



# Etude de la déformabilité de paquets de fibres

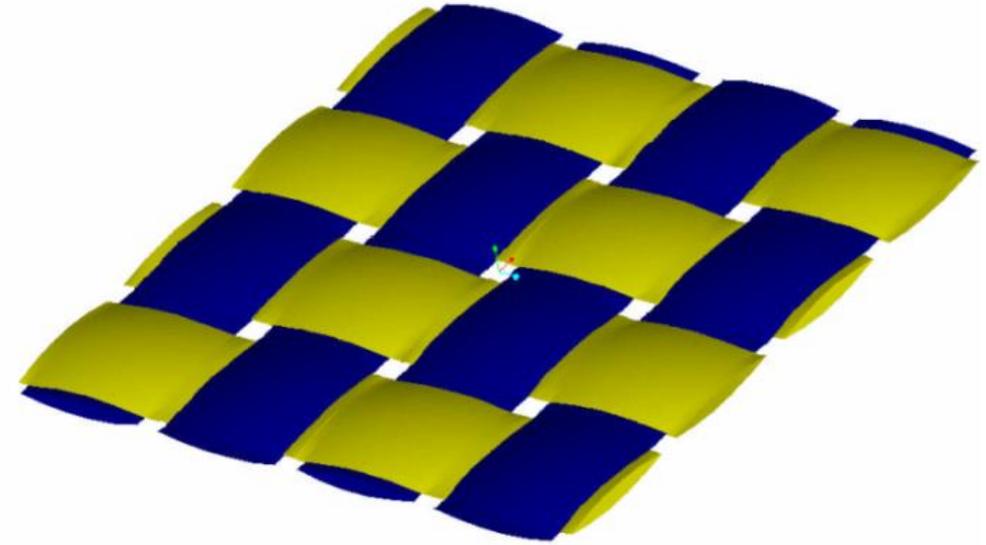
---

Audrey HIVET, Anwar SHANWAN,  
Xinling SONG, Gilles HIVET,  
Oussama HAJI, et plein d'autres

Développer une stratégie efficace pour **simuler** le comportement mécanique de **mèches de fibres** et de **cellules élémentaires** de renforts tissés sous sollicitations simples

Modèles géométriques

Loi de comportement



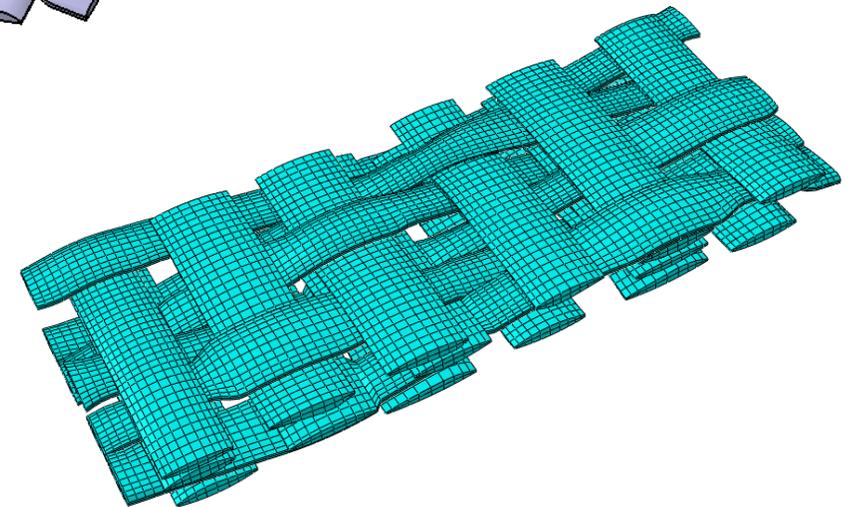
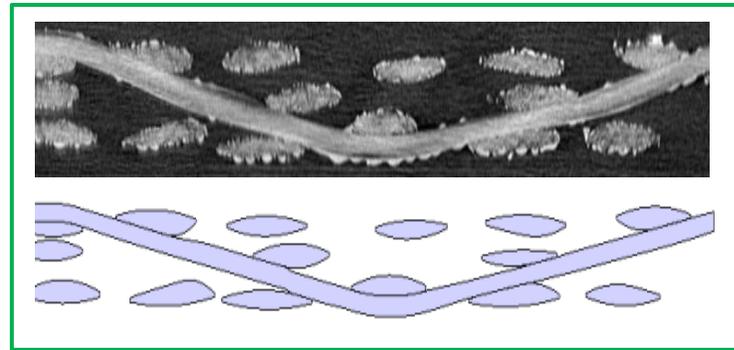
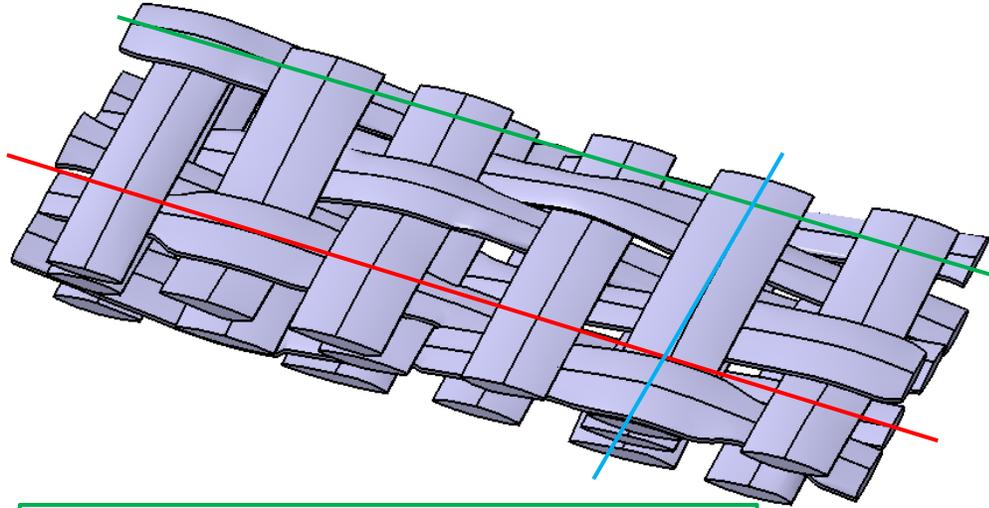
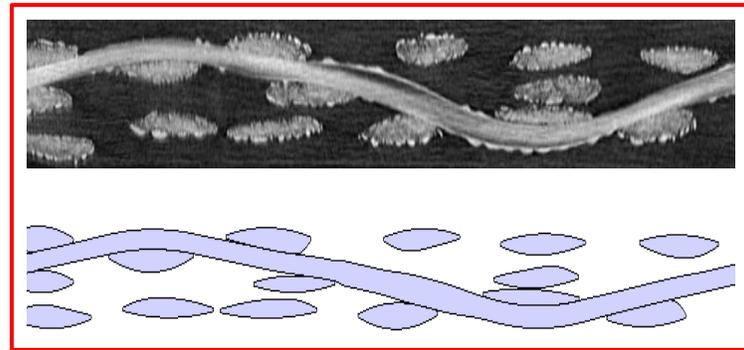
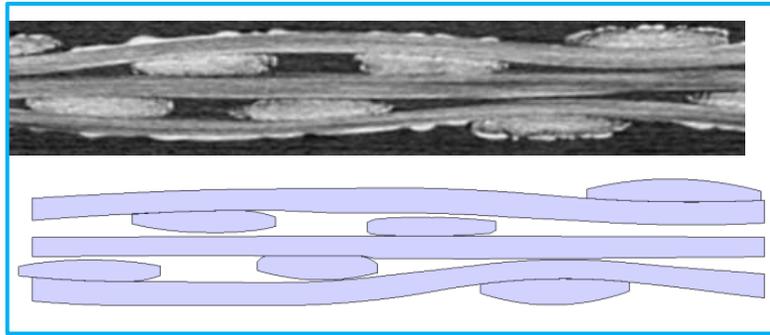
# CONTEXTE

---

Simulation à l'échelle mésoscopique de la déformabilité de renforts tissés

# Modèles géométriques

- GeoFab : génération automatisée de cellules élémentaires de renforts tissés + maillage



Wendling A., Daniel J.L., Hivet G., Vidal-Sallé E., Boisse P., « Meshing preprocessor for the mesoscopic 3D finite element simulation of 2D and interlock fabric deformation », *Applied Composite Materials*, DOI : 10.1007/s10443-015-9441-8

Wendling A., Hivet G., Vidal-Sallé E., Boisse P., « Consistent geometrical modelling of interlock fabrics », *Finite element in analysis and design*, 90, 93-105, 2014

# Loi de comportement

- Mèches considérées homogènes → Définition d'un matériau homogène équivalent :  
Hérite du **comportement des fibres seules**  
+ caractéristiques liées à l'**assemblage** de ces fibres sous forme de mèche



Non linéarités géométriques

- Grands déplacements
- Grandes déformations des mèches

Non linéarités matérielles

Mèches constituées de milliers de fibres

Isotropie transverse

Analyse d'observations tomographiques

Forte anisotropie

Rigidité de la mèche dans la direction longitudinale >>> aux autres rigidités  
→ nécessité de suivre parfaitement cette direction

# Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

## loi de comportement hypoélastique non linéaire

suivi des directions matérielles

- **dérivée objective** basée sur la **rotation de la direction des fibres**

Tenseur de comportement **isotrope transverse** dans la base des directions matérielles

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} d\varepsilon_{kl}$$

Traction

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{1313} \end{bmatrix}$$

Symétrie

Pas d'identification inverse sur renforts

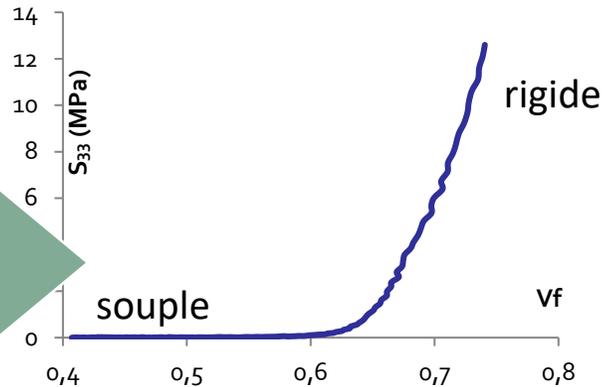
Identifier le comportement de la mèche

# Comportement en compaction/compression

1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes

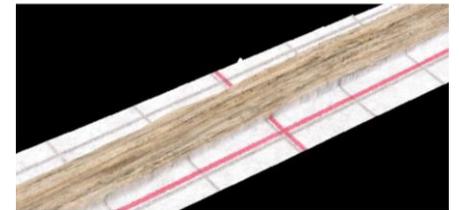


3. Pression de compaction uniaxiale =  $f(V_f)$  (Toll1998, Latil2011)

$$P = KE (V_f^Y - V_{f0}^Y)$$

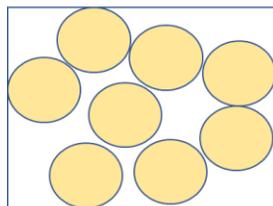
4. Section des mèches rectangulaire en sortie de bobine (Nauman 2011 + Larquemin 2021)

