



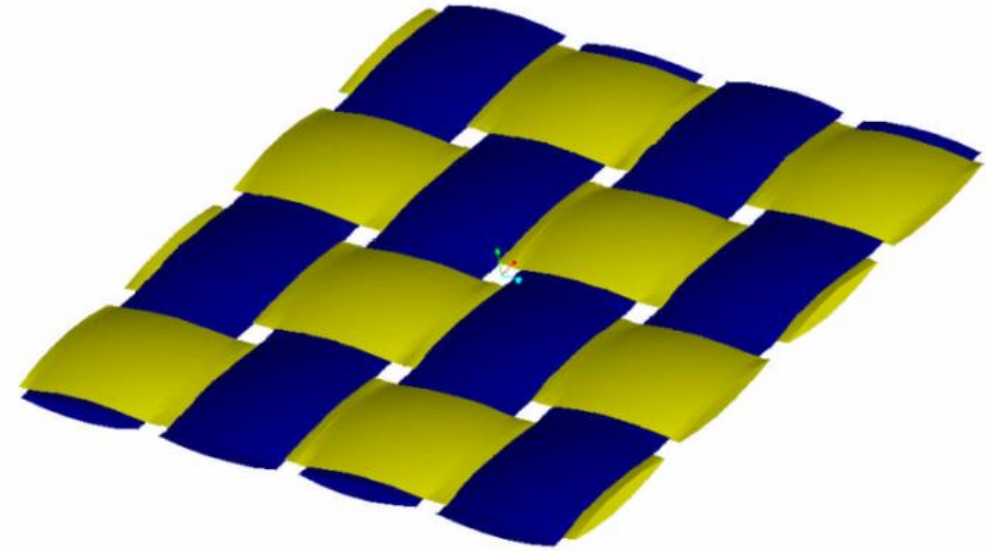
Etude de la déformabilité de paquets de fibres

