

Club Cast3m 2008

Approche multi-échelle du
comportement mécanique des
matériaux composites SiC/SiC

Comportement élastique à l'échelle du toron

Chateau C.^{1,2}, Gélébart L.¹, Bornert M.², Crépin J.³

¹ CEA Saclay, SRMA, BP49, 91191 Gif/Yvette Cedex, France

² LMS Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

³ Mines ParisTech, Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry Cedex, France

21/11/08



DMN/SRMA



Introduction

- Présentation de l'étude
 - Contexte
 - Objectifs
- Caractérisation microstructurale
- Simulation de microstructures
- Comportement mécanique
 - Conditions aux limites
 - Notion de VER mécanique

Bilan et perspectives

1. Présentation de l'étude

Réacteurs nucléaires du futur (génération IV)

- Utilisation d'un spectre de neutrons rapide
- Augmentation des températures de fonctionnement :
800 -1000°C → 1600°C

SiC : candidat potentiel

- Bonne stabilité en température
- Bon comportement sous irradiation, faible capture neutronique
- **Fragile**



**Gainage en matériaux
composites SiC/SiC**

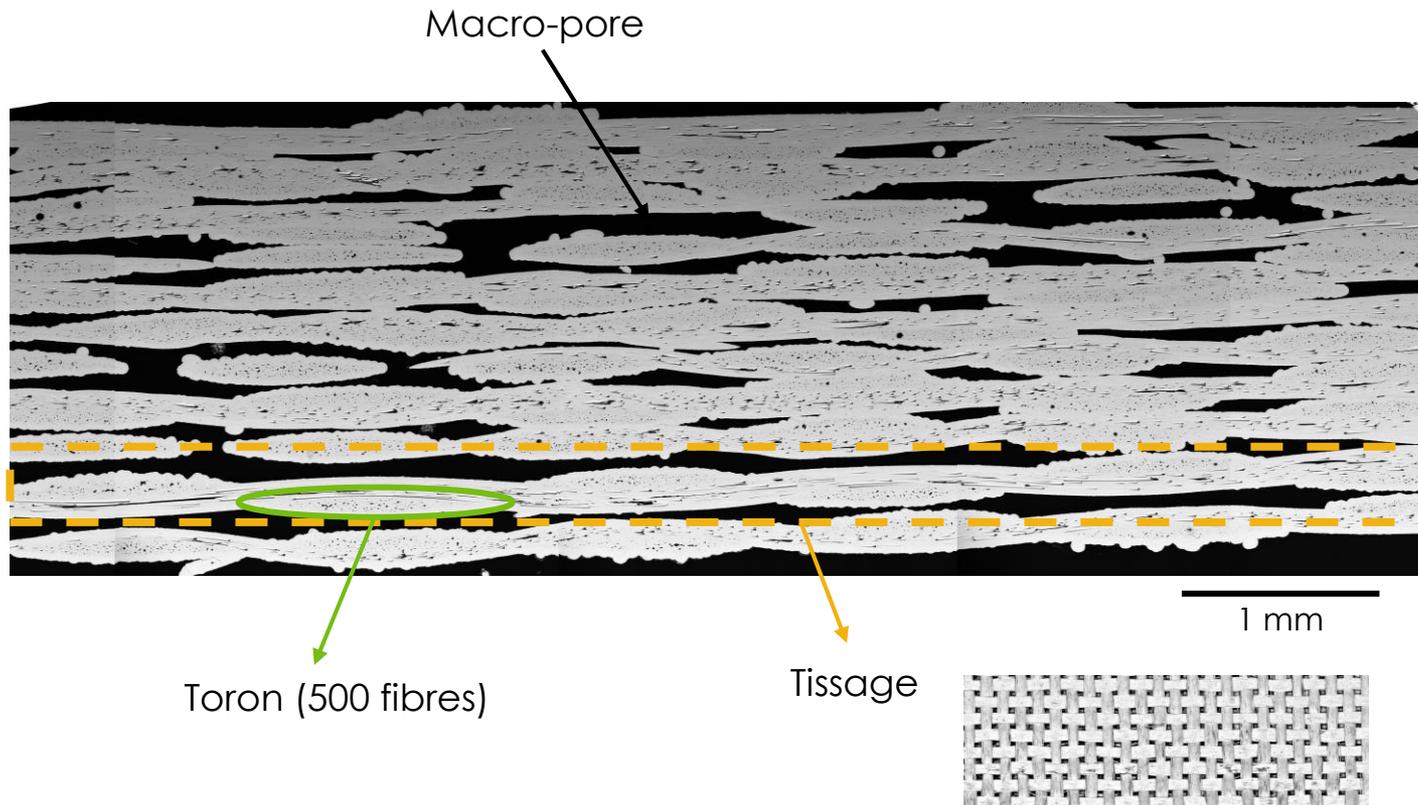


Aiguille

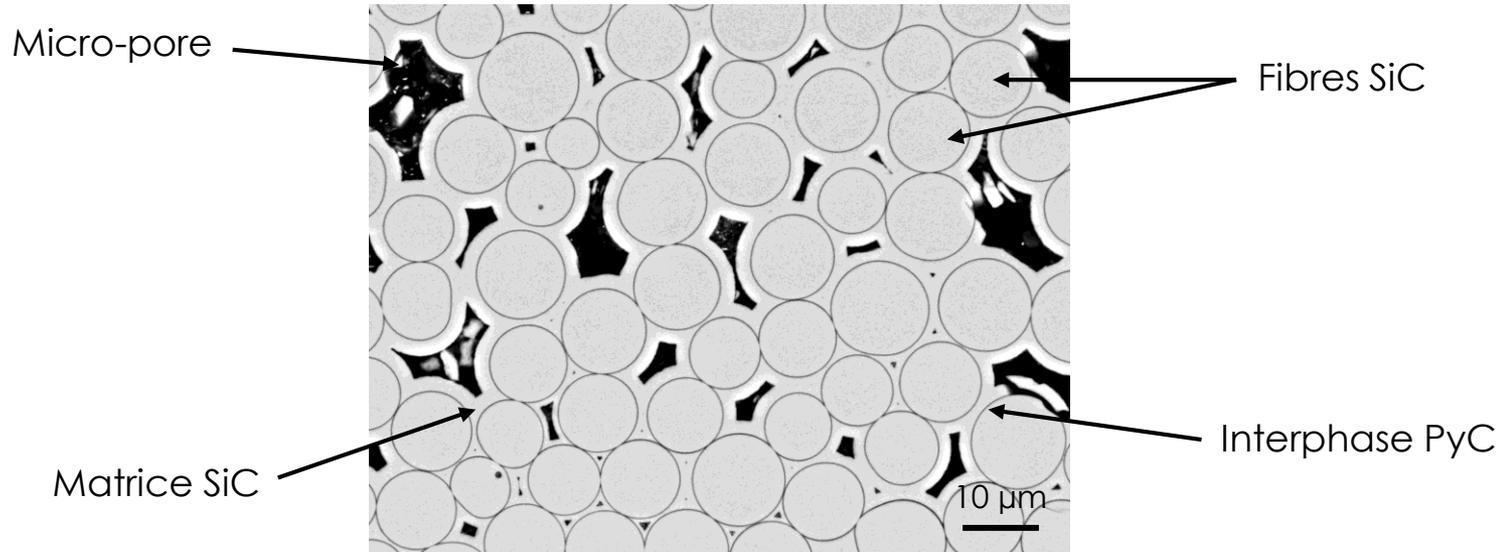
Matériau composite 2D à renfort tissé (SNECMA-SPS)

Procédé de fabrication : CVI (Chemical Vapor Infiltration)

