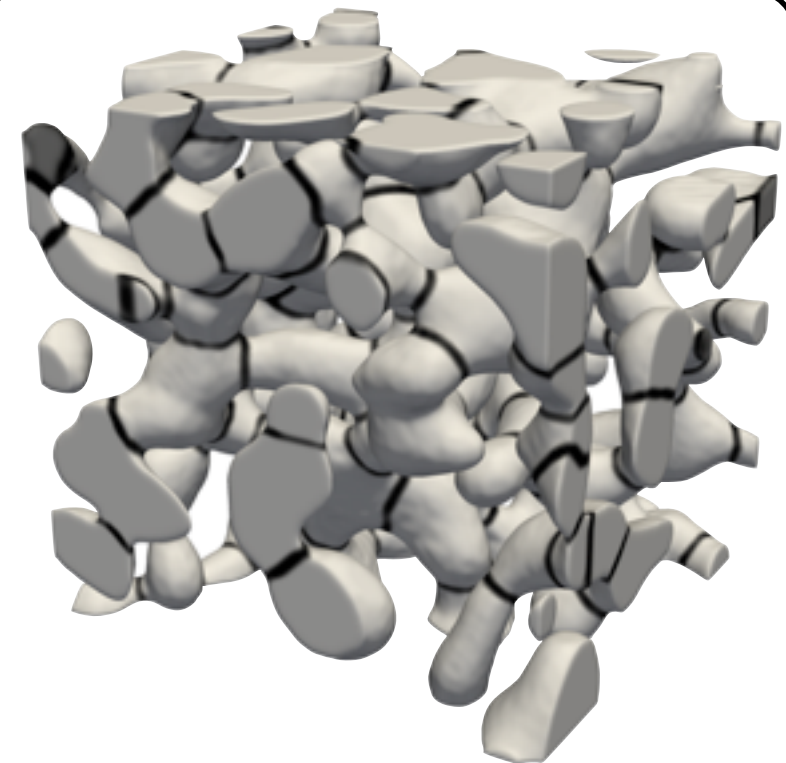
-10



Calcul de la courbure
principale minimale

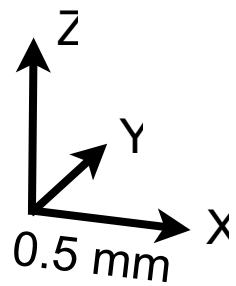


Pré-segmentation basée sur
la courbure

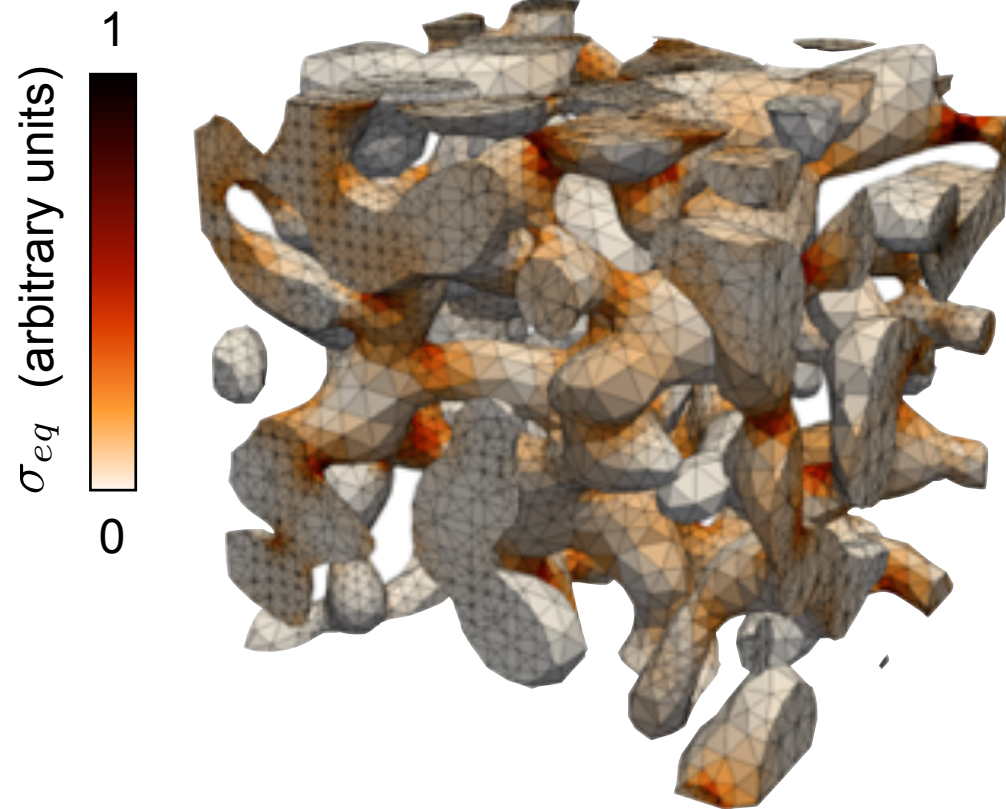


Segmentation basée sur la
minimisation de l'aire de
contact et un critère local de
contiguïté

II) Evaluation mécanique

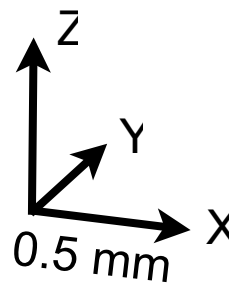


Méthode



Distribution des contraintes
(tension 3D, élastique linéaire)