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

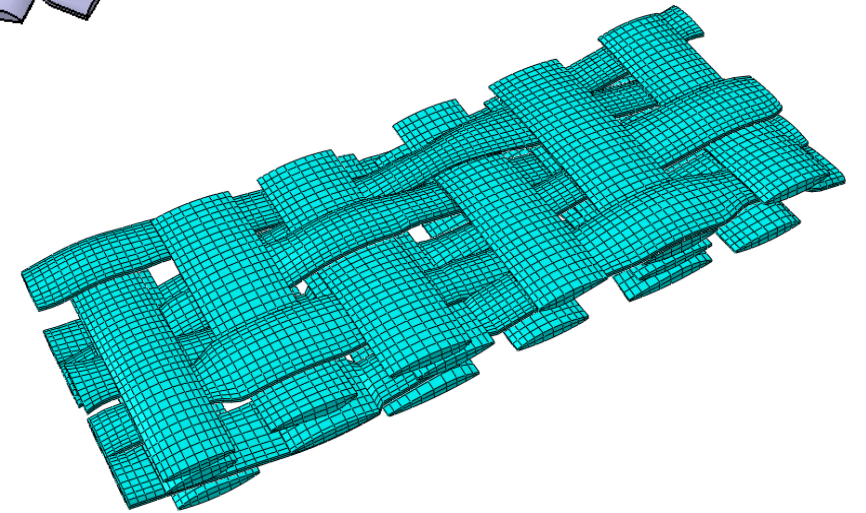
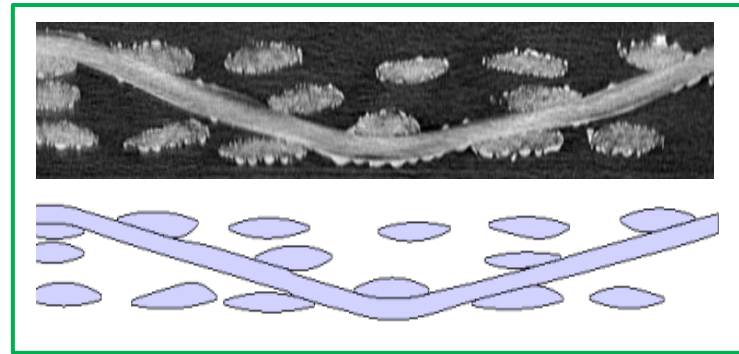
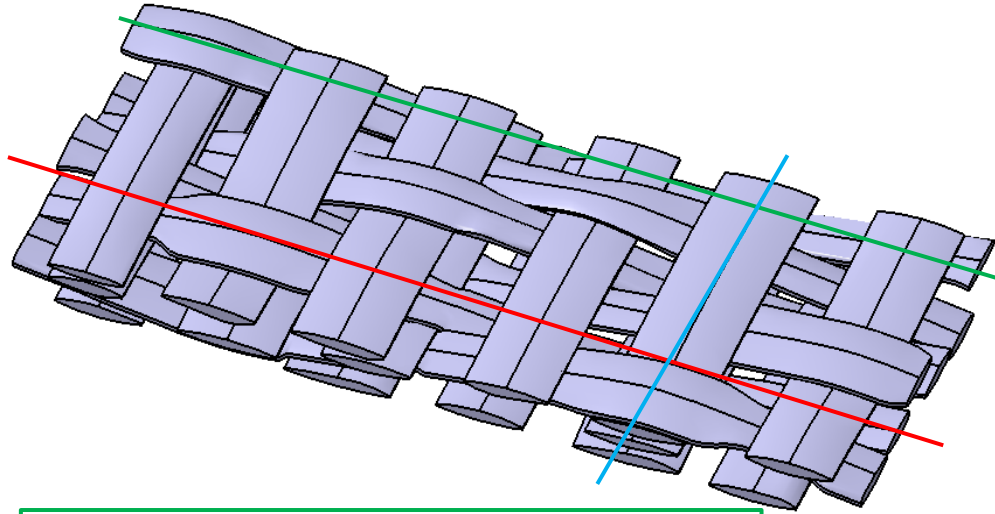
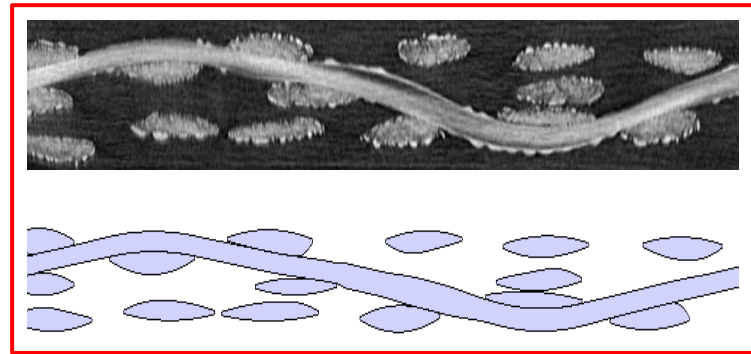
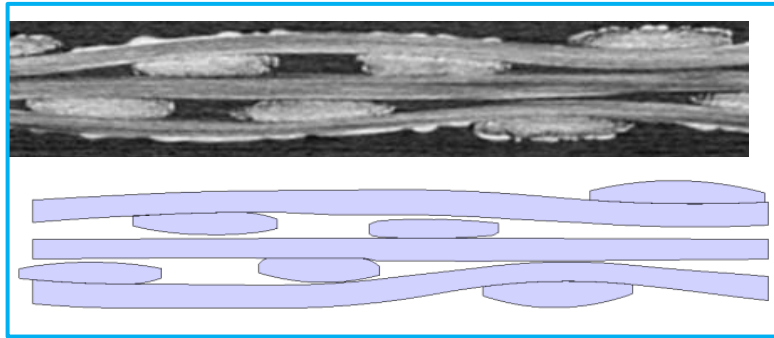


CONTEXTE

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

Modèles géométriques

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



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

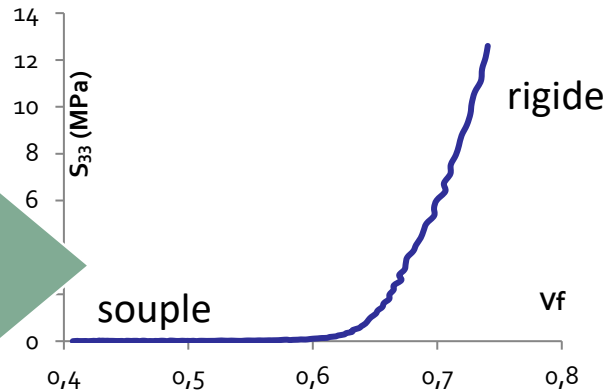
1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

augmentation de la fraction volumique

augmentation de la rigidité de compaction

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes

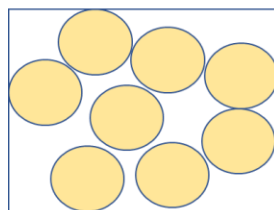
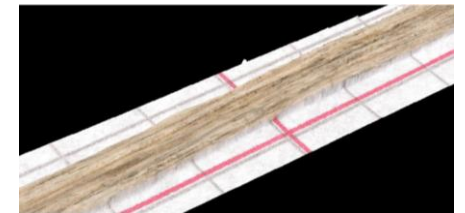