→ dépôt de l'interphase de PyC et de la matrice SiC



Microstructure



Microstructure complexe et très hétérogène

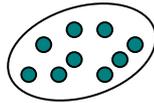


Comportement macroscopique complexe
(anisotropie, endommagement)

Echelle microscopique

Microstructure

Taille caractéristique des hétérogénéités : d

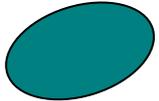


homogénéisation

Echelle macroscopique

Structure

Taille caractéristique : D



Volume Élémentaire Représentatif (VER)

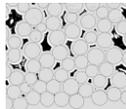
$$d \ll L \ll D$$



Définition d'un **Comportement Homogène Equivalent**
en tout point de la structure macroscopique

Cas des SiC/SiC : 2 changements d'échelle

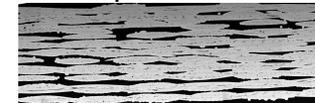
microstructure



toron



composite tissé



Modélisation multi-échelle du comportement mécanique des SiC/SiC

Restriction de l'étude

- **1^{er} changement d'échelle** : microstructure → toron
- Comportement **élastique**

Démarche

- Analyse microstructurale
 - Génération de microstructures
 - Comportement mécanique (homogénéisation numérique)
- 
- The diagram shows three steps in a list. A green arrow points from the second step to the first, and another green arrow points from the third step to the second, indicating a reverse flow from the final step back to the initial step.