II) Evaluation mécanique

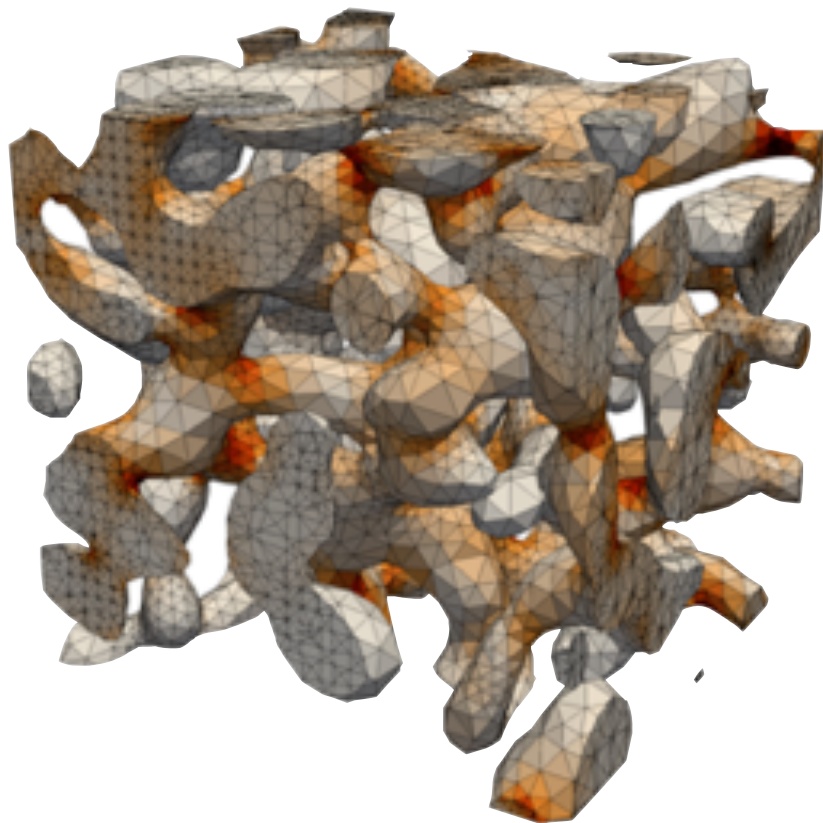


Méthode

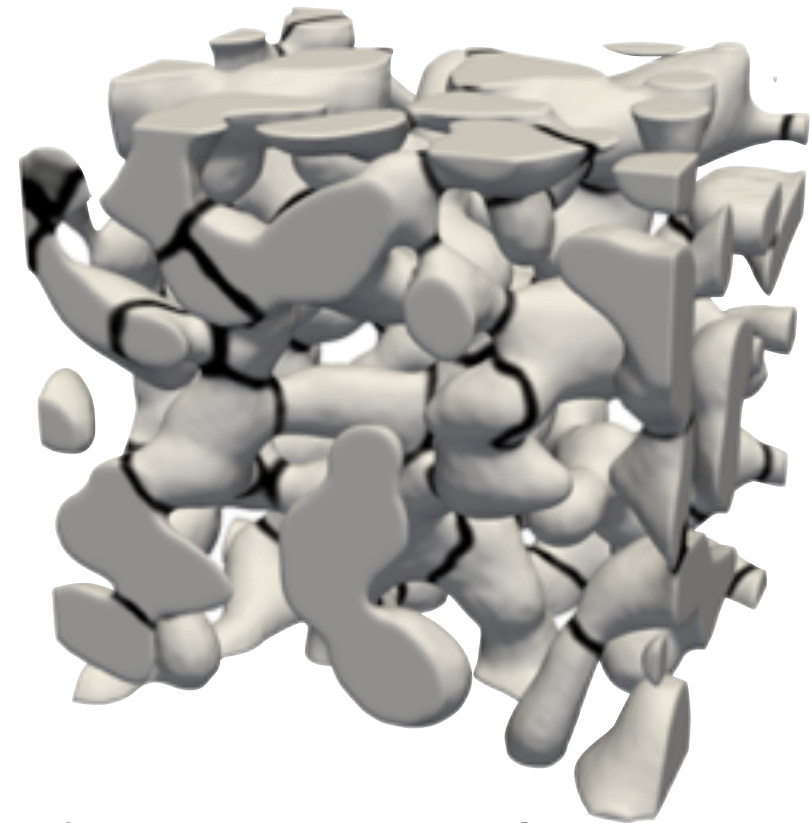
σ_{eq} (arbitrary units)

1

0



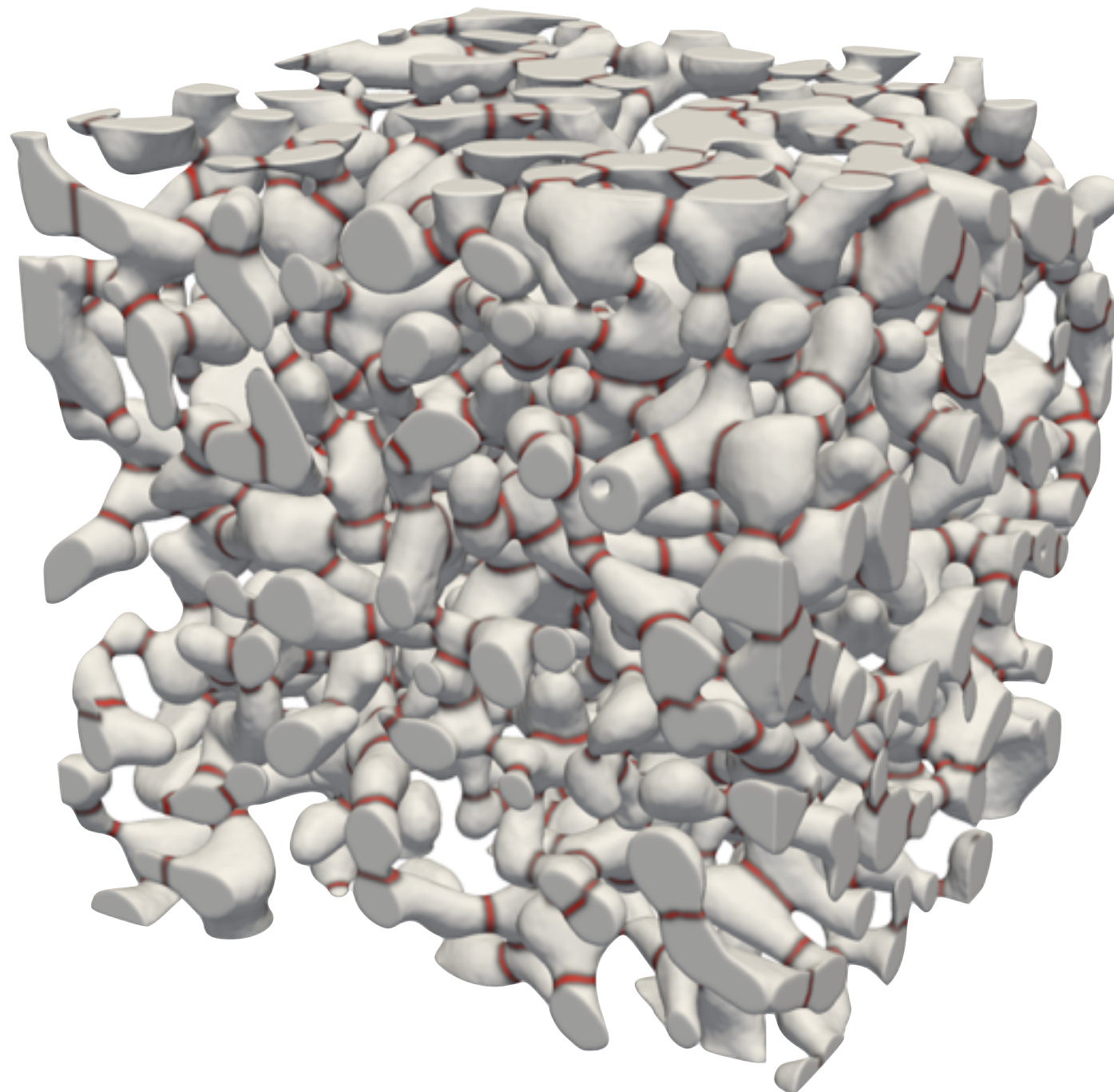
Distribution des contraintes
(tension 3D, élastique linéaire)