⇒ Hypothèse de répartition uniforme de pression

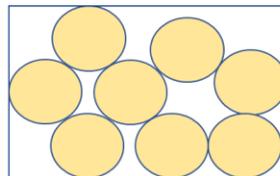


augmentation de la fraction volumique

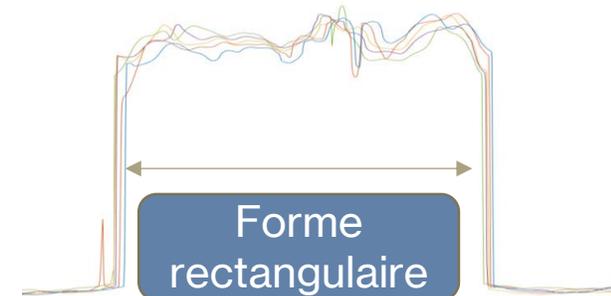
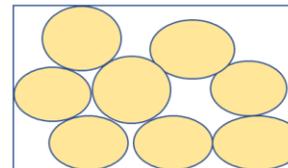
augmentation de la rigidité de compaction



Application du chargement

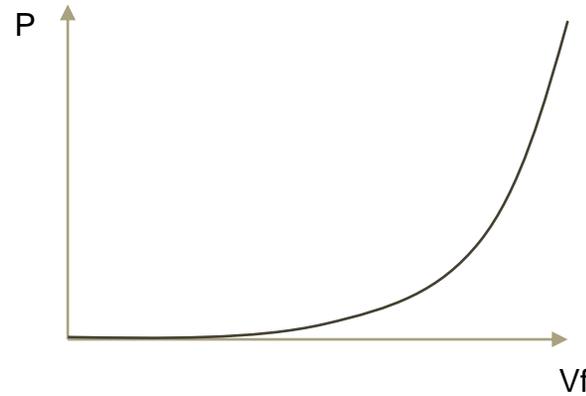


Application du chargement



# Comportement en compaction/compression

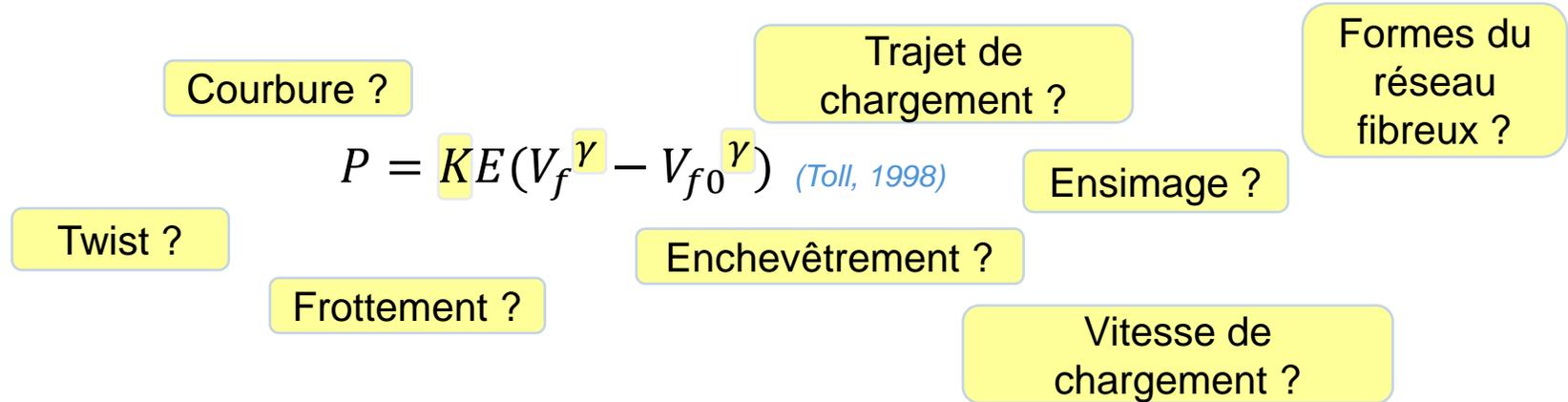
$$P = KE \left( V_f^\gamma - V_{f_0}^\gamma \right)$$



Approche empirique  
Identification de  $K$  et  $\gamma$  par des essais

What inside?

Peut-on proposer d'autres paramètres ?

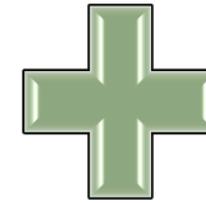




Créer un estimateur virtuel permettant de réaliser des études paramétriques et identifier les phénomènes mis en jeu



Stratégie de simulation numérique



Création de l'estimateur

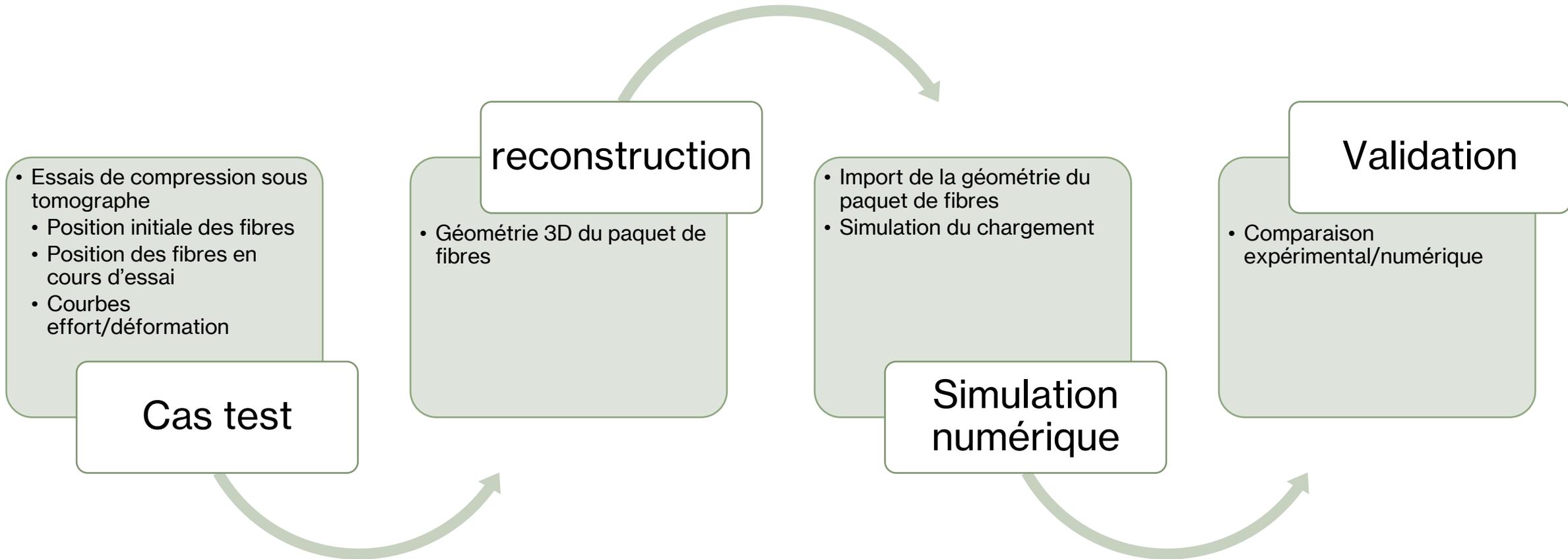
# OBJECTIF



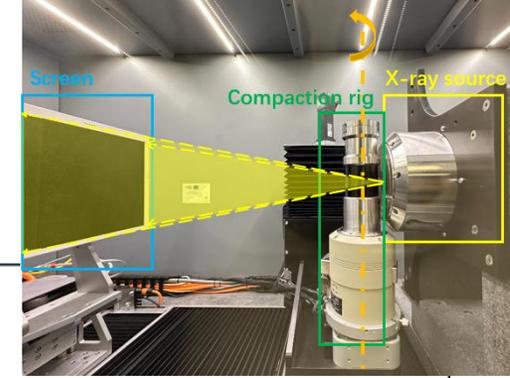
Thèses O. Haji (soutenue en 2018)  
Thèse X. Song (soutenue en 2024)

# Stratégie de simulation et validation

Outils:  
FIJI  
MATLAB  
CATIA V5®  
ABAQUS®



# Stratégie de simulation et validation



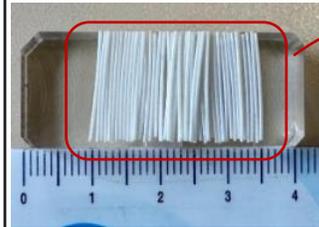
## Création d'un échantillon test

Polyester fiber (PE)	
Diameter	0.5mm
Length	≈14.5mm
Coefficient of friction ( $\mu$ )	0.2 (Gassara, 2016)
Poisson ratio ( $\gamma$ )	0.25
Density ( $\rho$ )	1.38e-09 T/mm <sup>3</sup>

Fibres sèches

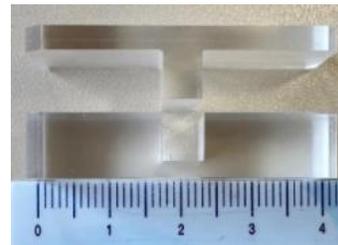
Faible cohésion entre les fibres

## Type de chargement



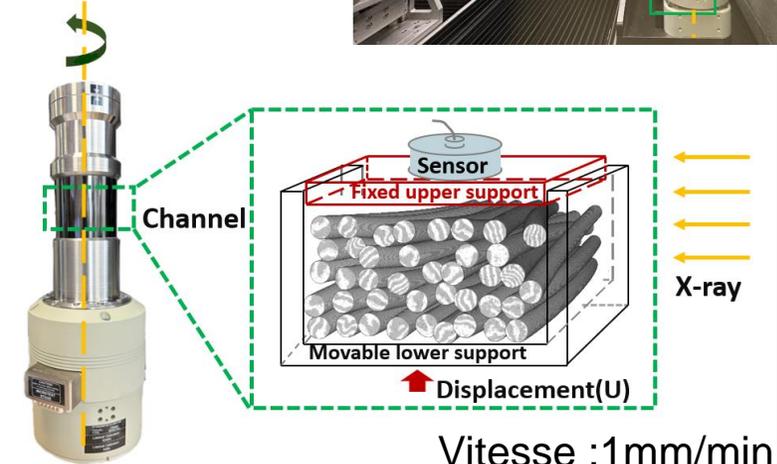
Compaction simple : les fibres tendent à s'étaler d'elles-mêmes

Compaction confinée  
→ création d'un dispositif spécifique



PMMA  
(poly (methyl methacrylate))

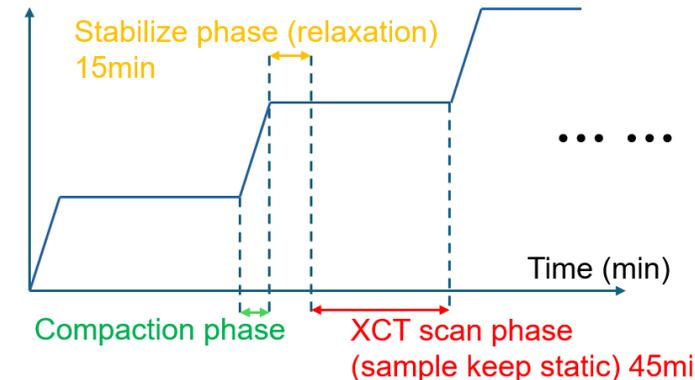
## Paramètres



Micro-compaction machine

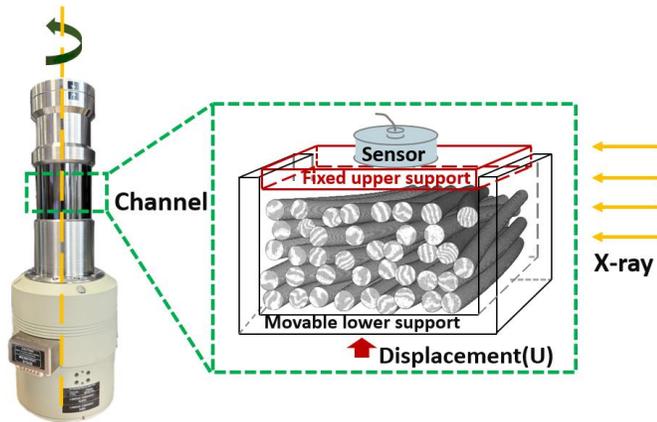
Vitesse : 1mm/min  
Capteur: 500N

Displacement (mm)