3. Pression de compaction uniaxiale = $f(V_f)$ (Toll1998, Latil2011)

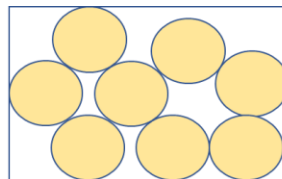
$$P = KE \left(V_f^{\gamma} - V_{f0}^{\gamma} \right)$$

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

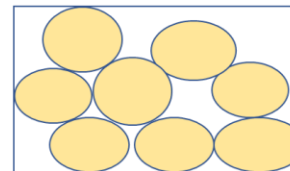
⇒ Hypothèse de répartition uniforme de pression



Application du chargement

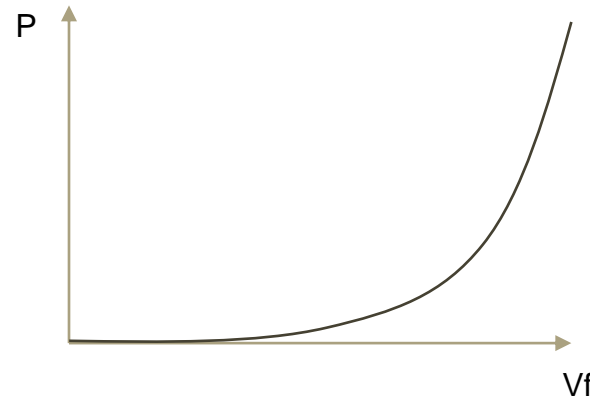


Application du chargement



Comportement en compaction/compression