Segmentation basée sur le
champ de contrainte
normalisé

II) Evaluation mécanique

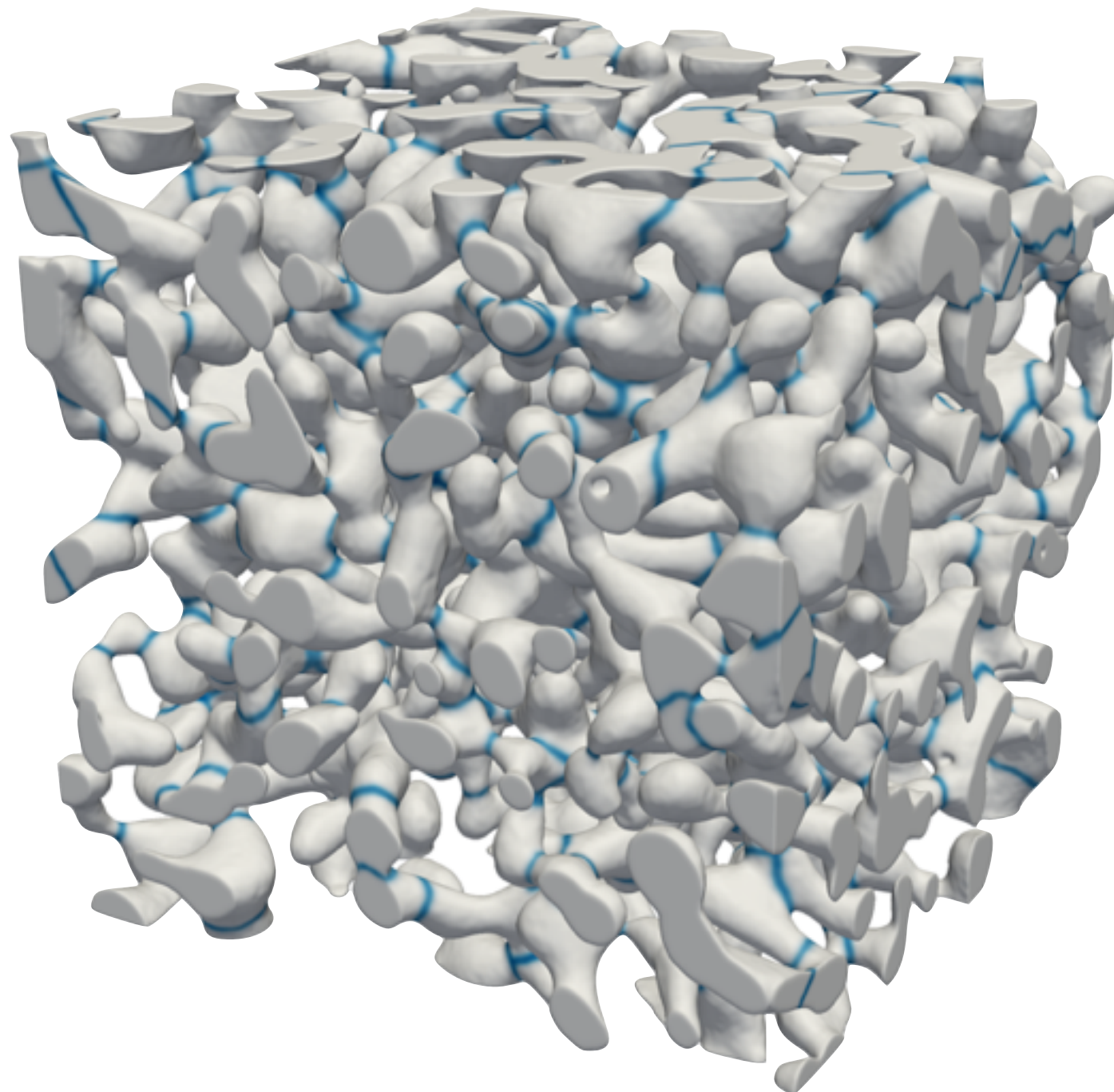
Comparaison



Grains géométriques

II) Evaluation mécanique

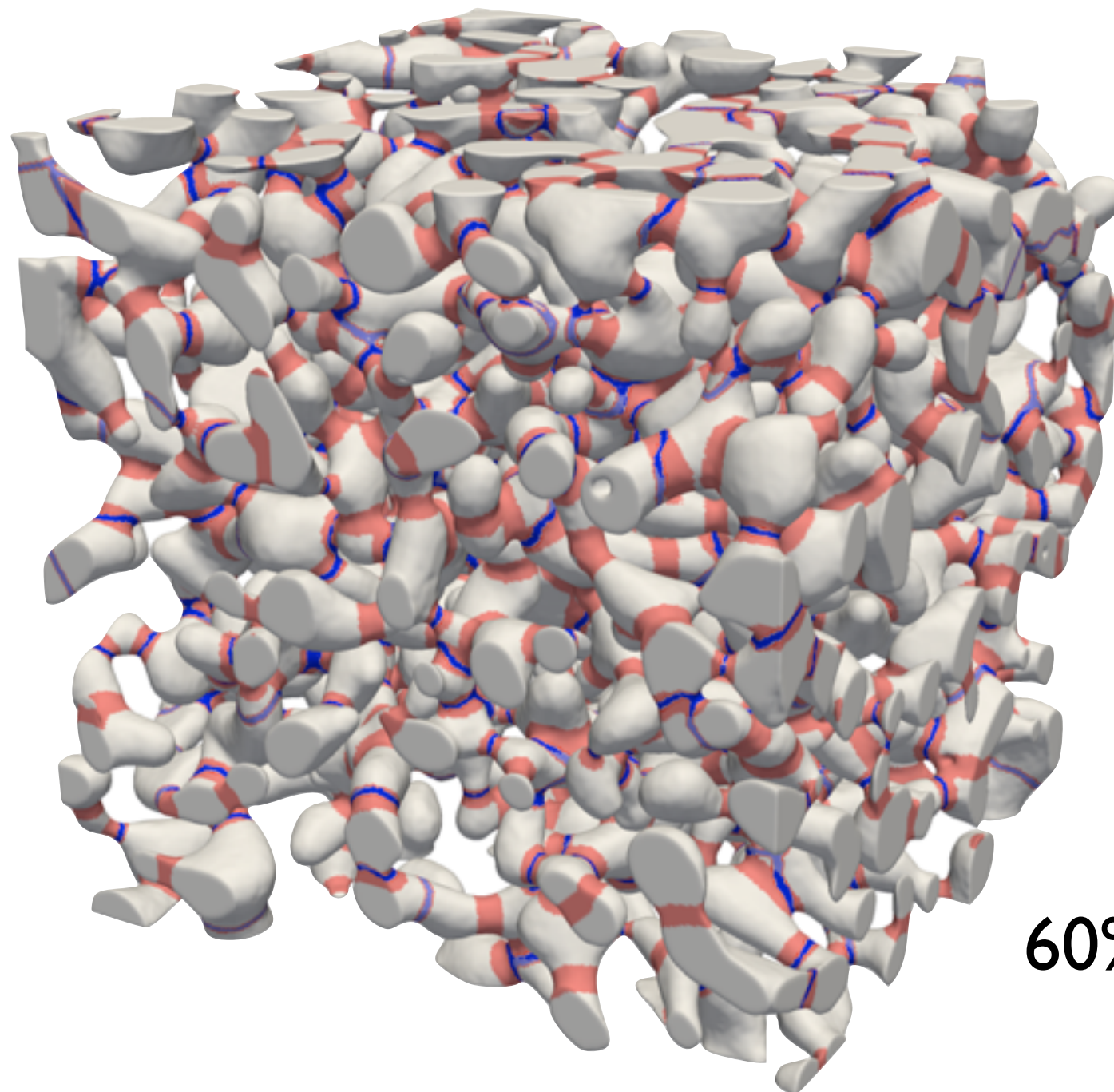
Comparaison



Grains mécaniques

II) Evaluation mécanique

Comparaison

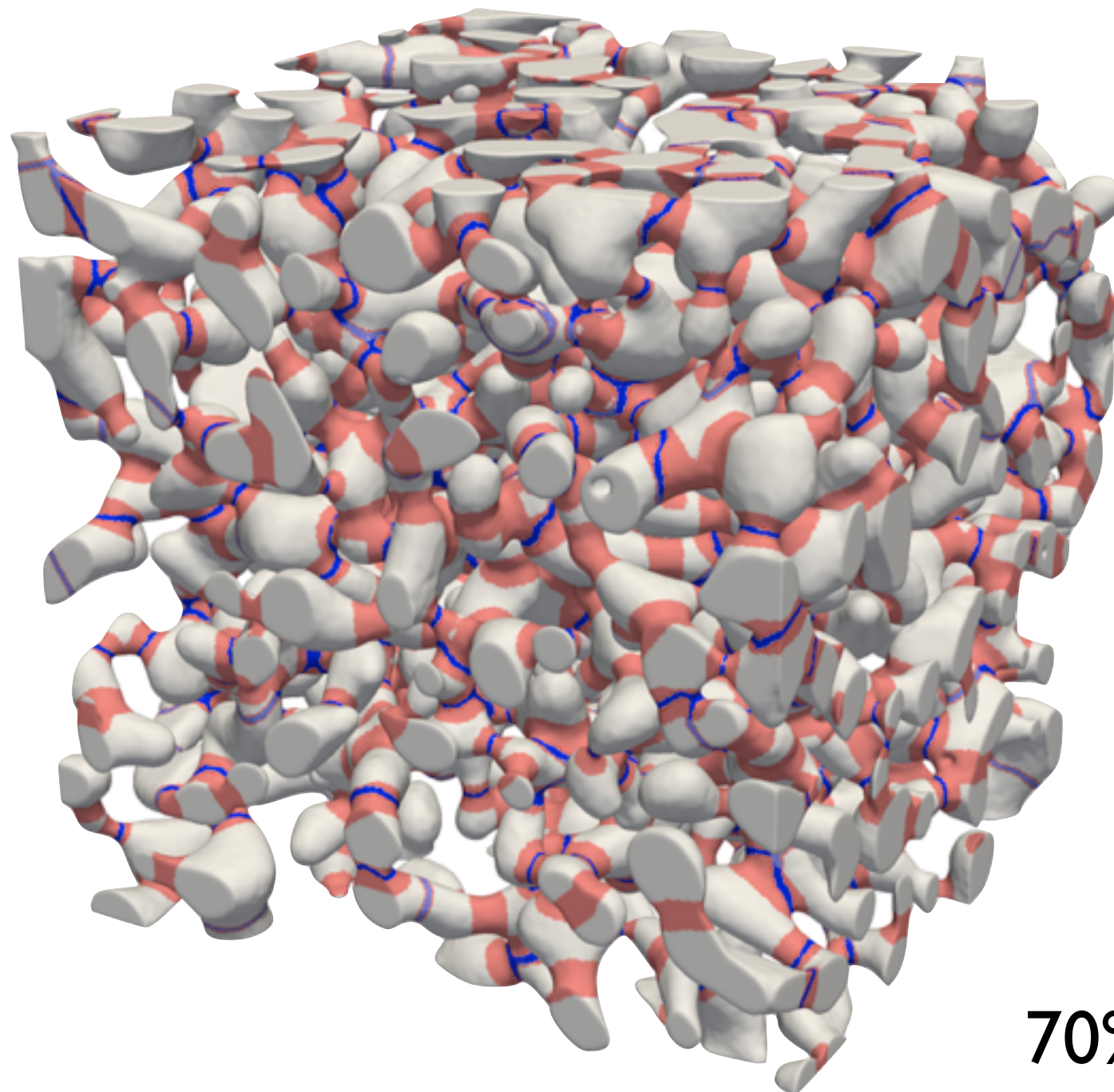


60% méca $\subset$ géom

Grains géométriques et mécaniques

II) Evaluation mécanique