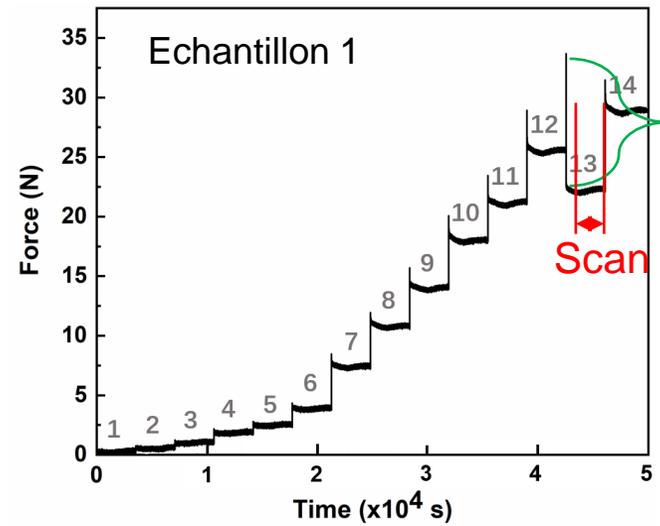
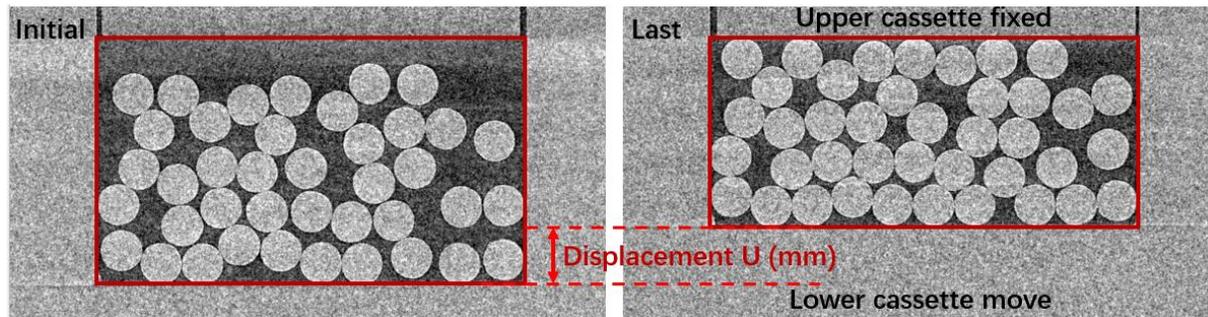


# Stratégie de simulation et validation

## • Résultats



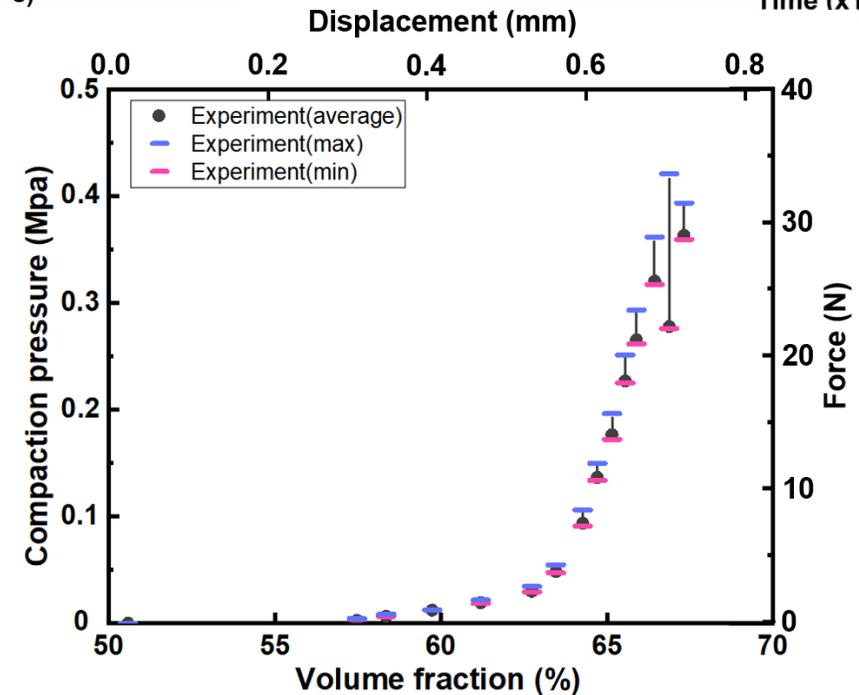
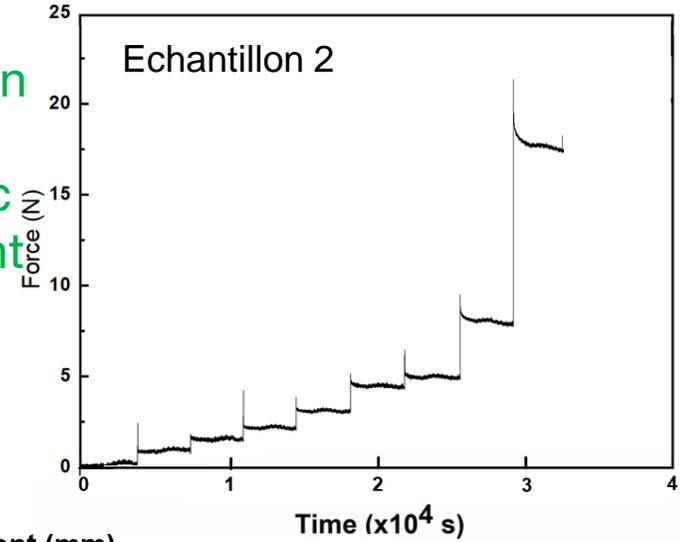
Micro-compaction machine