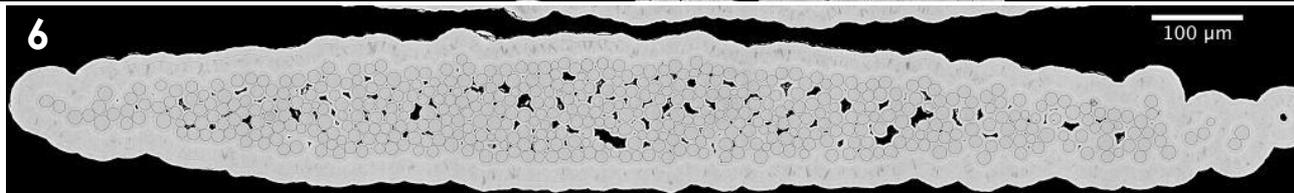
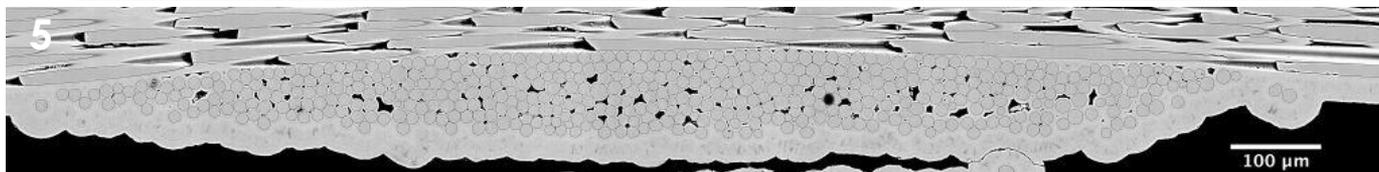
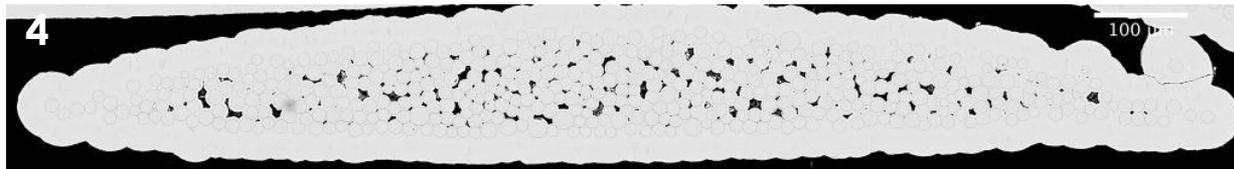
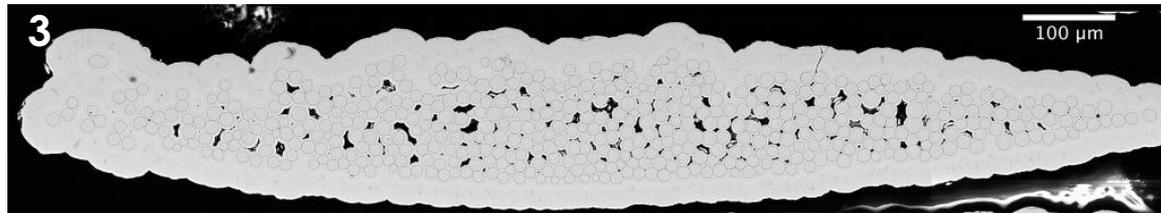
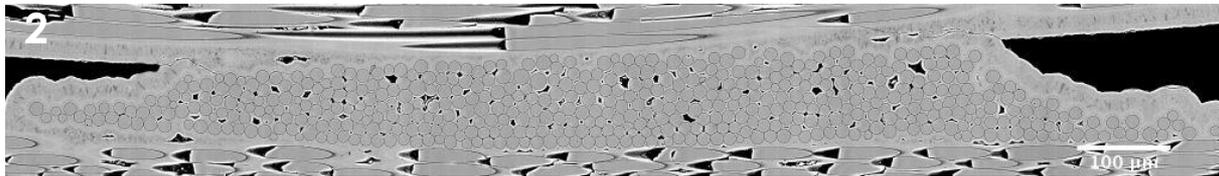
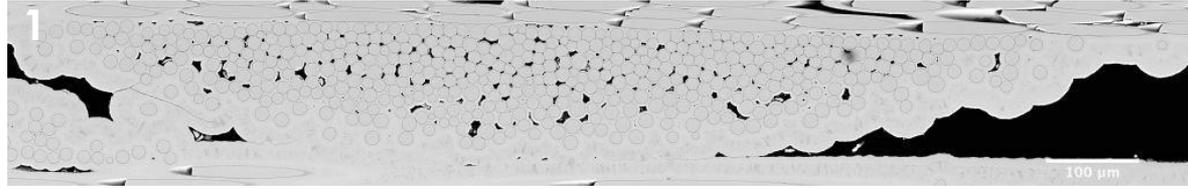
Influence de la porosité

2. Caractérisation microstructurale

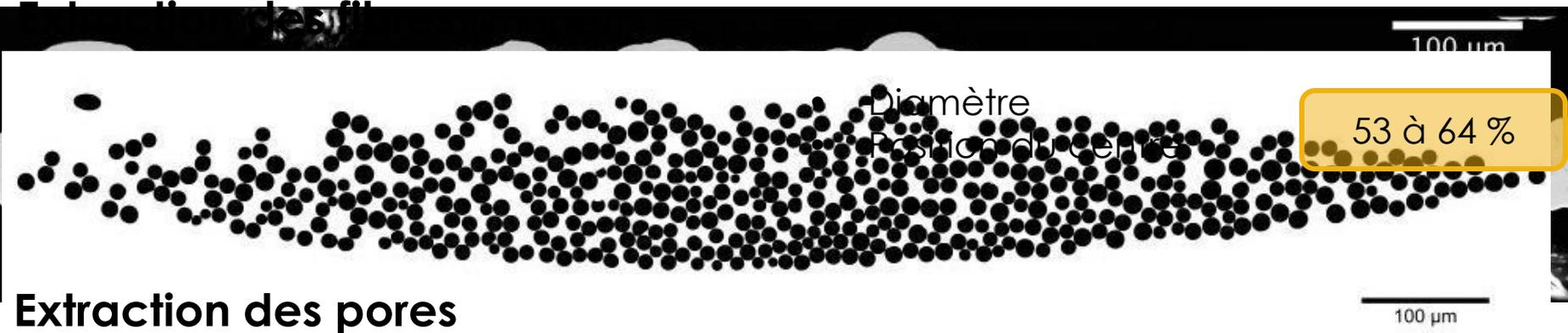
MEB-FEG (LMS-Ecole Polytechnique)