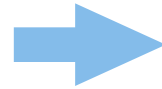
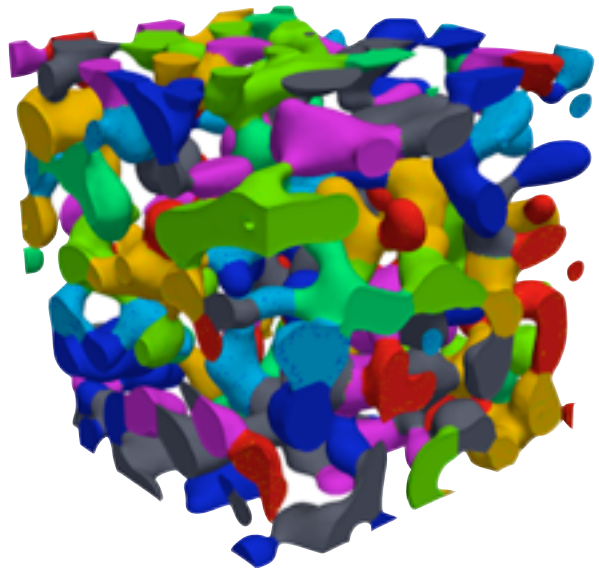
Comparaison



70% méca $\subset$ géom

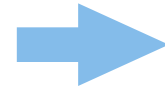
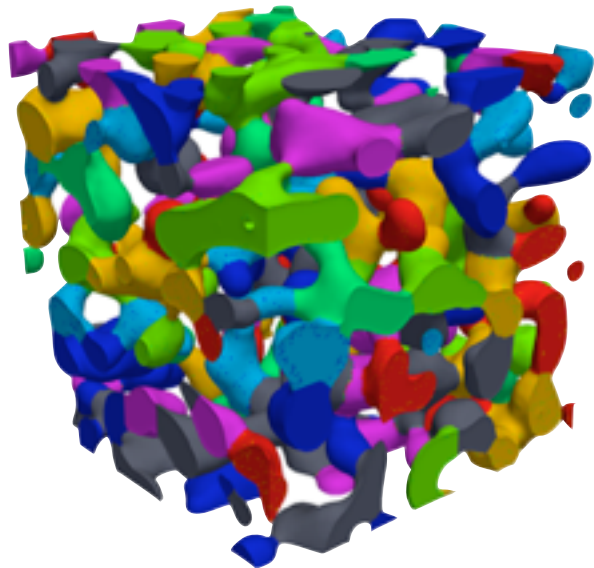
Grains géométriques et mécaniques

III) Éléments discrets

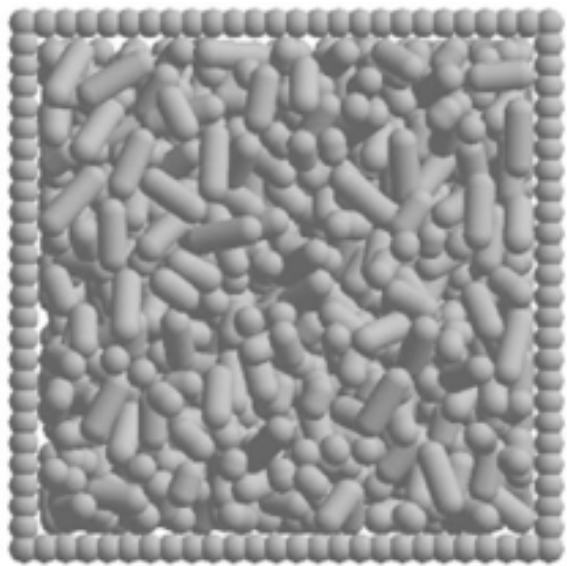


Éléments discrets
(YADE)

III) Éléments discrets

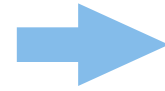
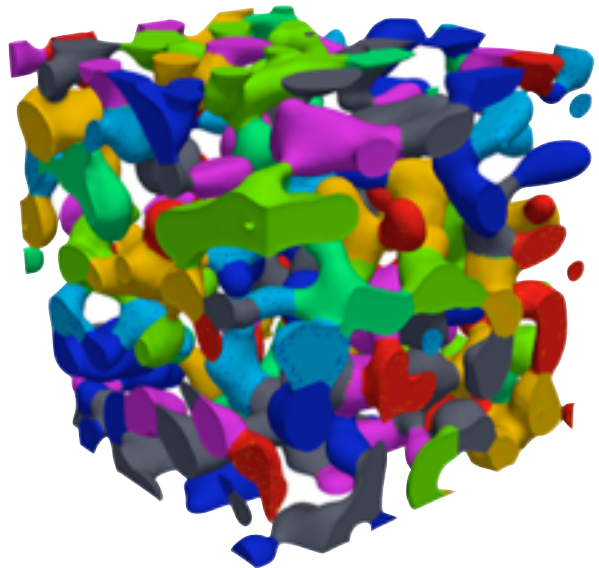


Éléments discrets
(YADE)