Relaxation

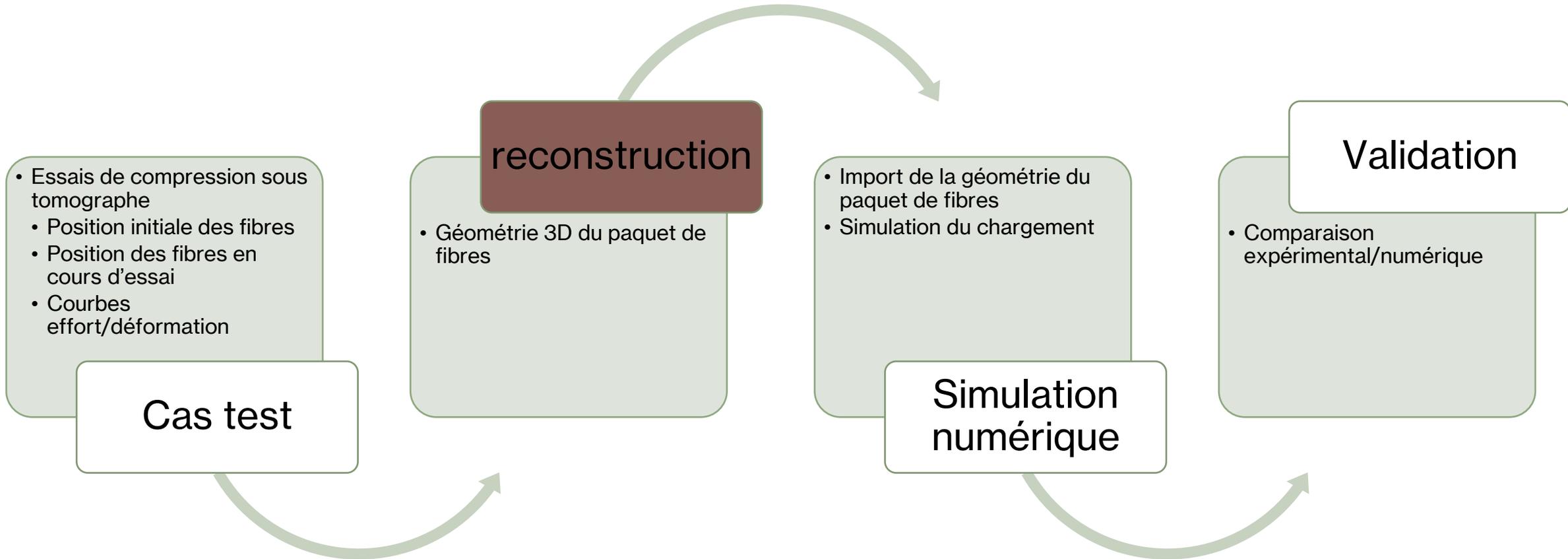
Dynamic movement

Scan



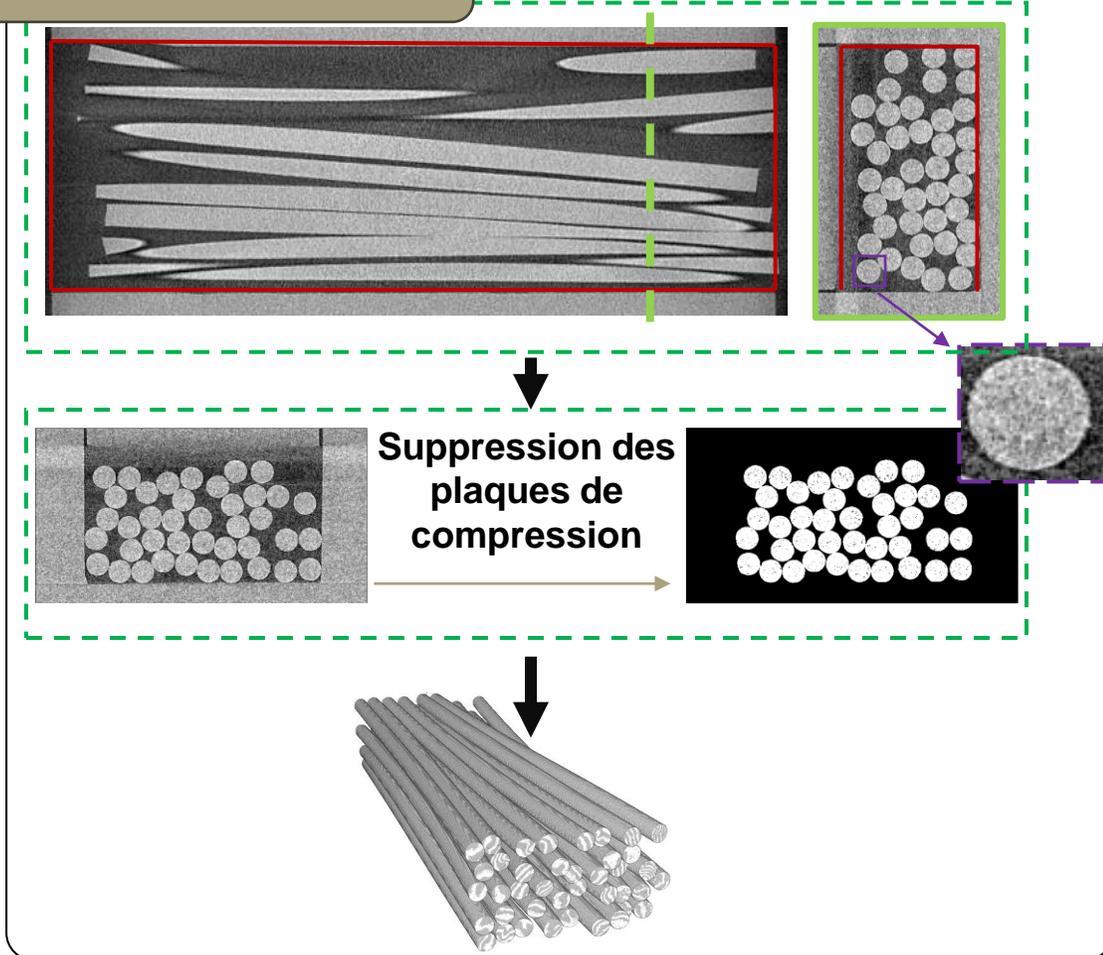
# Stratégie de simulation et validation

Outils:  
FIJI  
MATLAB  
CATIA V5®  
ABAQUS®



# Stratégie de simulation et validation

## Post-traitement FIJI

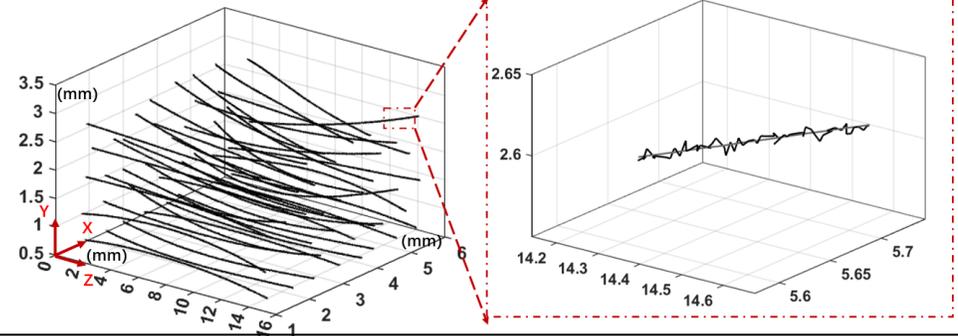
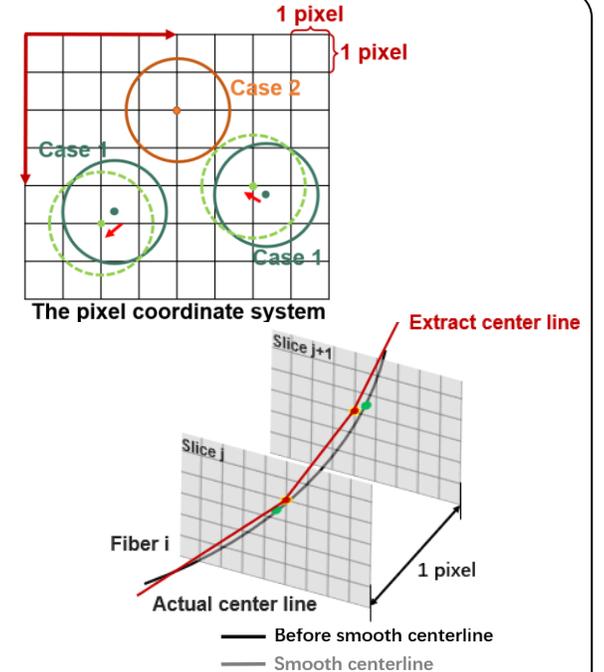


## Traitement MATLAB

Détection des centres de section de chaque fibre

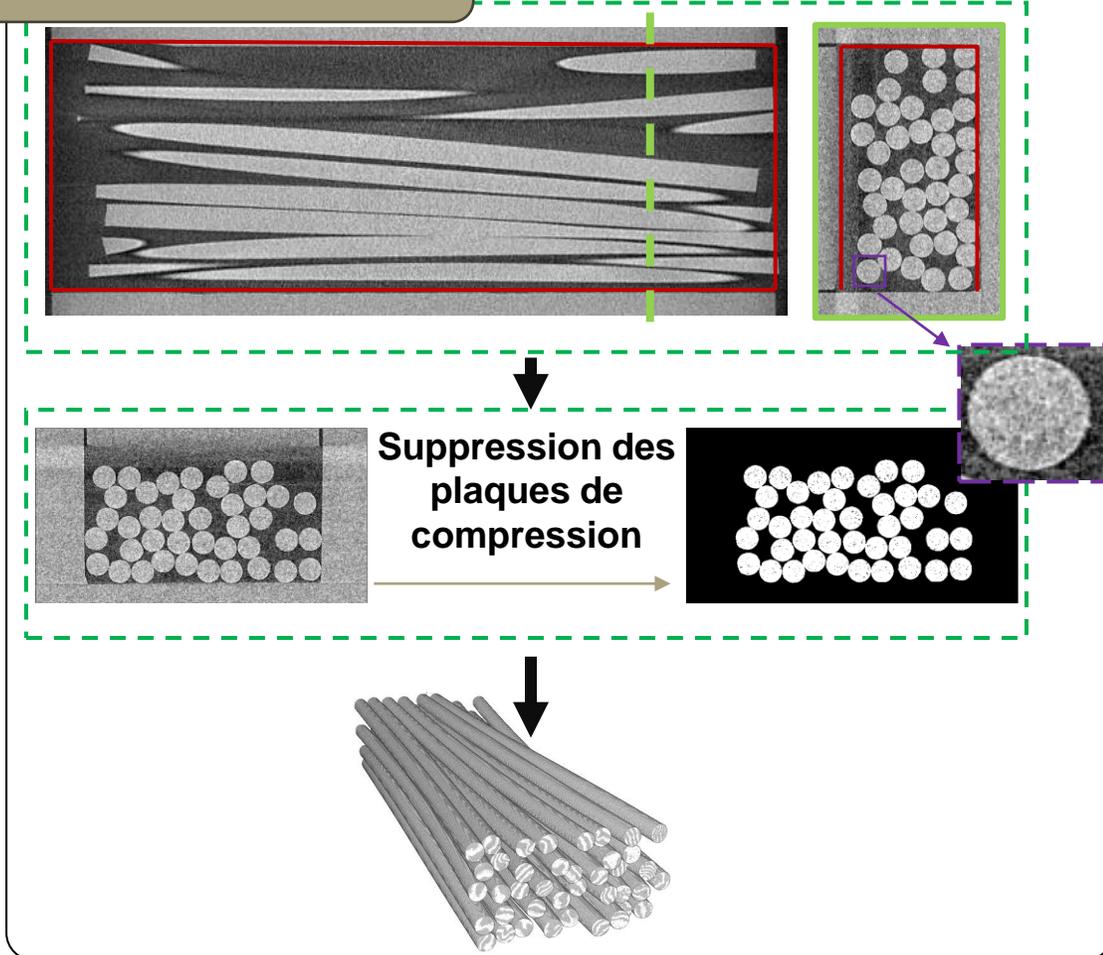
Raccordement des centres de section

Lissage



# Stratégie de simulation et validation

## Post-traitement FIJI

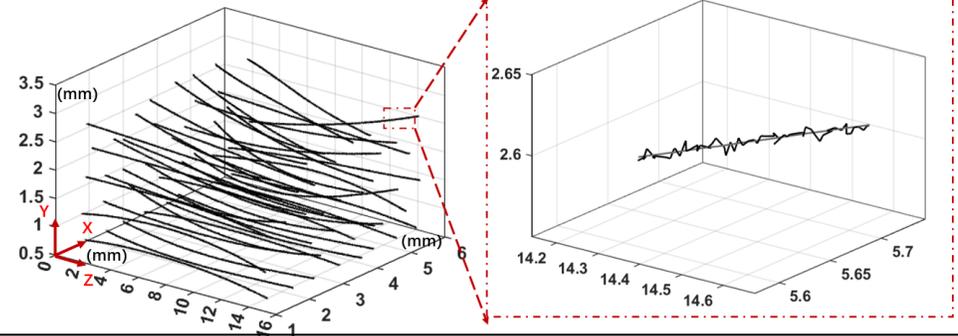
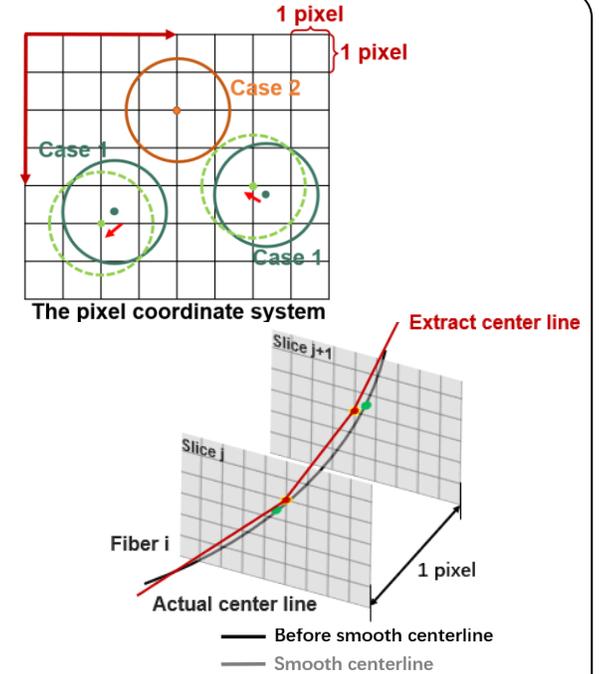