- Electrons rétrodiffusés
- Haute résolution
- Échantillon + 6 torons





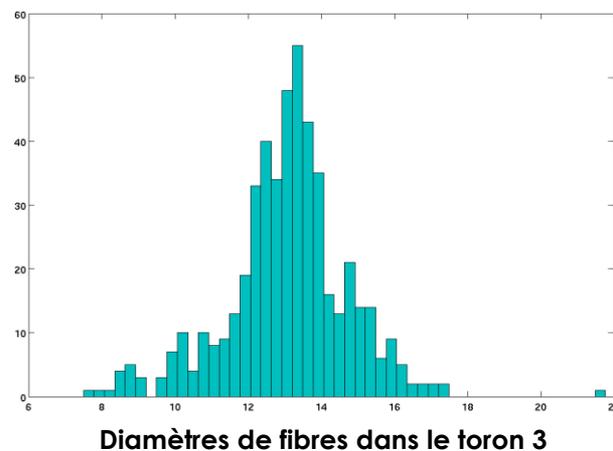
Fraction volumique



Extraction des pores



| | |
|---|---------------------------------------|
| Diamètre moyen des fibres | 13 μm |
| Variance de la distribution gaussienne des diamètres | 2,8 μm^2 |
| Fraction volumique de fibres | 55 % |
| Fraction volumique de porosité | ~ 4,1% |
| Distance minimum entre fibres | ~ 0 μm |



3. Génération de microstructures

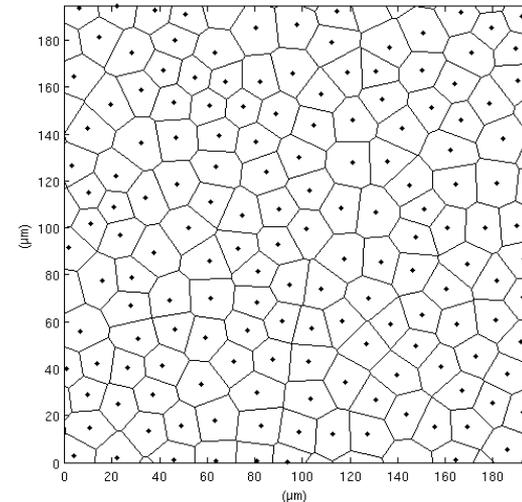
Paramètres d'entrée

- Fraction volumique de fibres
- Répartition normale des diamètres
- Nombre moyen de fibres
- Distance de répulsion

MATLAB



Ensemble des centres de fibres
et diamètres correspondants

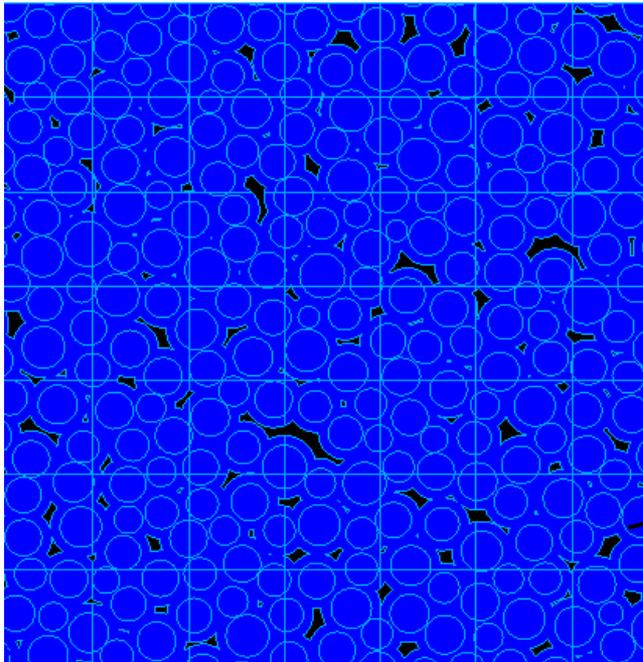


Exemple d'un tirage d'environ 150 points
(représentation avec tessellation de Voronoi)

Paramètres d'entrée

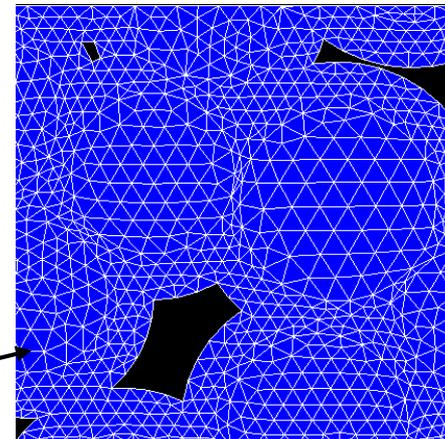
- Données issues du tirage de points
- Epaisseur **constante** de matrice

SALOME



Identification sur la **fraction surfacique de porosité**

$$e_m = 3,6 \mu\text{m} \rightarrow f_p = 4,3 \%$$

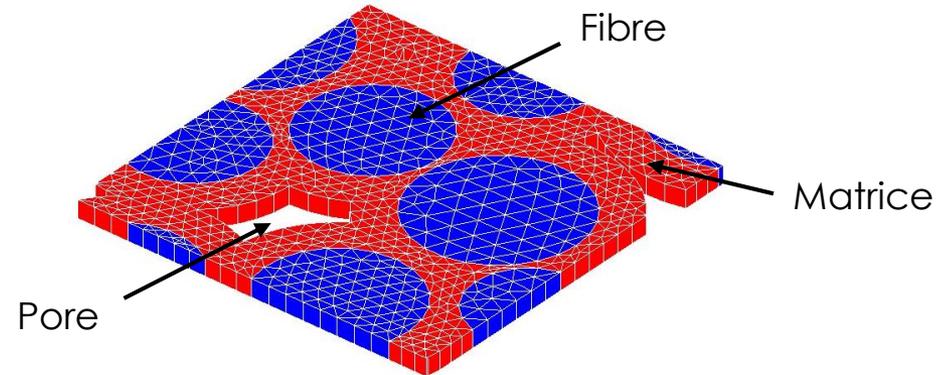


NB: Division du domaine en NxN microstructures  Notion de VER

4. Comportement mécanique

Hypothèse :