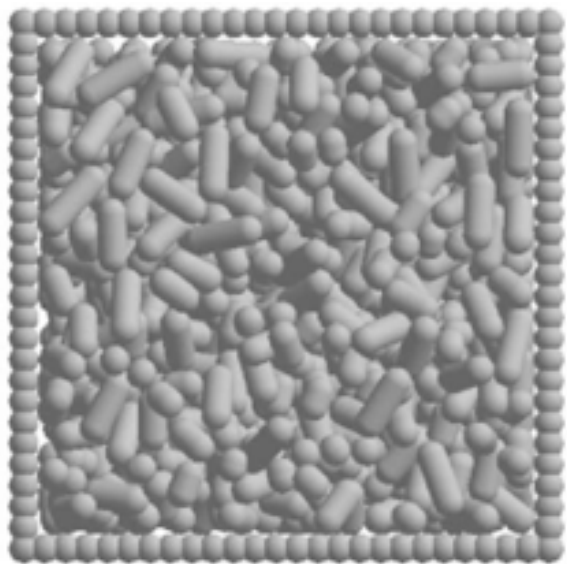


Caractérisation statistique
d'éléments aléatoires

III) Éléments discrets



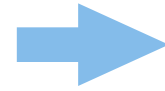
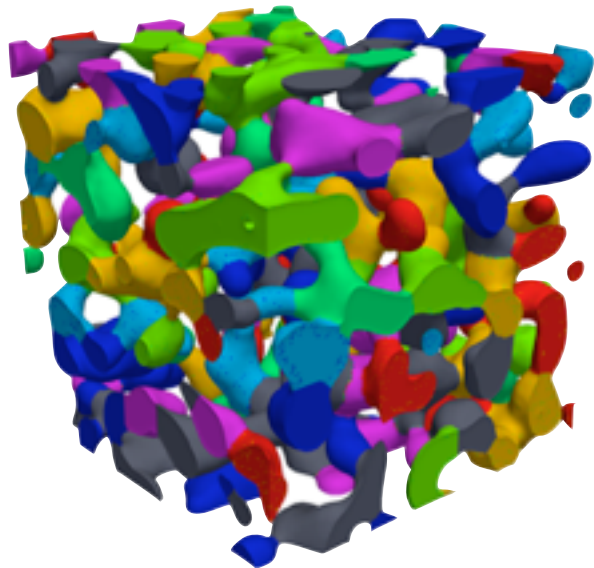
Éléments discrets
(YADE)



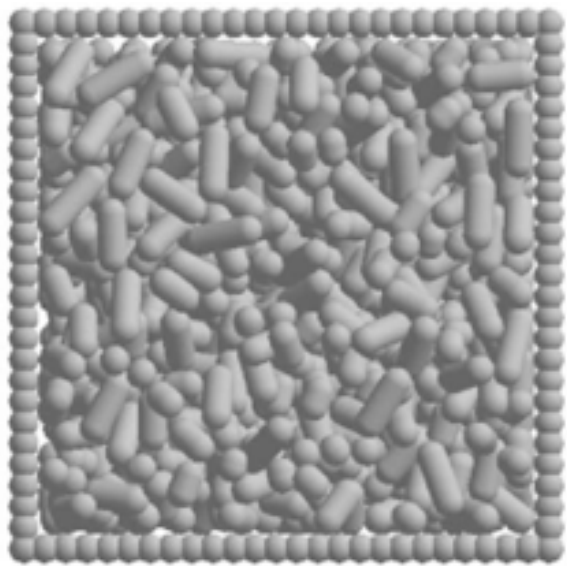
Caractérisation statistique
d'éléments aléatoires

Grains =
« connecteurs
de ponts »

III) Éléments discrets

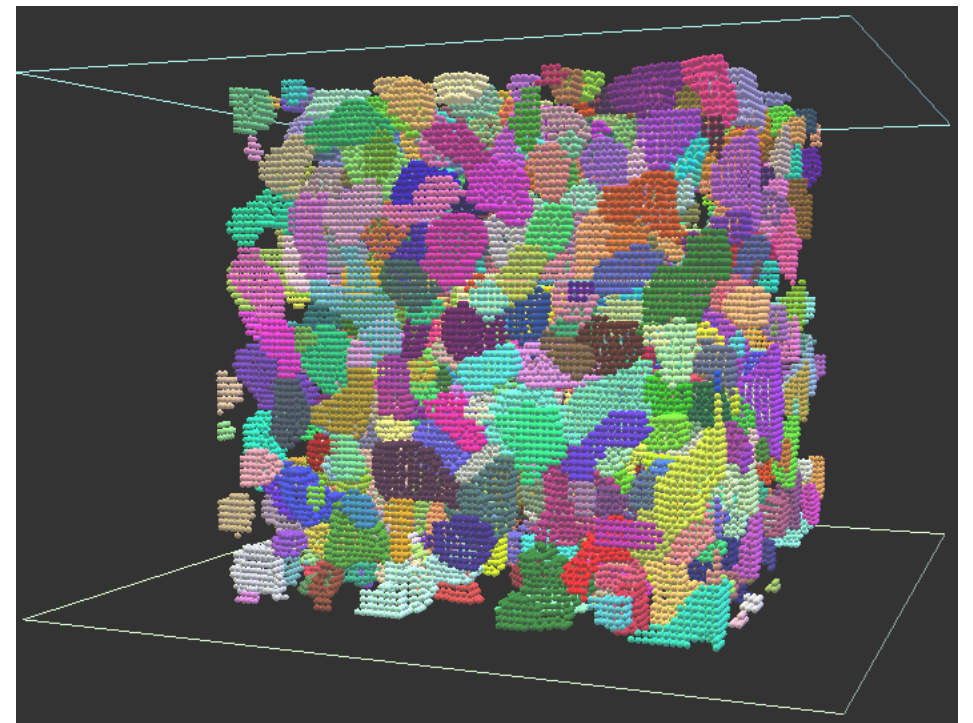


Éléments discrets
(YADE)



Caractérisation statistique
d'éléments aléatoires

Grains =
« connecteurs
de ponts »



Grains creux (cluster)