## Traitement MATLAB

Détection des centres de section de chaque fibre

Raccordement des centres de section

Lissage

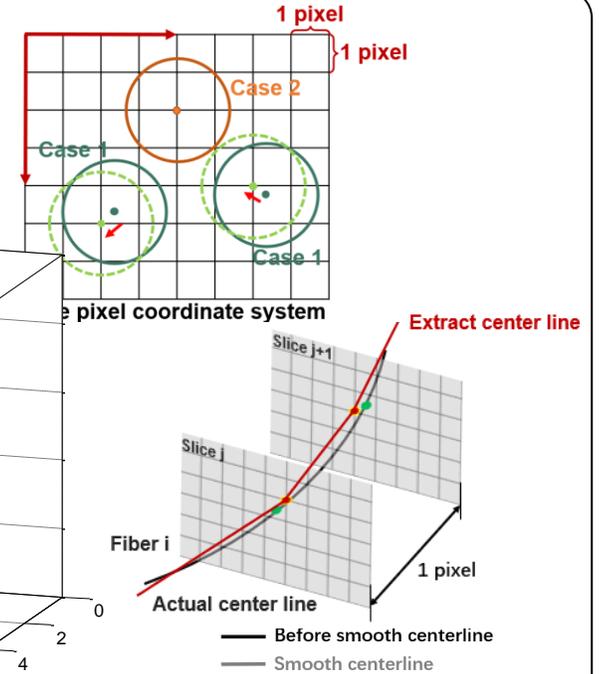


# Stratégie de simulation et validation

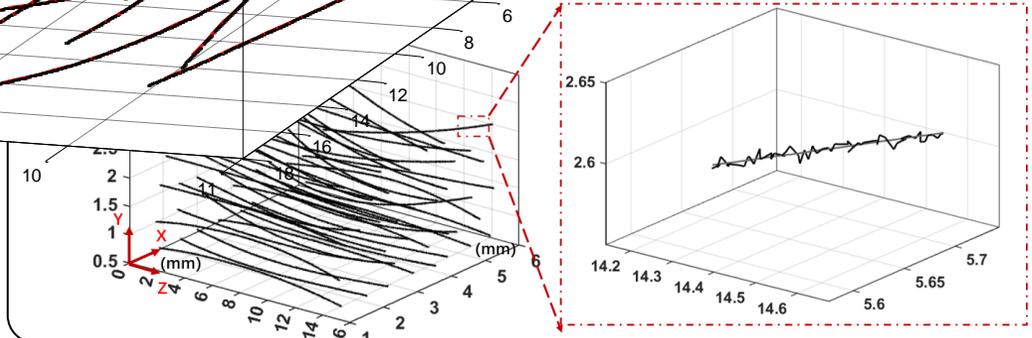
Post-traitement FIJI

Traitement MATLAB

Détection des centres de section

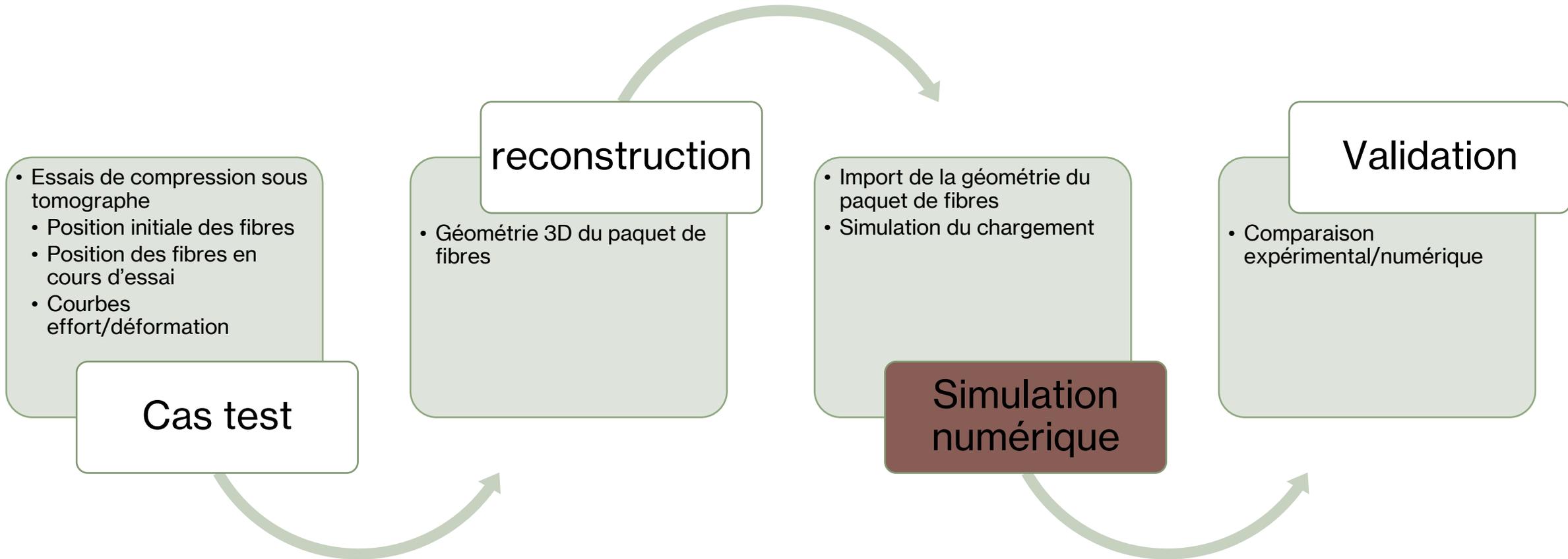


Les deux microstructures initiales sont bien confondues

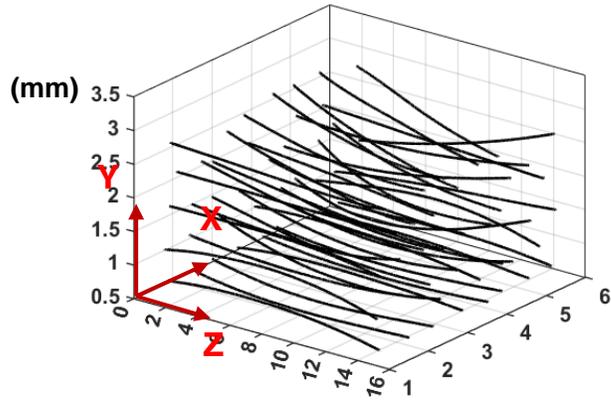


# Stratégie de simulation et validation

Outils:  
FIJI  
MATLAB  
CATIA V5®  
ABAQUS®

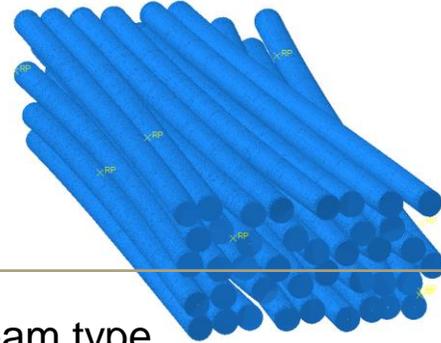


# Stratégie de simulation et validation



Géométrie du paquet de fibres issu de la reconstruction

ABAQUS/EXPLICIT®



Beam type

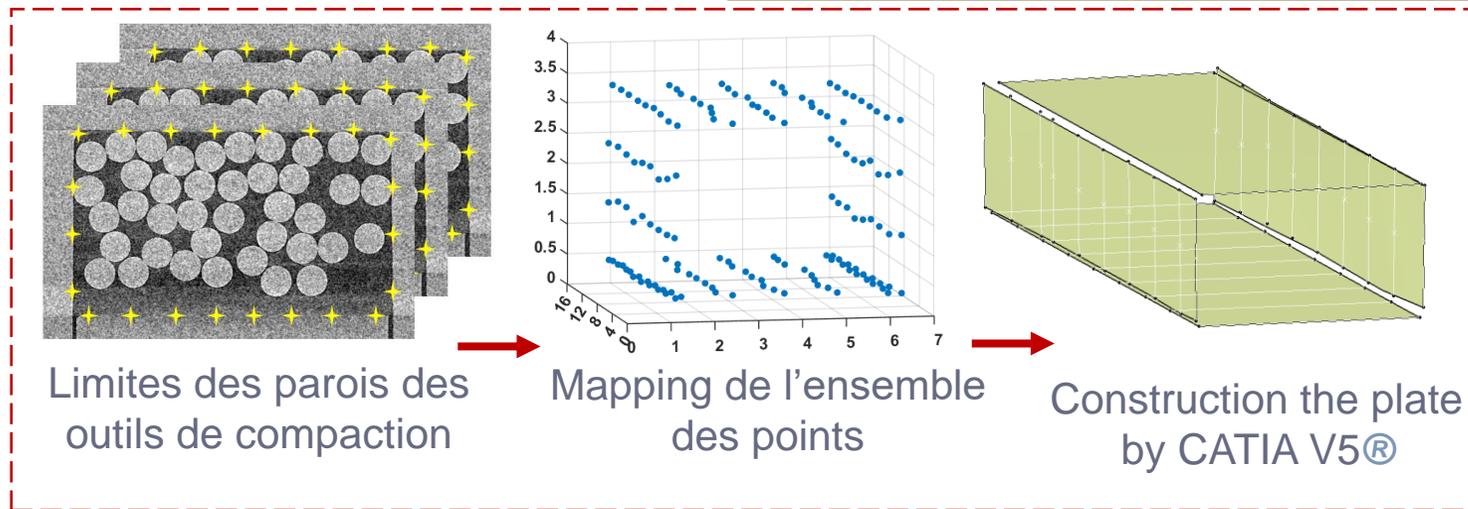
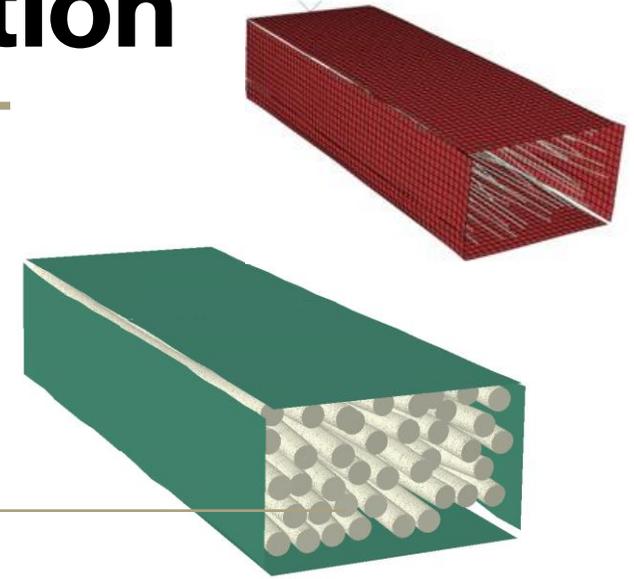
B31