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

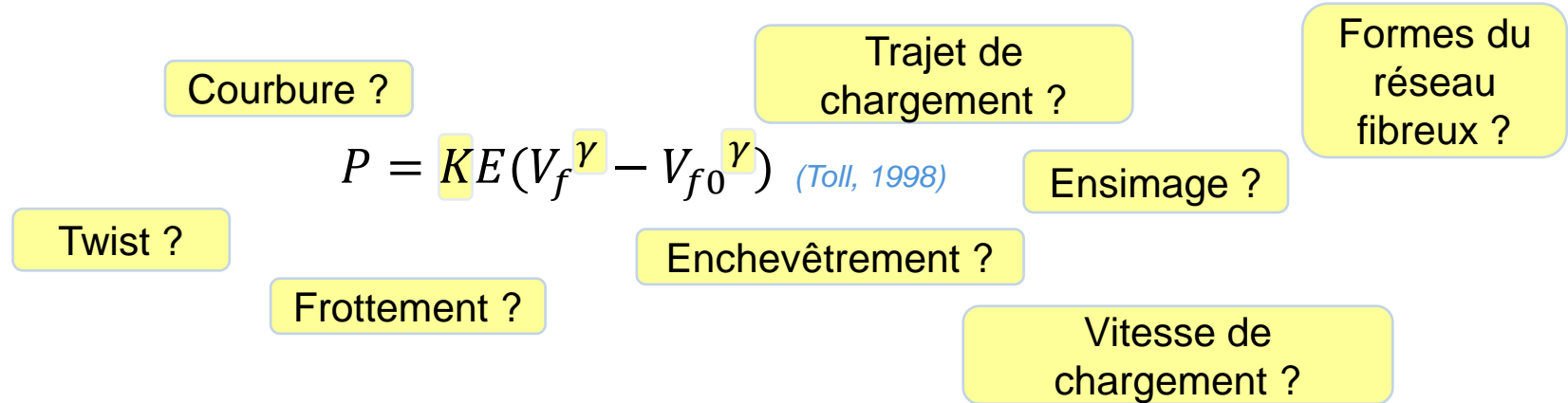


Approche empirique
Identification de K et γ par des essais

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

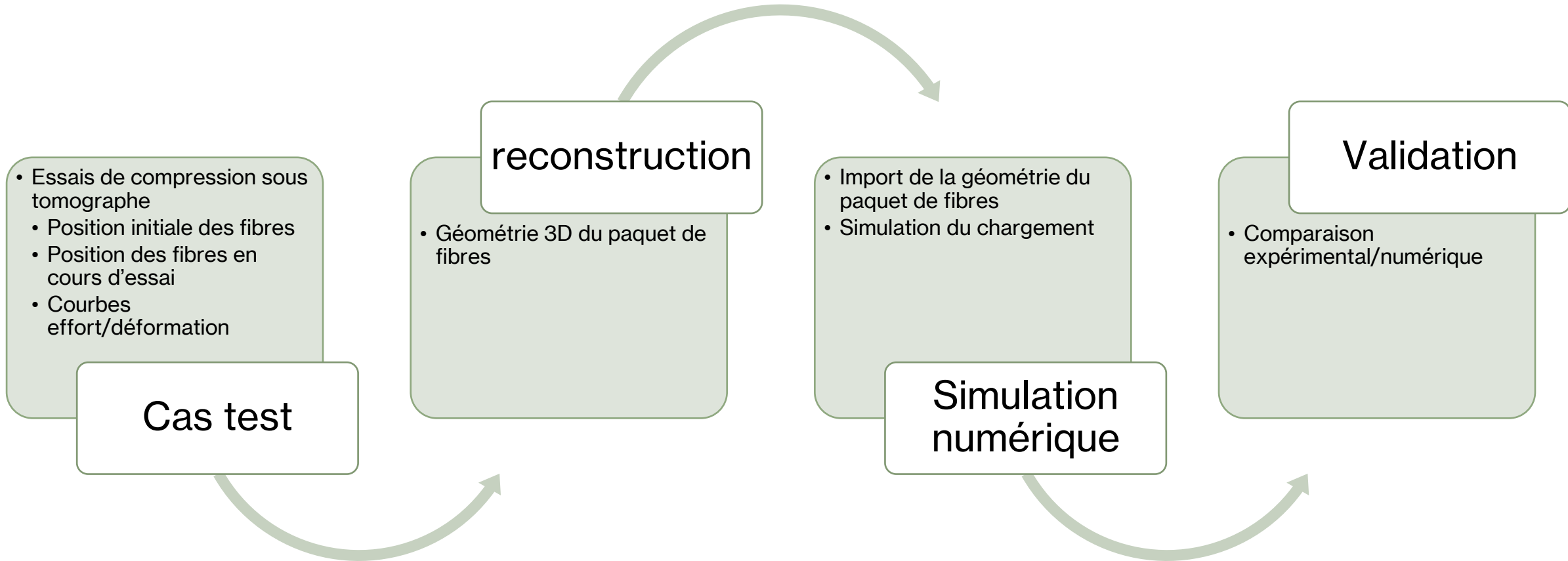
OBJECTIF



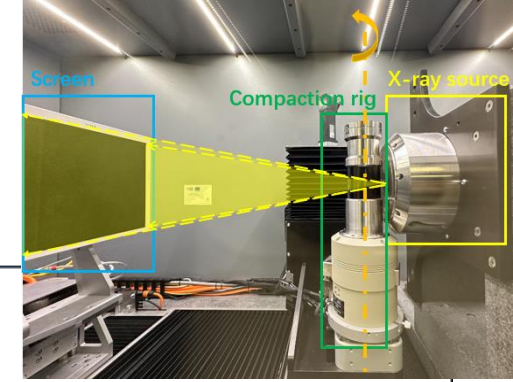
Thèses O. Haji (soutenue en 2018)
Thèse X. Song (soutenue en 2024)

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 (μ)	0.2 (Gassara, 2016)
Poisson ratio (γ)	0.25
Density (ρ)	1.38e-09 T/mm ³