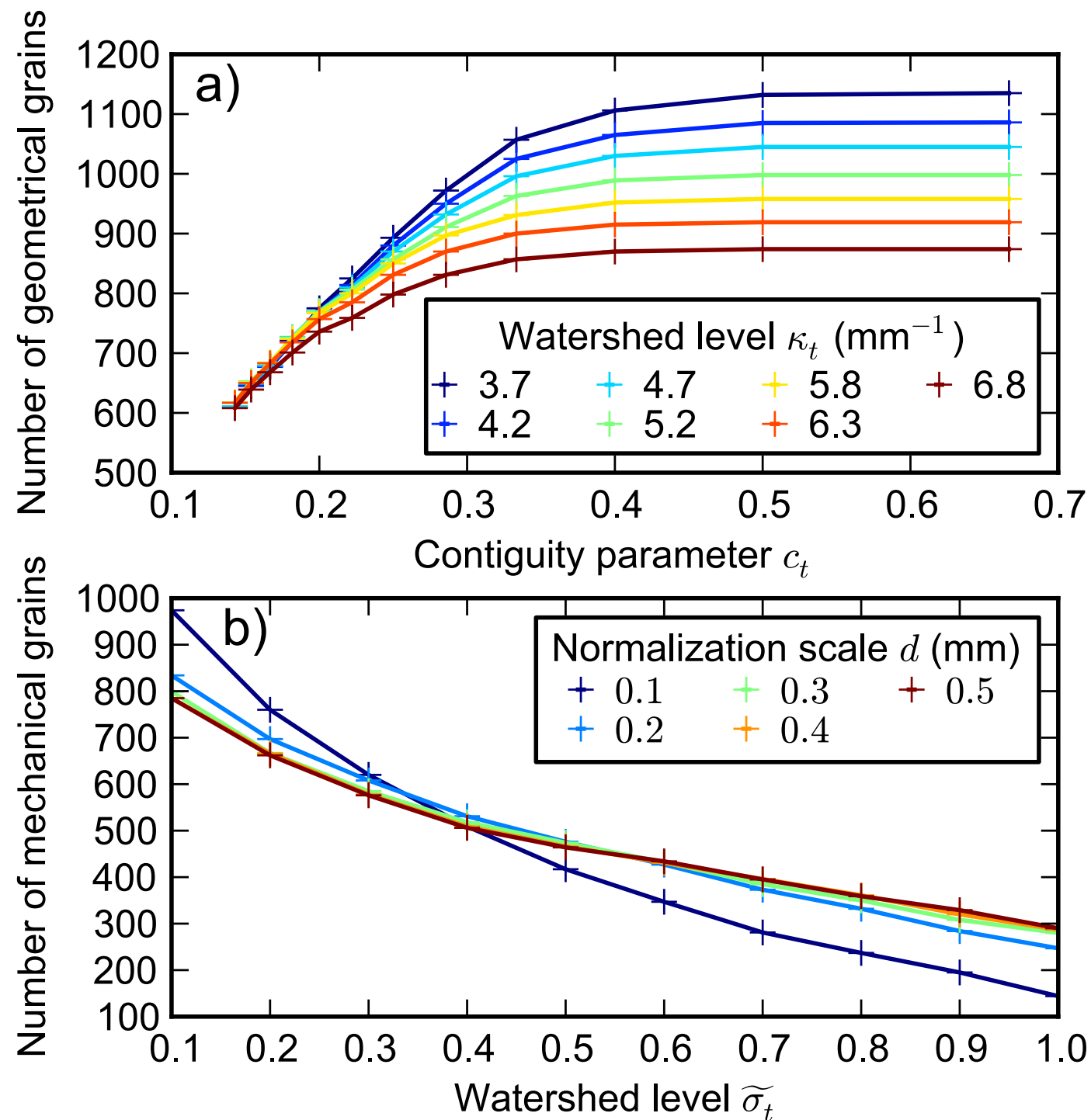
Conclusion et perspectives

- Algorithme géométrique (courbure + constriction) permet de simplifier «mécaniquement» la microstructure obtenue par tomographie.
- L'approche géométrique est pertinente d'un point de vue mécanique.
- Comment représenter l'ensemble des grains dans un code DEM (Yade) ?
- Evaluation de la simplification sur simulations à partir de la microstructure «complète» ou simplifiée.

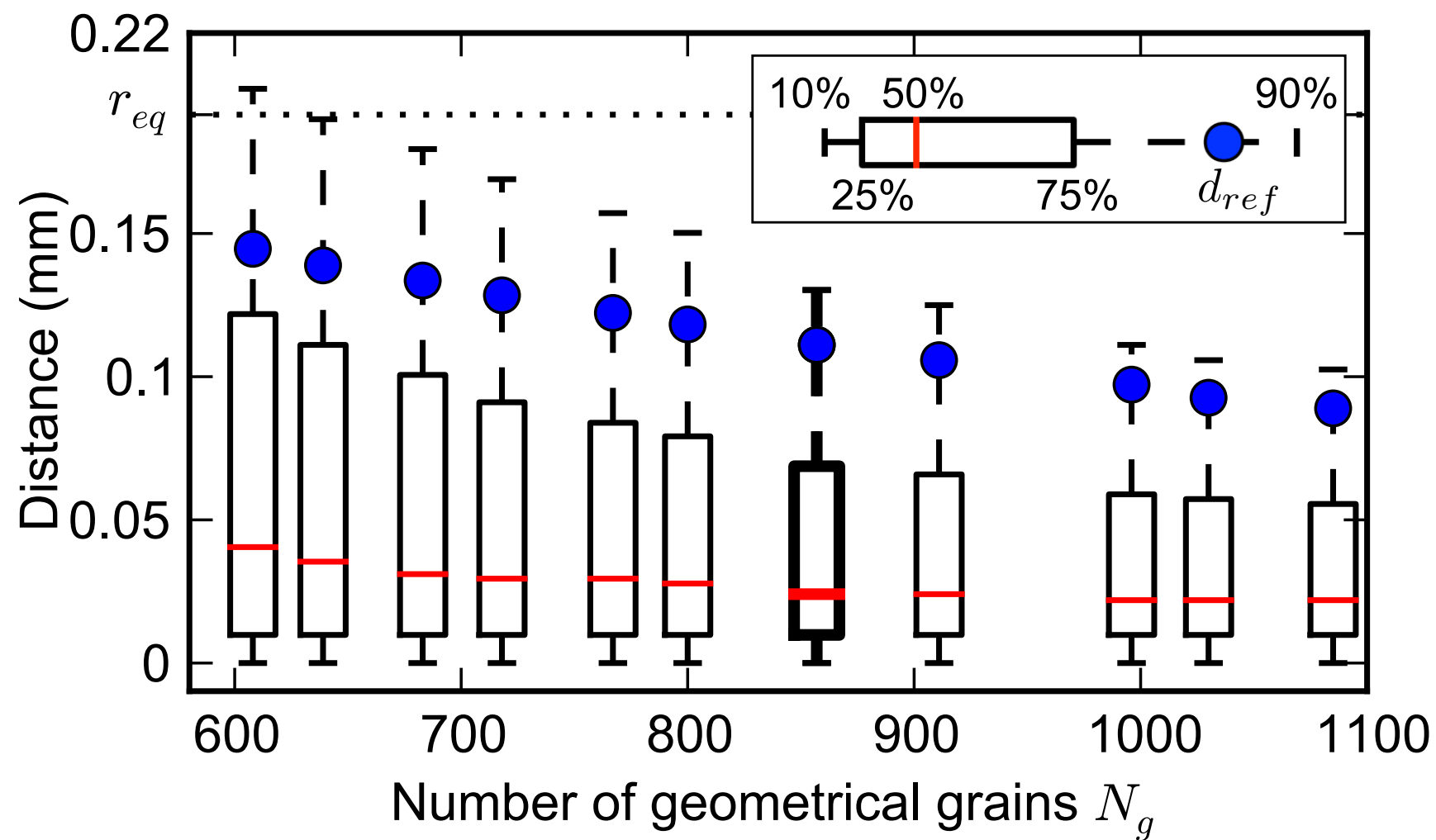
**Merci de votre attention
Questions ?**

pascal.hagenmuller@irstea.fr

I) Détection géométrique de grains



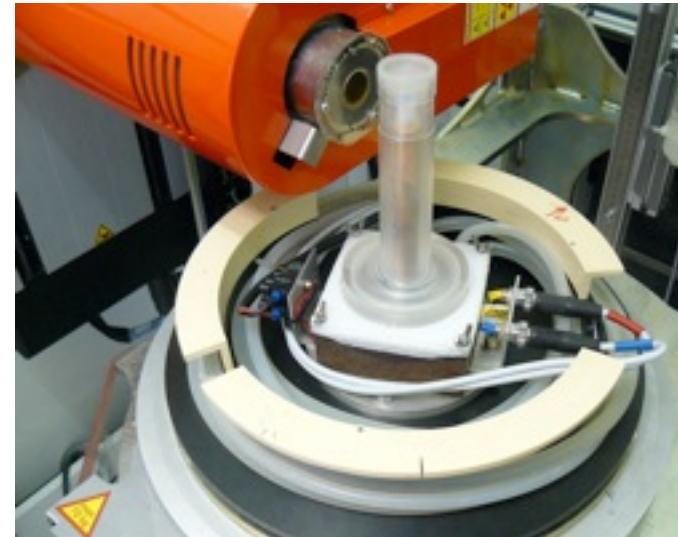
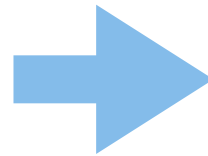
I) Détection géométrique de grains