microstructure **invariante** dans la direction des fibres



Propriétés mécaniques : constituants **élastiques isotropes**

- $E_f = 372 \text{ GPa}$ (données fabricant)
- $E_m = 400 \text{ GPa}$

Calcul mécanique : (CAST3M)

- Calcul sur les NxN microstructures
- Application de 6 chargements indépendants

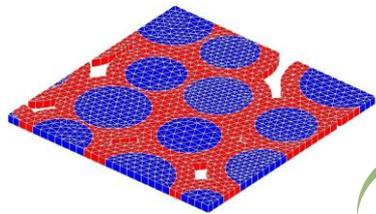
→ **Tenseur des modules apparent K^{app}** pour chaque volume élémentaire

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{K}}^{app} : \underline{\underline{\varepsilon}}$$

(Si volume grand : comportement effectif, Volume Elémentaire Représentatif)

Conditions aux limites disponibles :

- En déformations homogènes $u = \bar{\varepsilon} \cdot x$
 - ~~En contraintes homogènes $t = \bar{\sigma} \cdot n$~~
 - ~~Périodiques $t(x+L) = t(x)$ ou $u(x+L) = u(x) + \bar{\varepsilon} \cdot L$~~
 - Mixtes $(t - \bar{\sigma} \cdot n) \cdot (u - \bar{\varepsilon} \cdot x) = 0$
- Bornes**
- Estimation**



Microstructure poreuse non périodique

Application de conditions aux limites

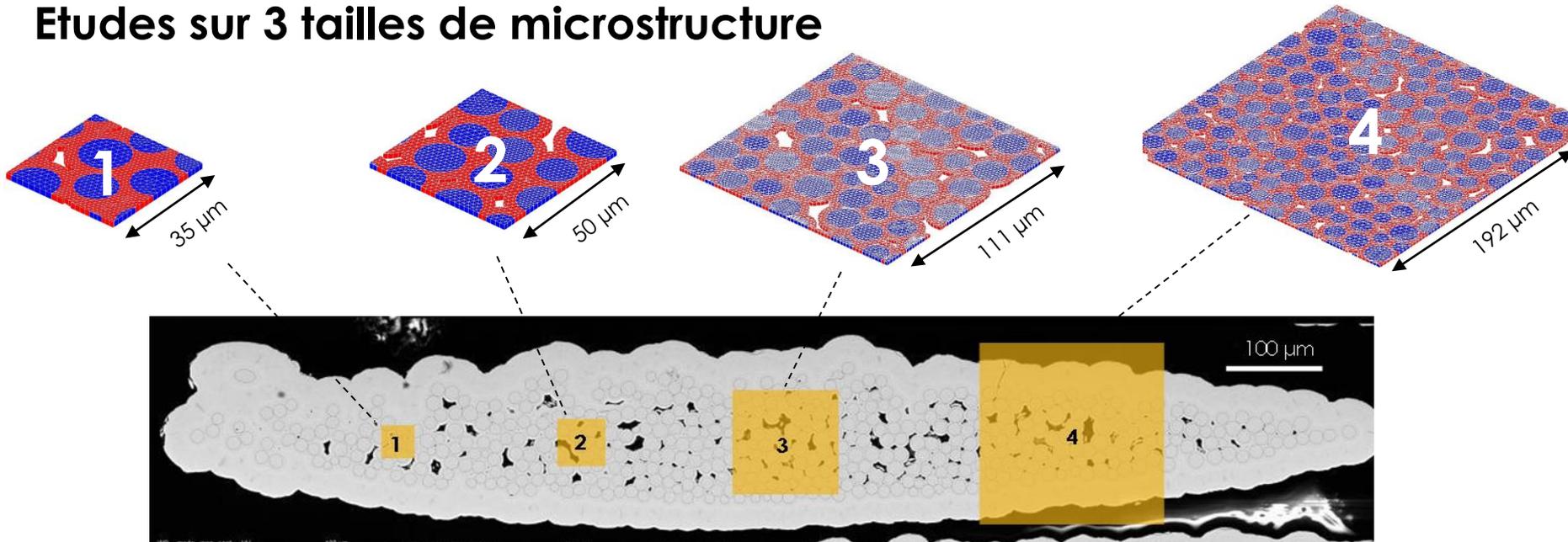
- En déformations homogènes (CLDH)
- Mixtes (CLMI) → Pahr^(*)

^(*)Pahr D., Zysset P., "Influence of boundary conditions on computed apparent elastic properties of cancellous bone", 2007, Biomechan Model Mechanobiol 7, 463-476

VER mécanique:

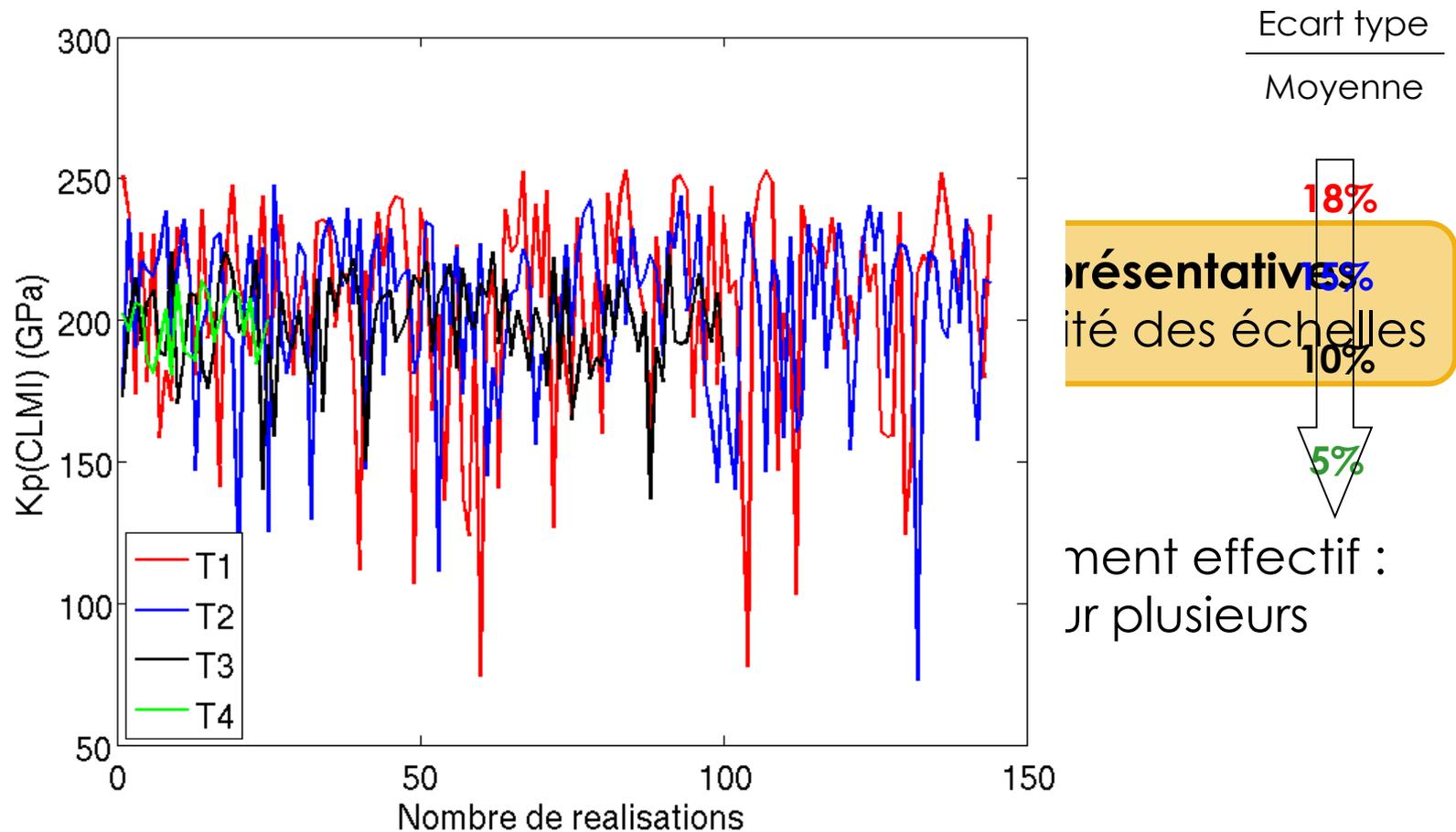
- Propriétés apparentes indépendantes du choix du VE
- Propriétés apparentes stables si la taille du VE augmente
- Comportement apparent indépendant des conditions aux limites imposées