Fibres sèches

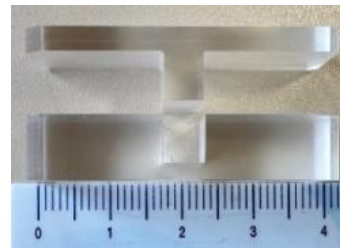
Faible cohésion entre les fibres

Type de chargement



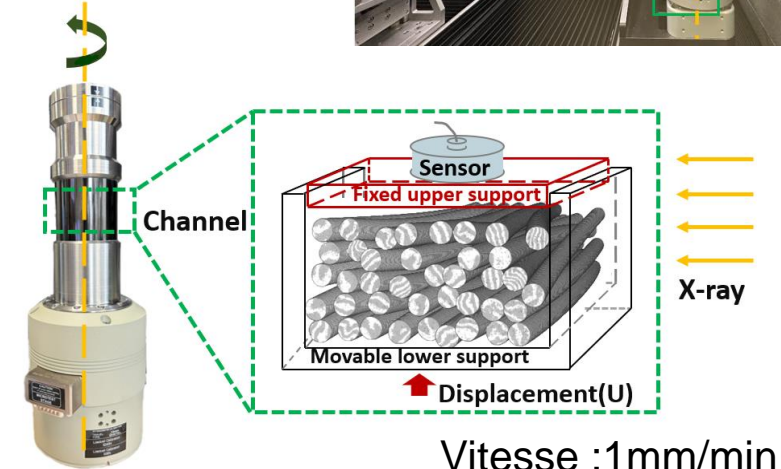
Compaction simple : les fibres tendent à s'étaler d'elles-mêmes

Compaction confinée
→ création d'un dispositif spécifique



PMMA
(poly (methyl methacrylate))

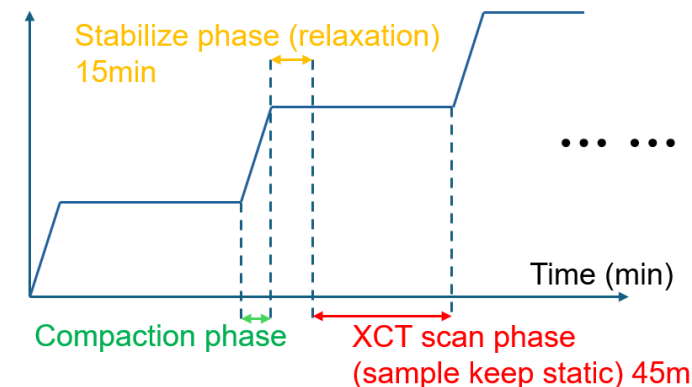
Paramètres



Micro-compaction machine

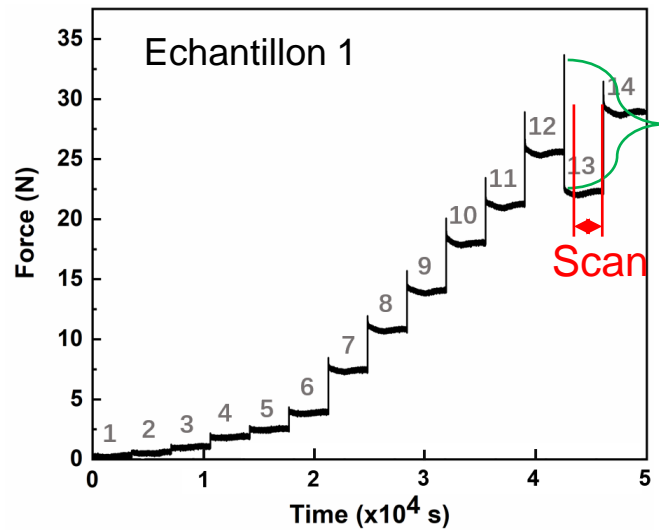
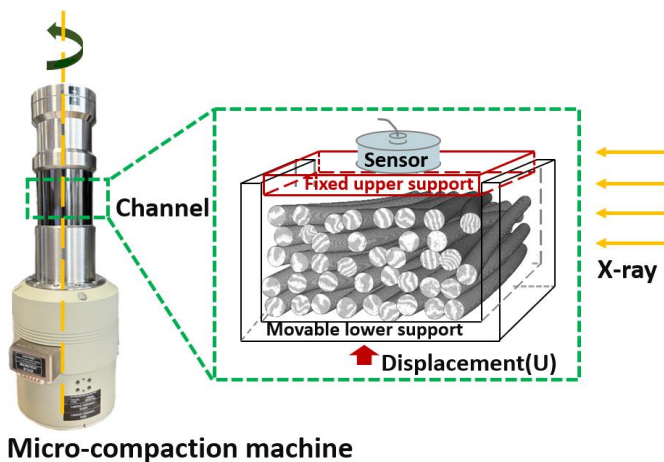
Vitesse : 1mm/min
Capteur: 500N

Displacement (mm)