Micro-tomographie



Prélèvements
(Col de Porte, Chartreuse)



Rayons X

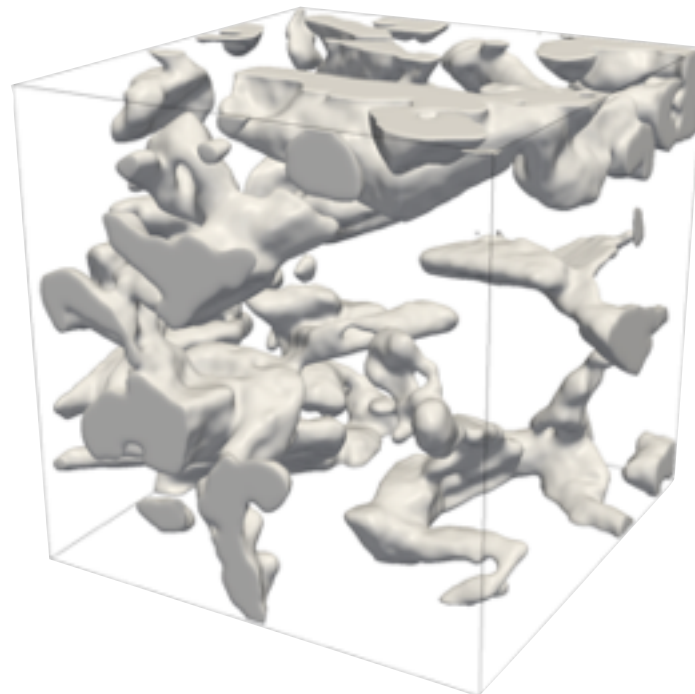
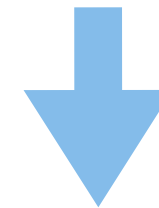


Image binaire air/glace

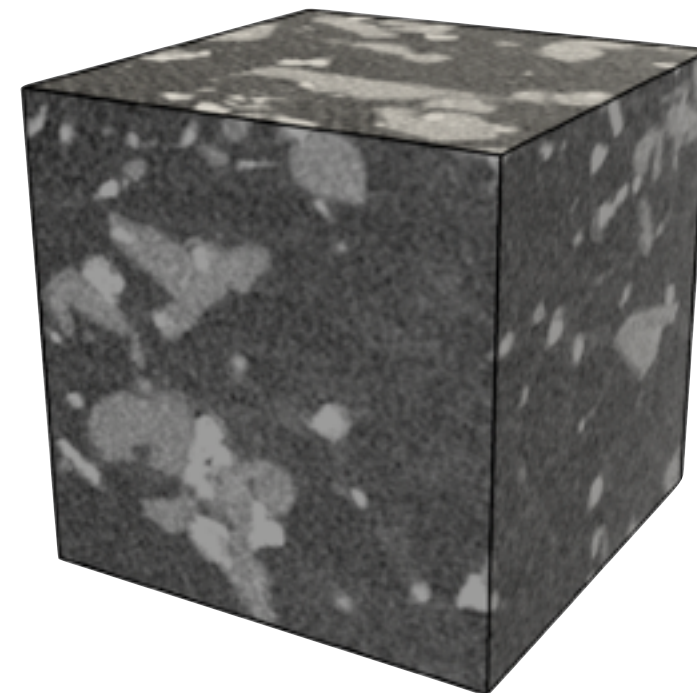
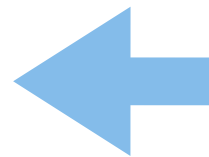
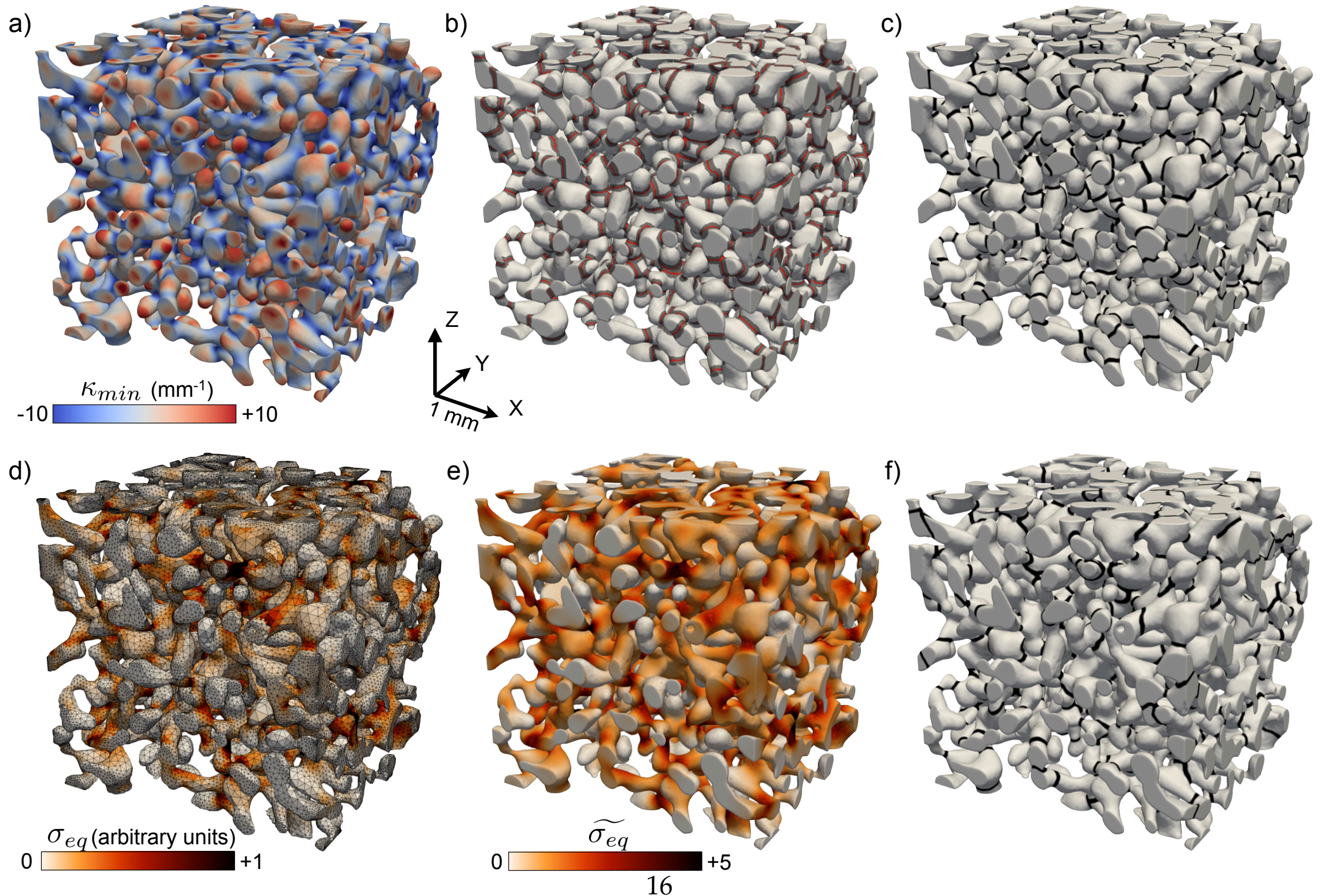
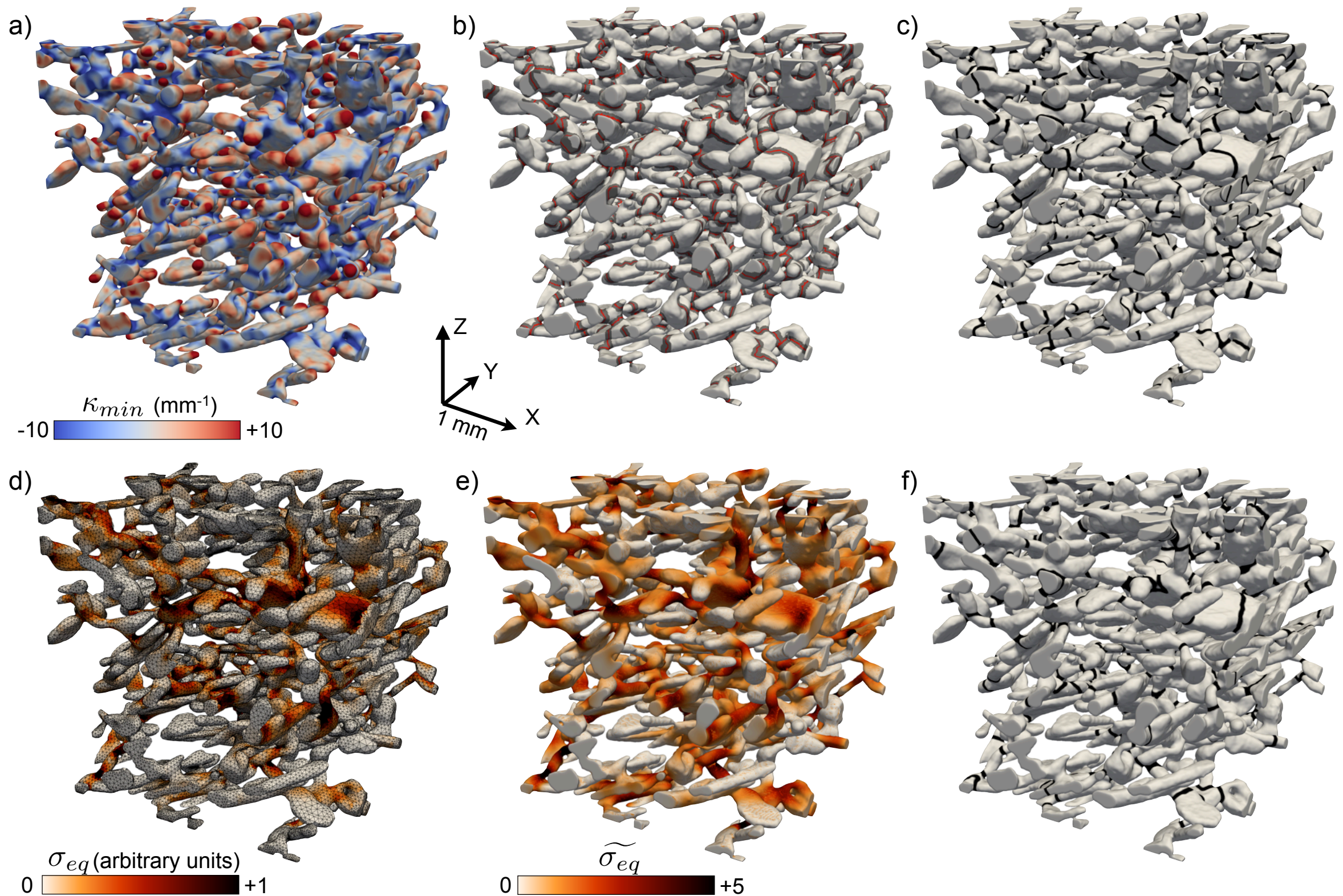