Compaction plate type

Discrete rigid finite elements

Compaction speed

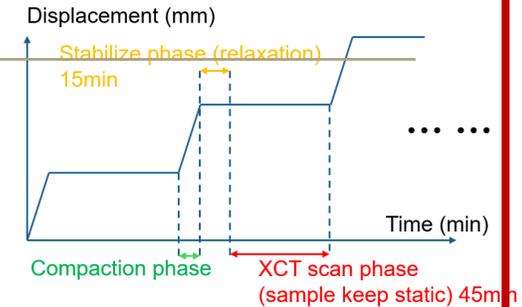
$10^3$  mm/min



Limites des parois des outils de compaction

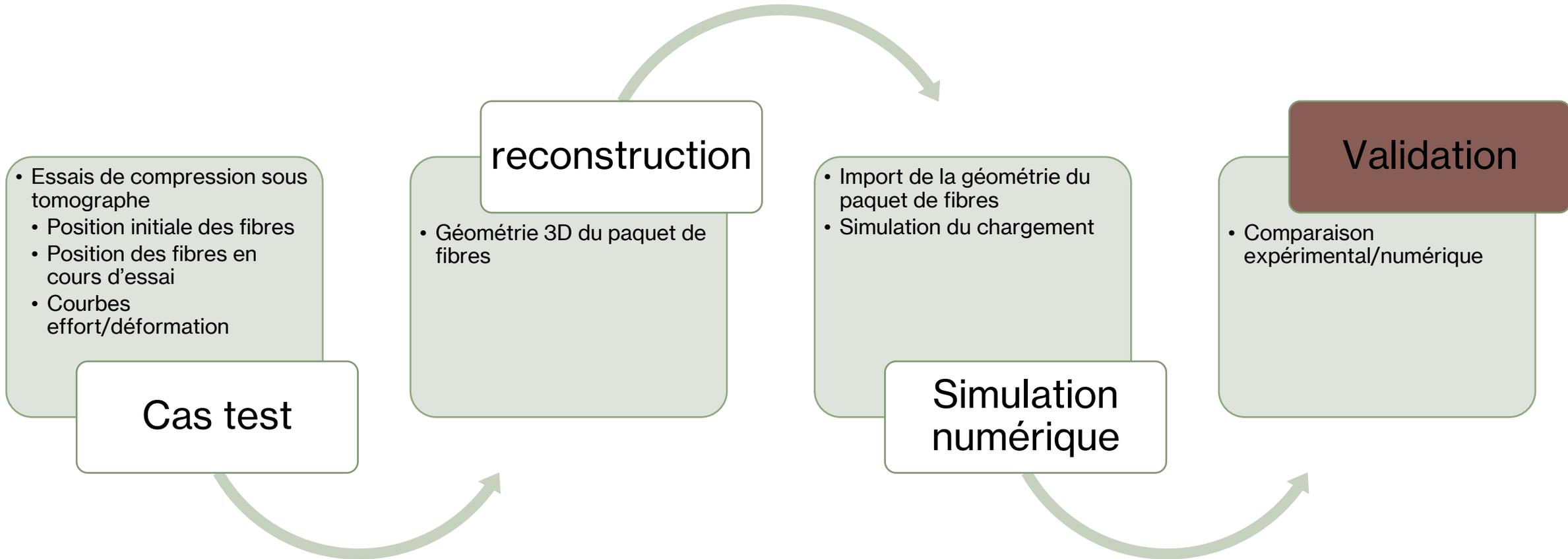
Mapping de l'ensemble des points

Construction the plate by CATIA V5®

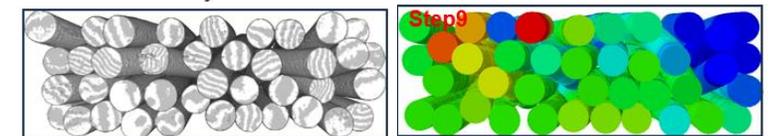
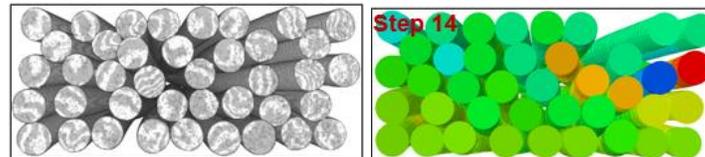
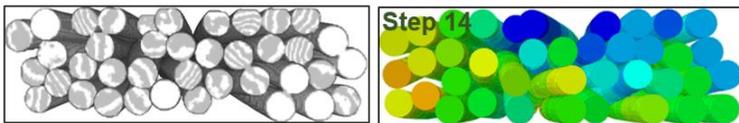
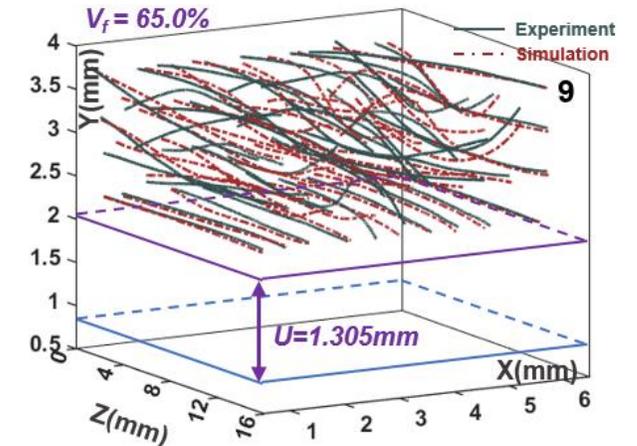
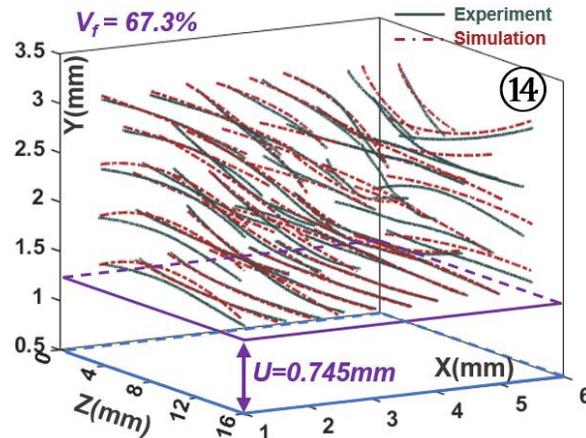
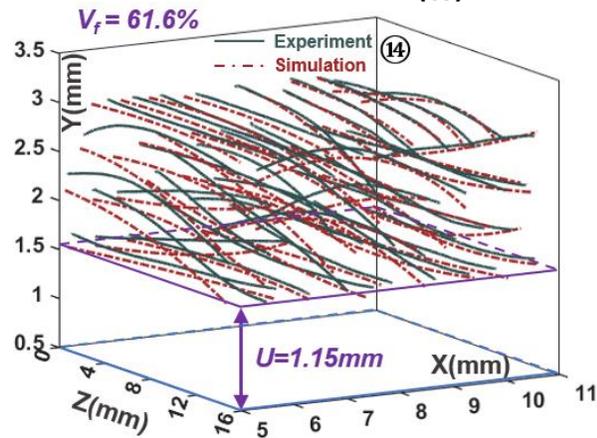
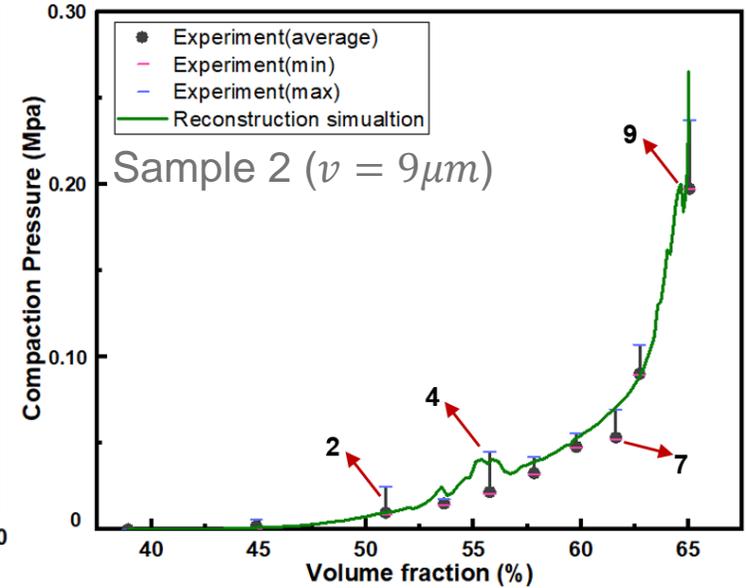
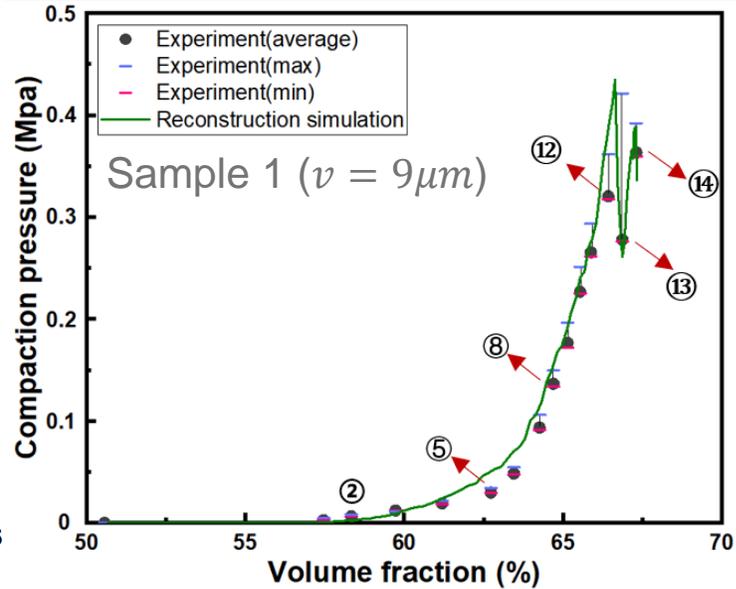
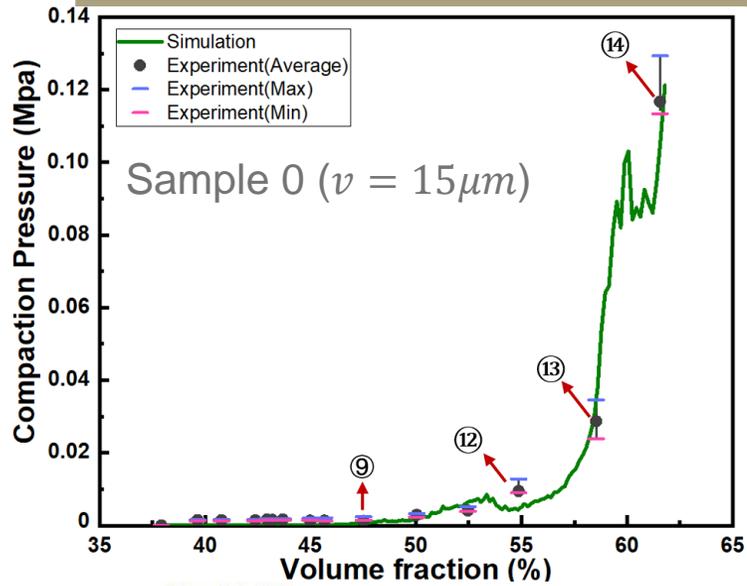


# Stratégie de simulation et validation

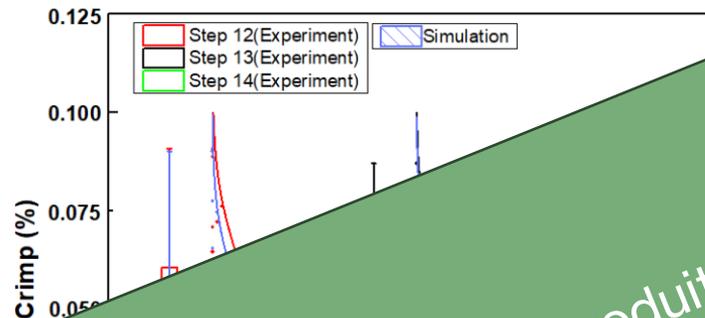
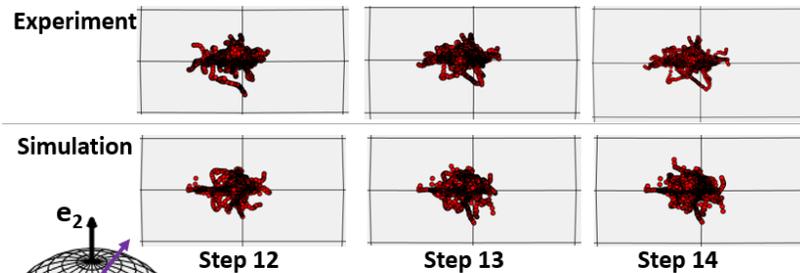
Outils:  
FIJI  
MATLAB  
CATIA V5®  
ABAQUS®