Etudes sur 3 tailles de microstructure

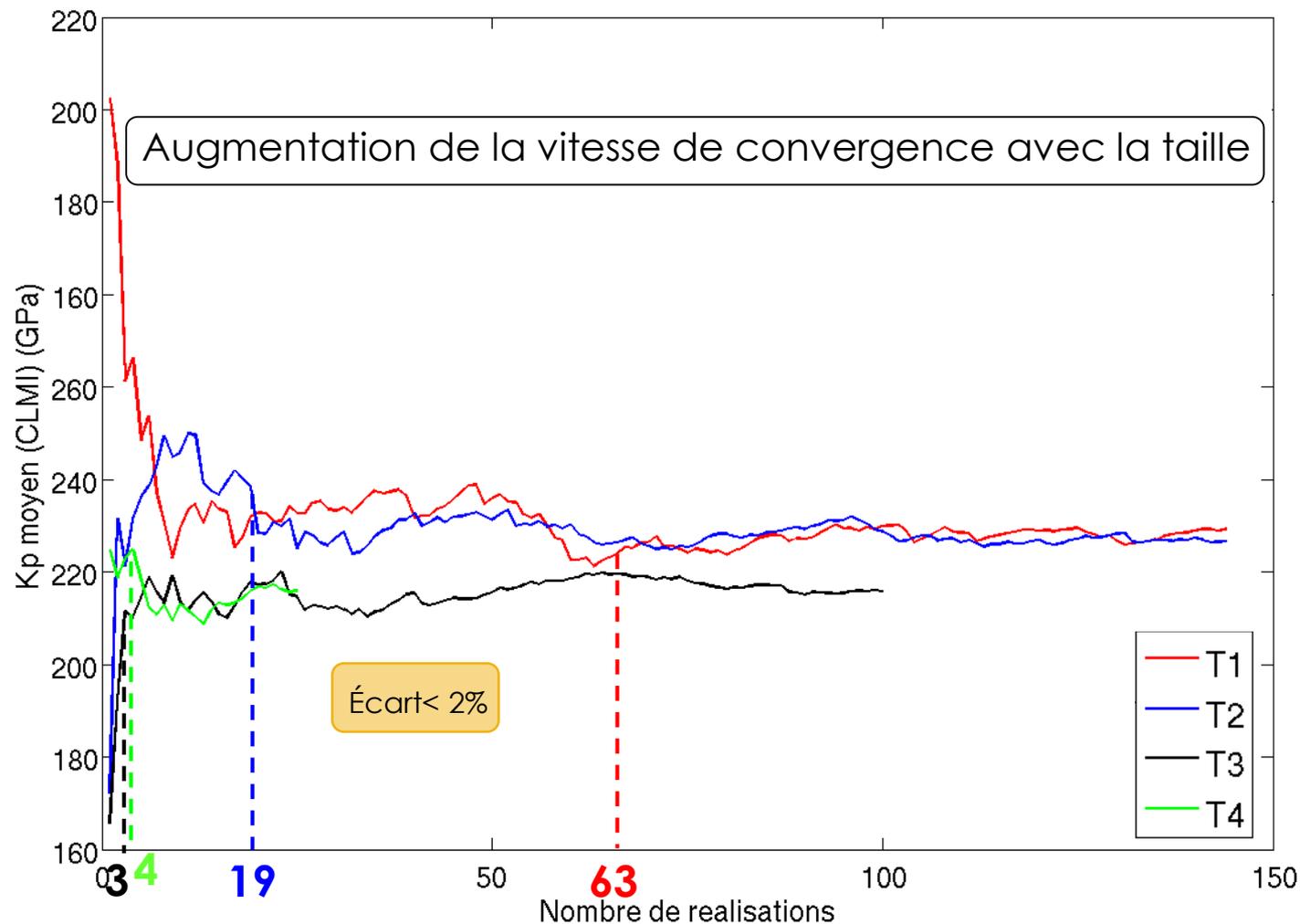


Coefficient de compressibilité plane $K_p = \frac{1}{2} (K_{11}^{app} + K_{12}^{app})$

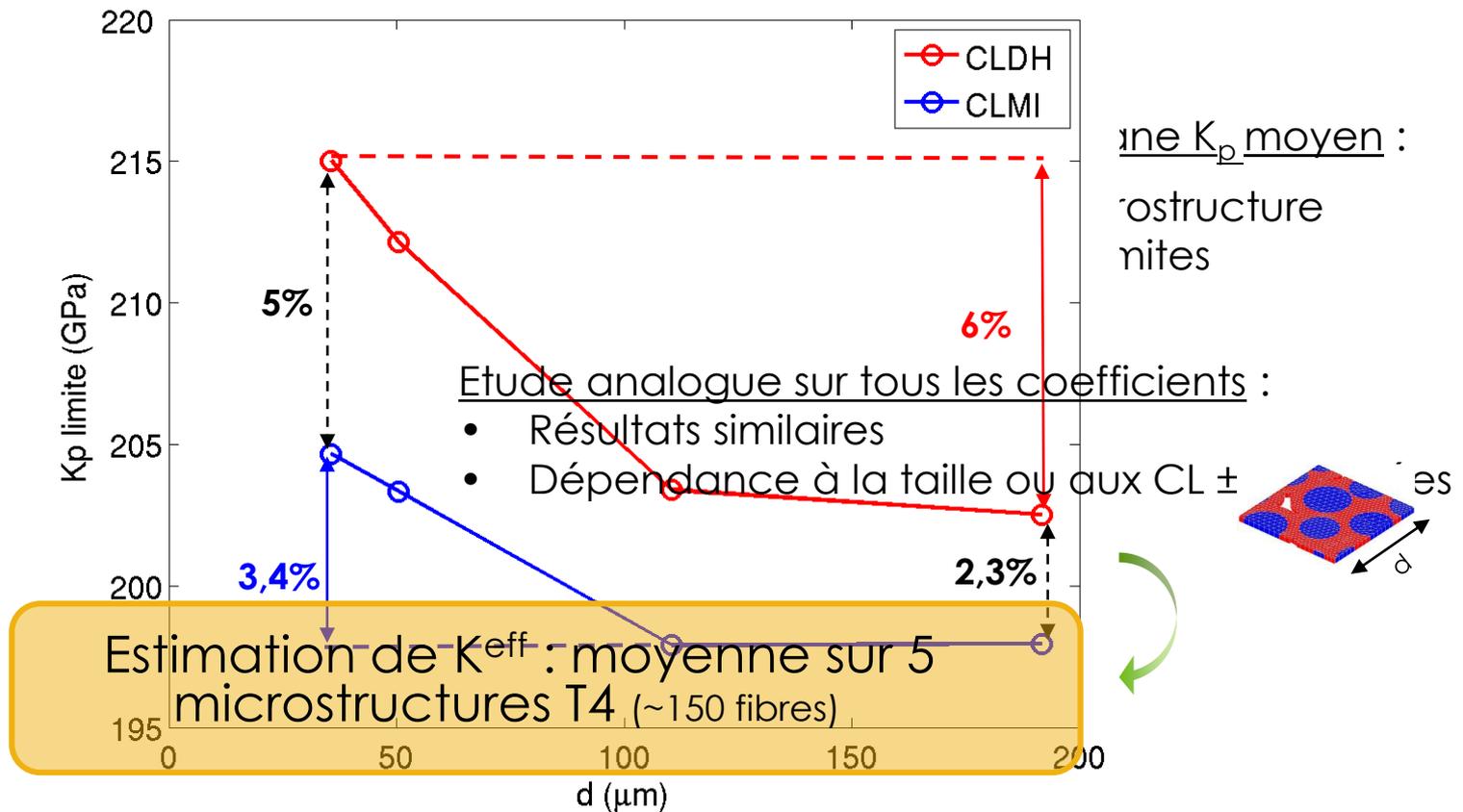
Fluctuations d'une microstructure à l'autre