Image en niveaux de gris

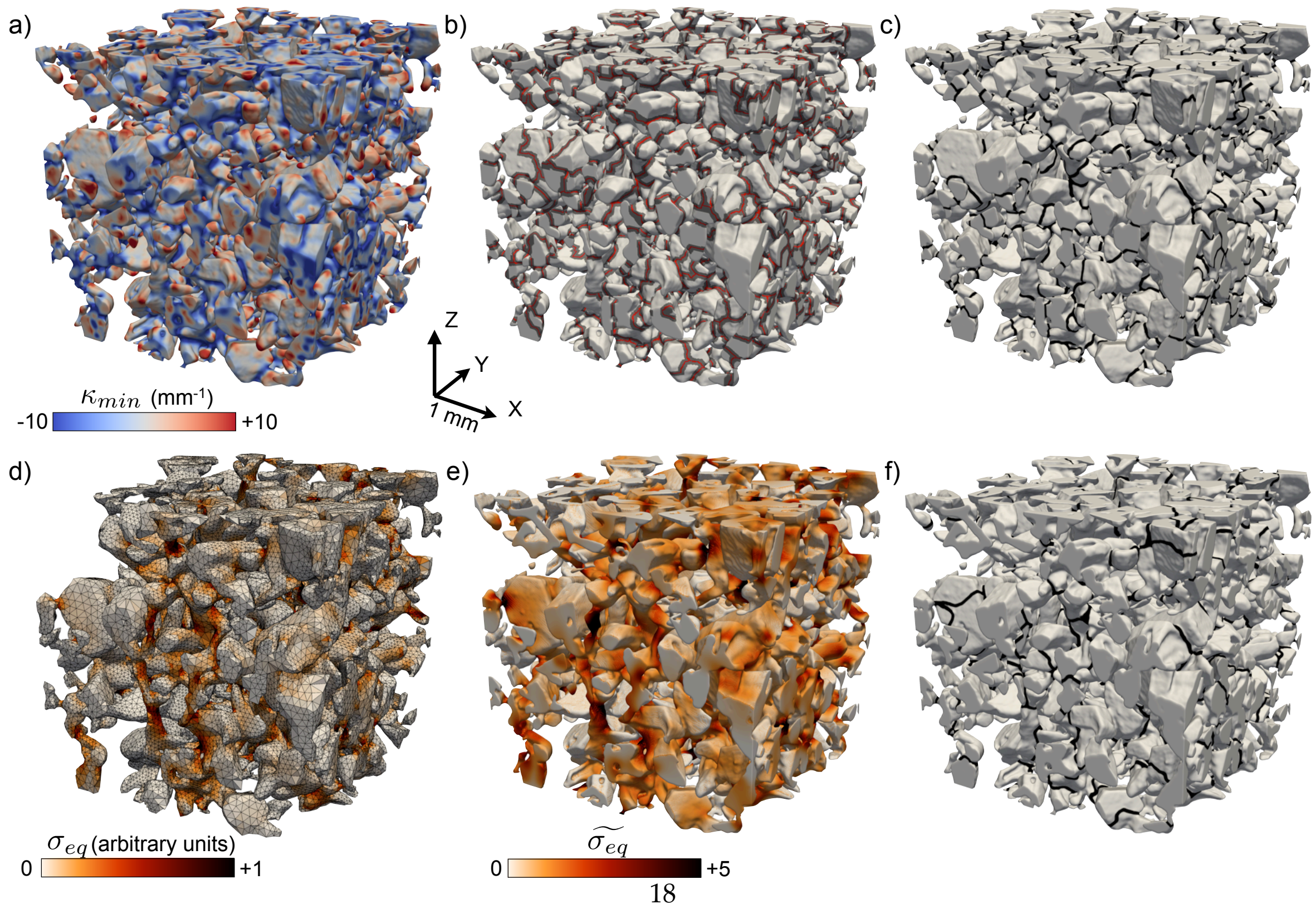
Autres neiges



Autres neiges



Autres neiges



Autres neiges