# Stratégie de simulation et validation

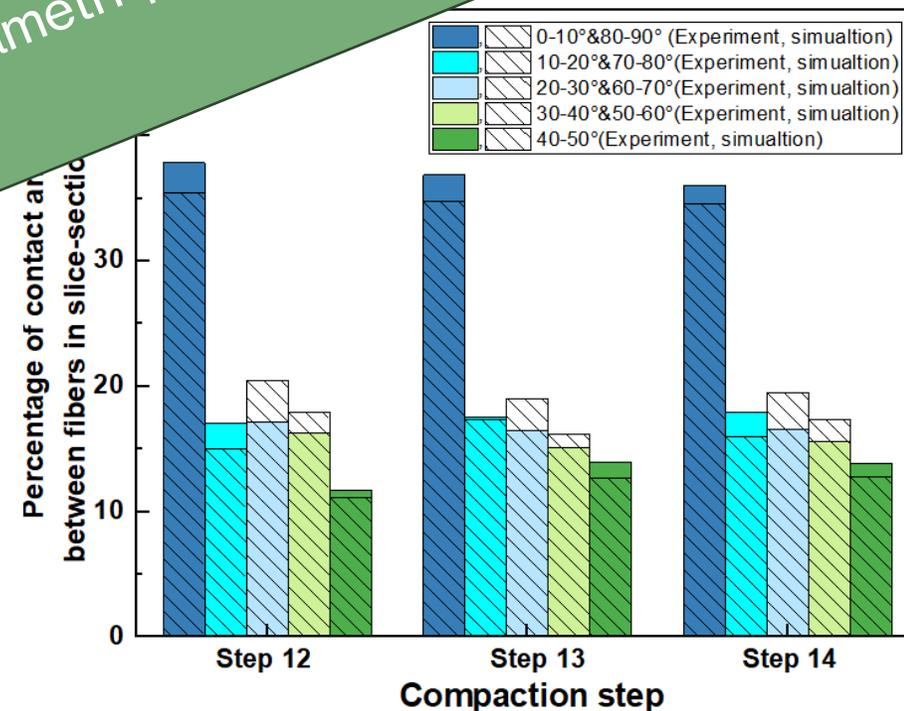
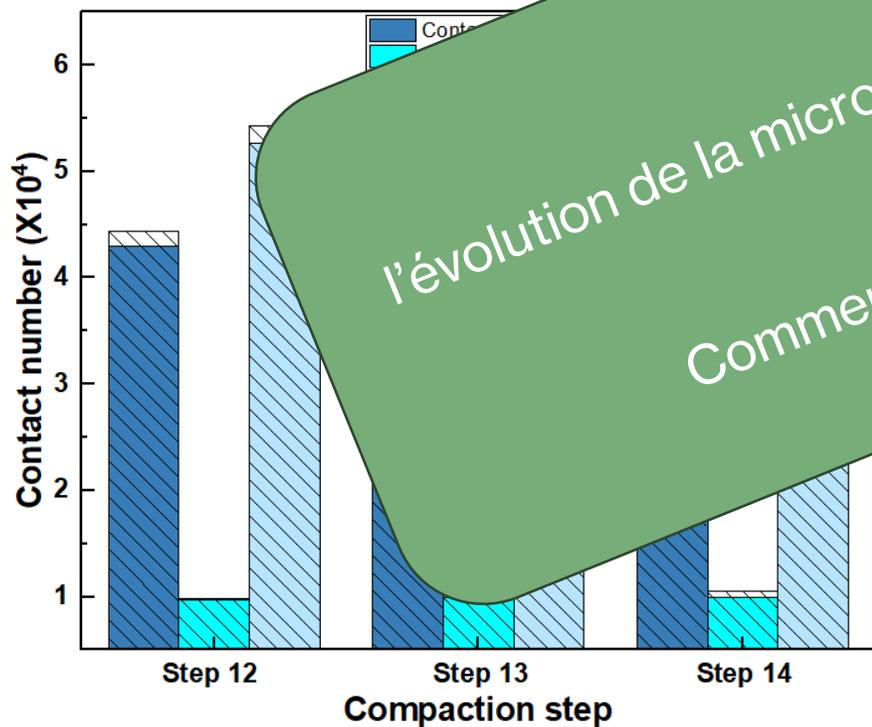


# Stratégie de simulation et validation



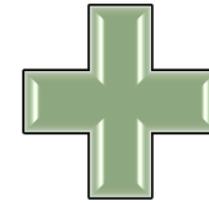
Indicateurs de la microstructure

Conclusion :  
 l'évolution de la microstructure numérique reproduit bien celle des  
 essais expérimentaux  
 Question :  
 Comment réaliser des essais paramétriques ?



Créer un estimateur virtuel permettant de réaliser des études paramétriques et identifier les phénomènes mis en jeu

Stratégie de simulation numérique



Création de l'estimateur

# OBJECTIF



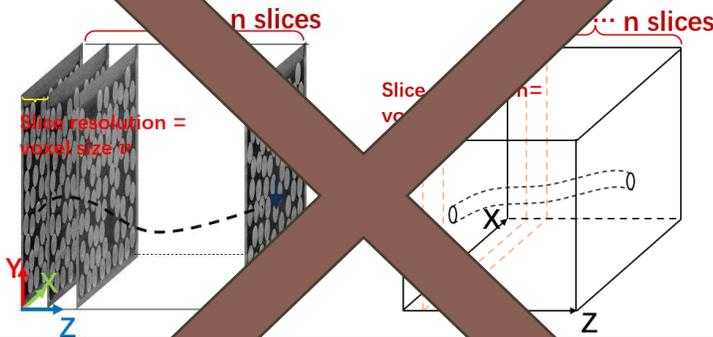
# Création d'un estimateur virtuel

Objectif : création automatisée de paquets de fibres réalistes

- Contrôler le trajet des fibres à partir de paramètres d'entrée
- Éviter les pénétrations

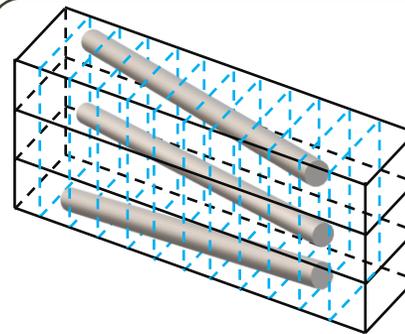
Solution 1

Create fiber point in each slice and connect the point.

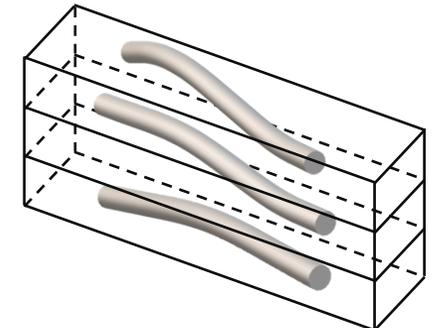


Ne permet pas d'éviter les pénétrations entre fibres

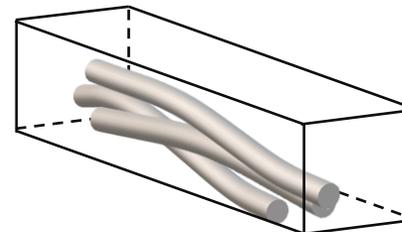
Solution 2 : créer des « strates » de fibres isolées (N fibres → N strates) puis imposer un step de gravité



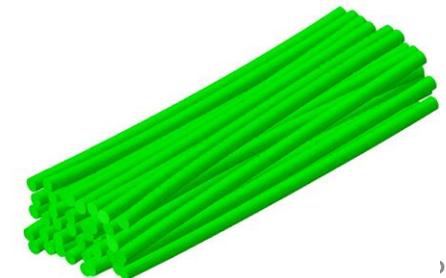
Etape 1: creation de fibres droites avec désorientation (MATLAB)



Etape 2: Application d'une ondulation (MATLAB)

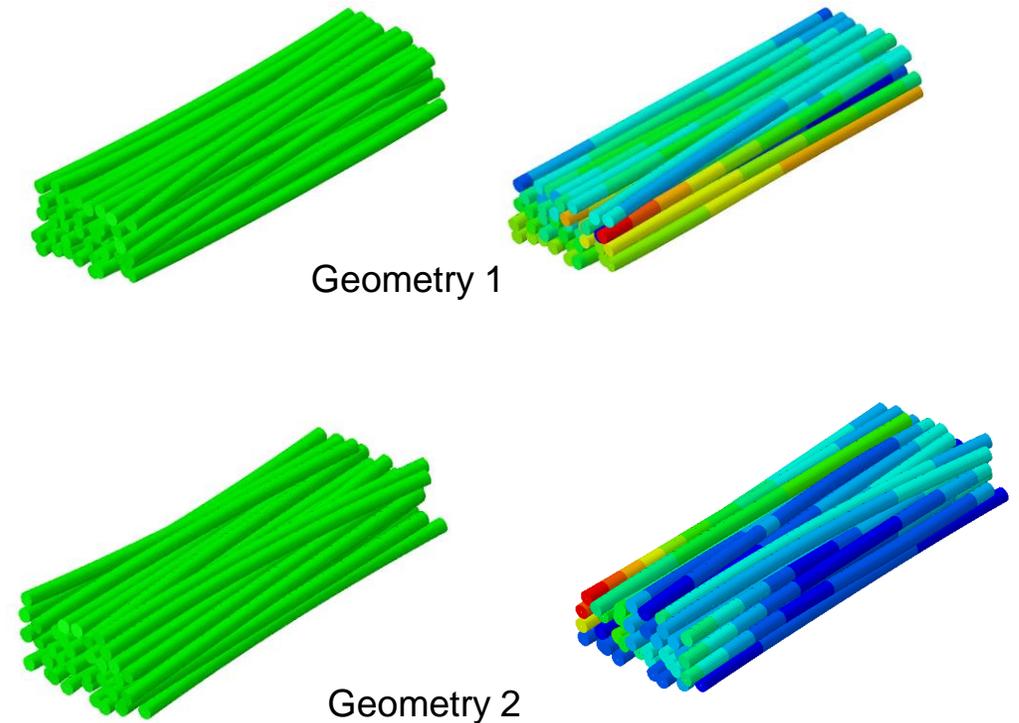
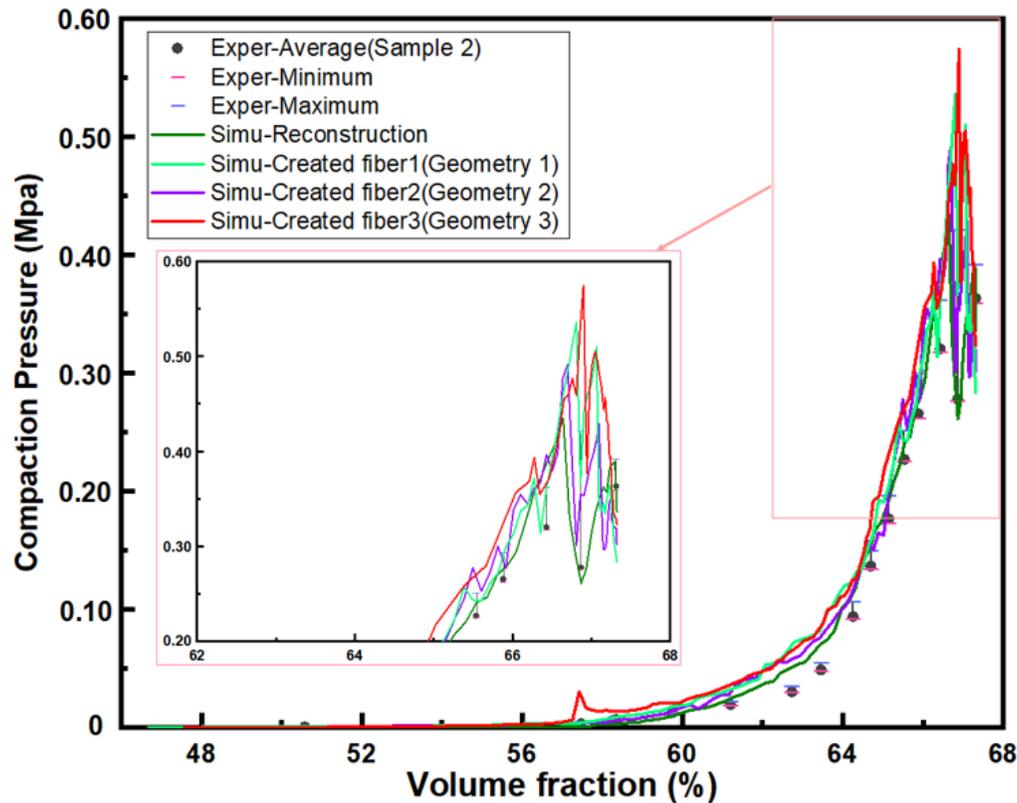


Etape 3: Gravité (ABAQUS®)



# Création d'un estimateur virtuel

- Validation : création d'une géométrie avec les mêmes paramètres que celle des essais expérimentaux