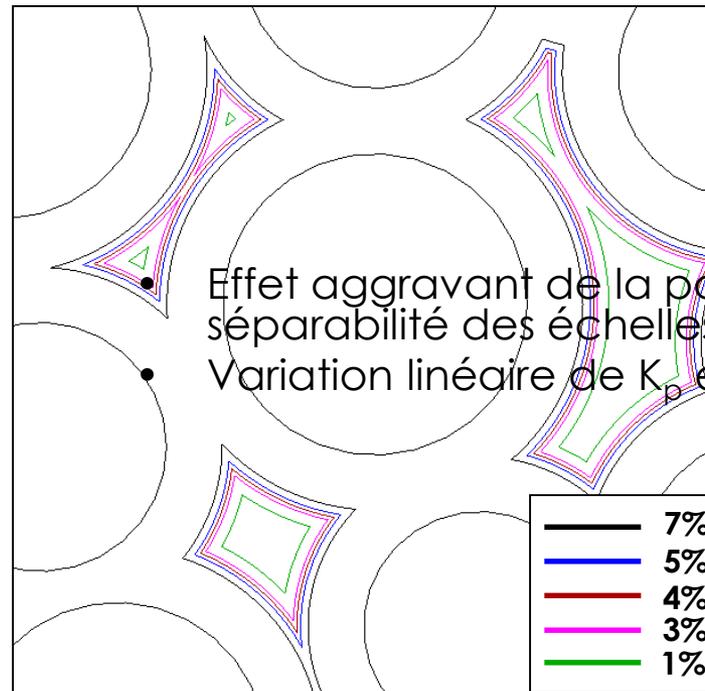


Convergence

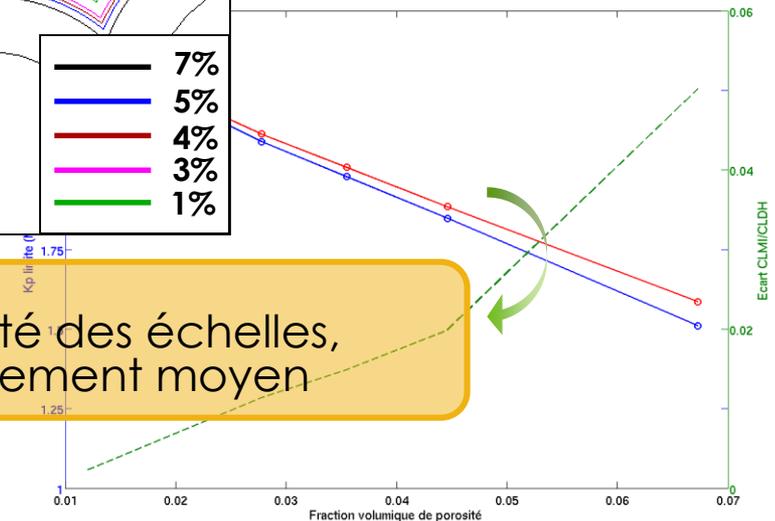


Effet de la taille et des conditions aux limites sur la valeur de convergence





- Effet aggravant de la porosité sur les problèmes de séparabilité des échelles
- Variation linéaire de K_p en fonction de f_p (entre 1% et 7%)



(entre 3% et 5% de porosité)
Pas d'effet sur la séparabilité des échelles,
variations du comportement moyen

- **Critères de séparabilité des échelles non remplis**
- **Estimation de K^{eff}** : moyenne sur 5 microstructures T4
- Comportement moyen sensible à la **fraction volumique de porosité**



Impact à l'échelle de la structure ?

Bilan et perspectives

Etat initial

Développements

Résultats

Perspectives

Caractérisation

∅

Génération microstr.

{ 1 microstructure
Diamètre constant

Comportement méca

1 chargement

Acquisition d'images
Traitements d'images

Diamètre variable
Procédure itérative

Tenseur apparent
CLMI

Caractérisation significative

Lien avec les observations

{ Séparabilité des échelles
Comportement moyen

Macroporosité, 3D

Représentation plus fine ?
3D

Hétérogénéités de contrainte
CLMI
Comparaison des résultats
Echelle supérieure

Merci de votre attention



Questions ?