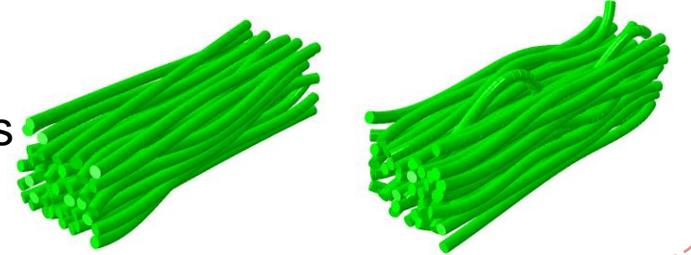
# Création d'un estimateur virtuel

- Possibilités « infinies »

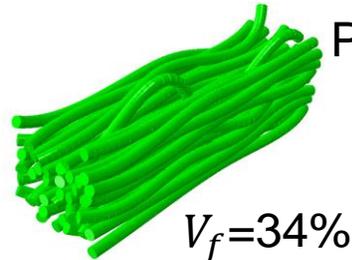
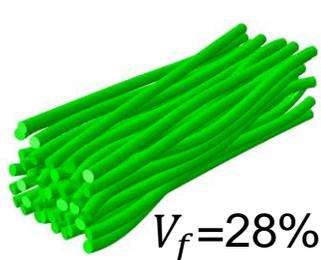
Elancements différents



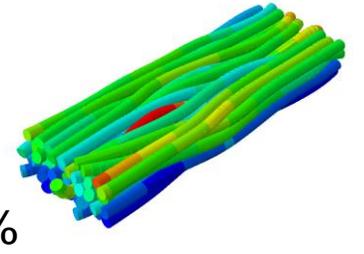
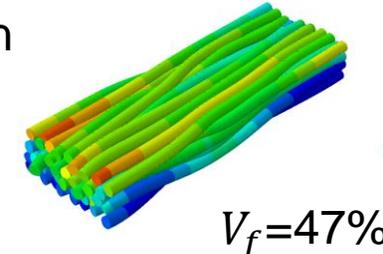
Ondulations différentes



V<sub>f</sub> différents

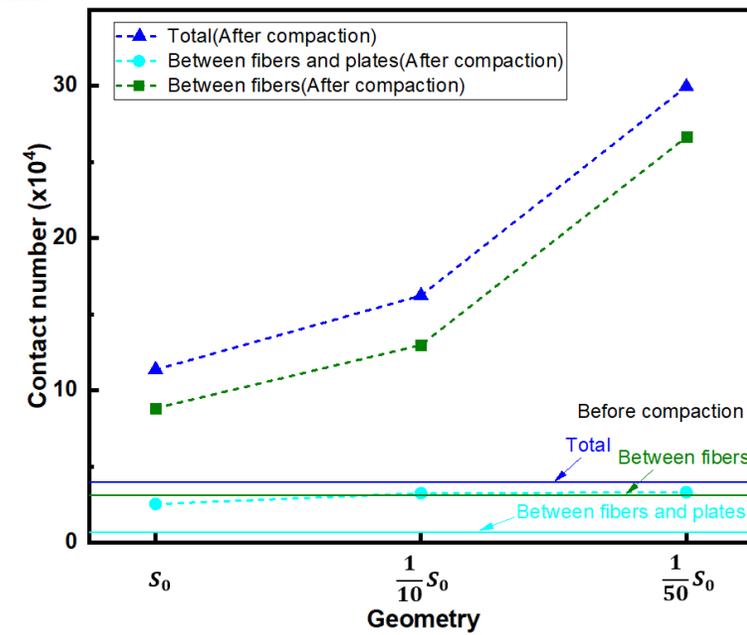
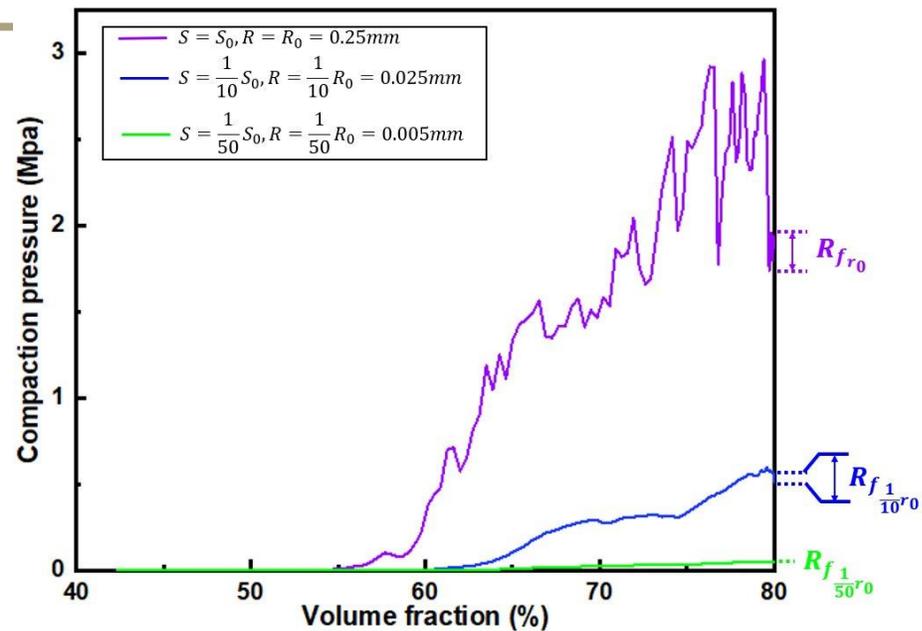
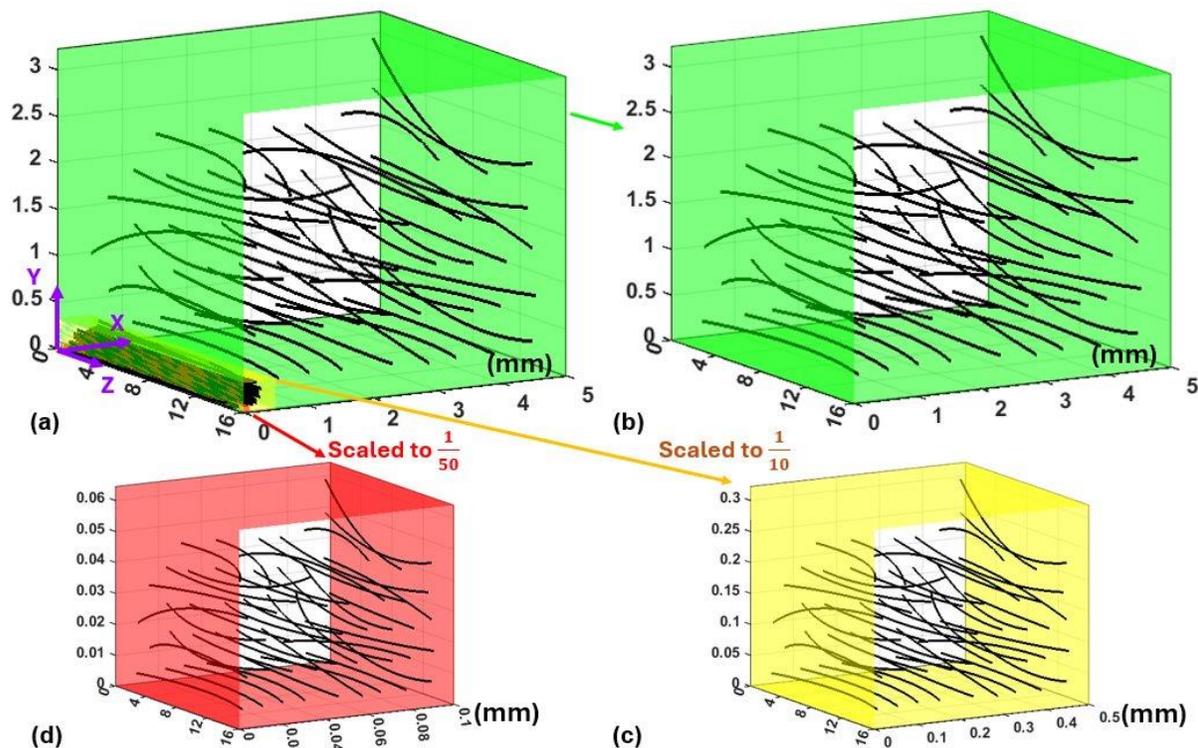


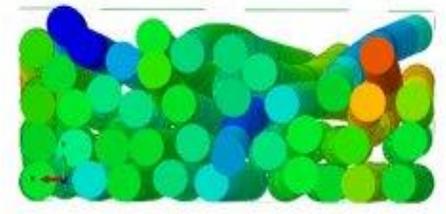
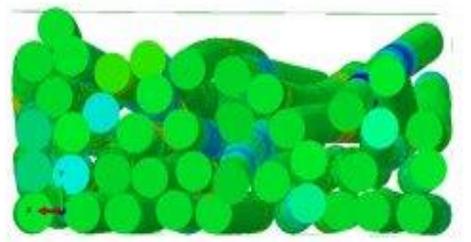
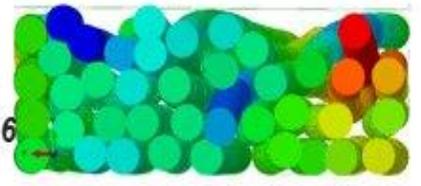
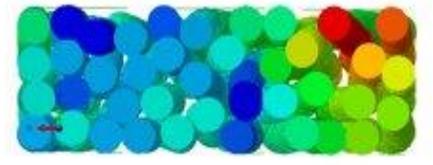
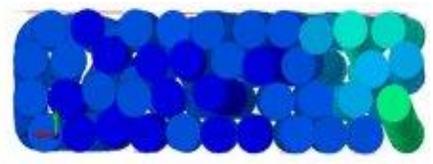
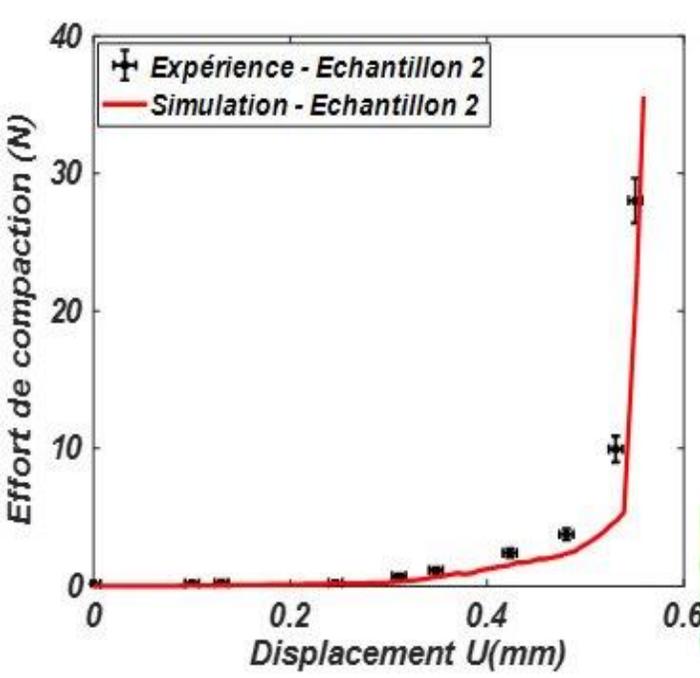
Phase de pré-compaction  
(contrôle du V<sub>f</sub>)



# Création d'un estimateur virtuel

- Premiers « résultats »





$$P = KE \left( V_f^\gamma - V_{f_0}^\gamma \right)$$

- ✓ Mise en place d'une **stratégie de simulation** efficace (quelques heures pour un essai de compaction)
- ✓ Création et validation de **l'estimateur virtuel**

- MAIS Le chemin est encore long...**
- test des différents paramètres
  - mesure de l'impact de ces paramètres sur la déformabilité du paquet de fibres
  - intégration à la loi de comportement

# CONCLUSION

**Merci de votre attention**