Stratégie de simulation et validation

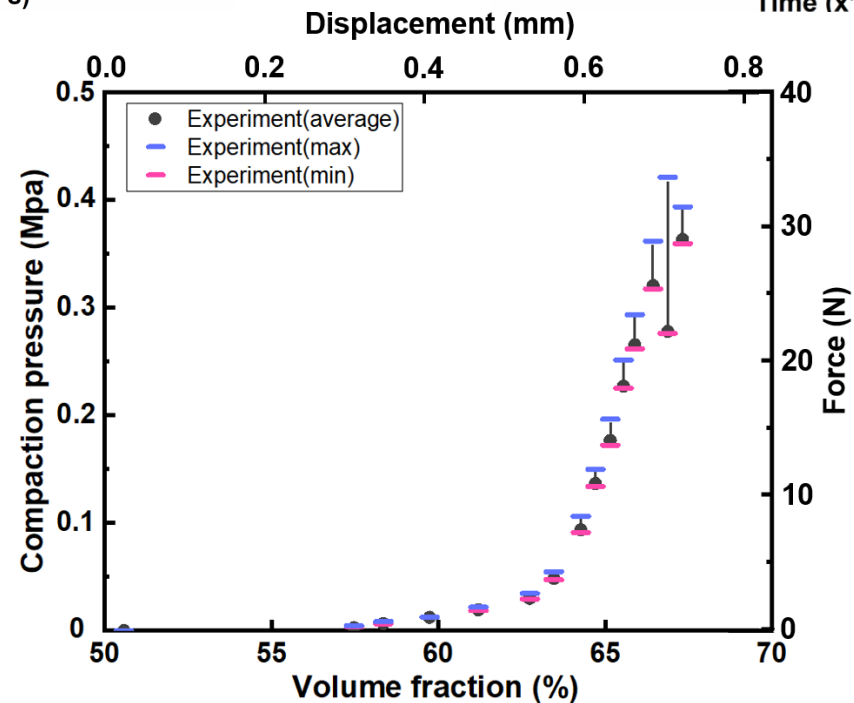
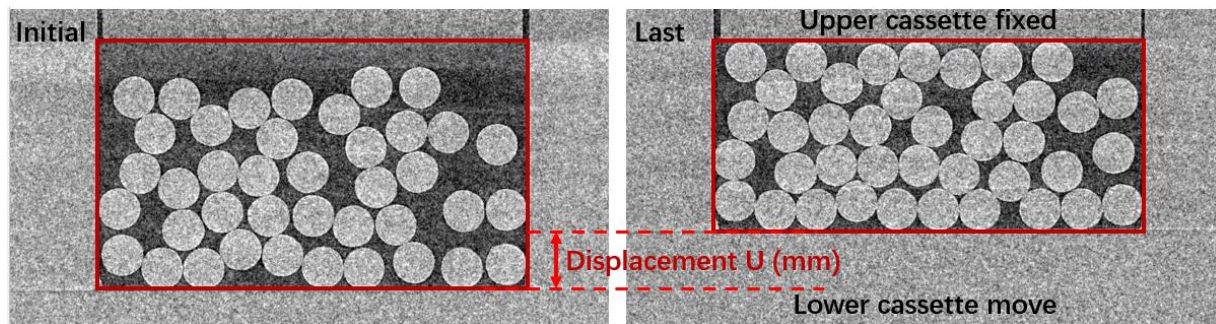
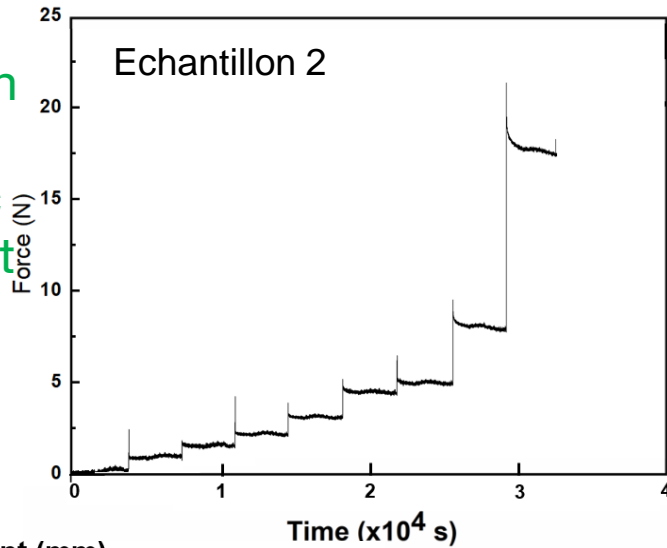
- Résultats



Relaxation

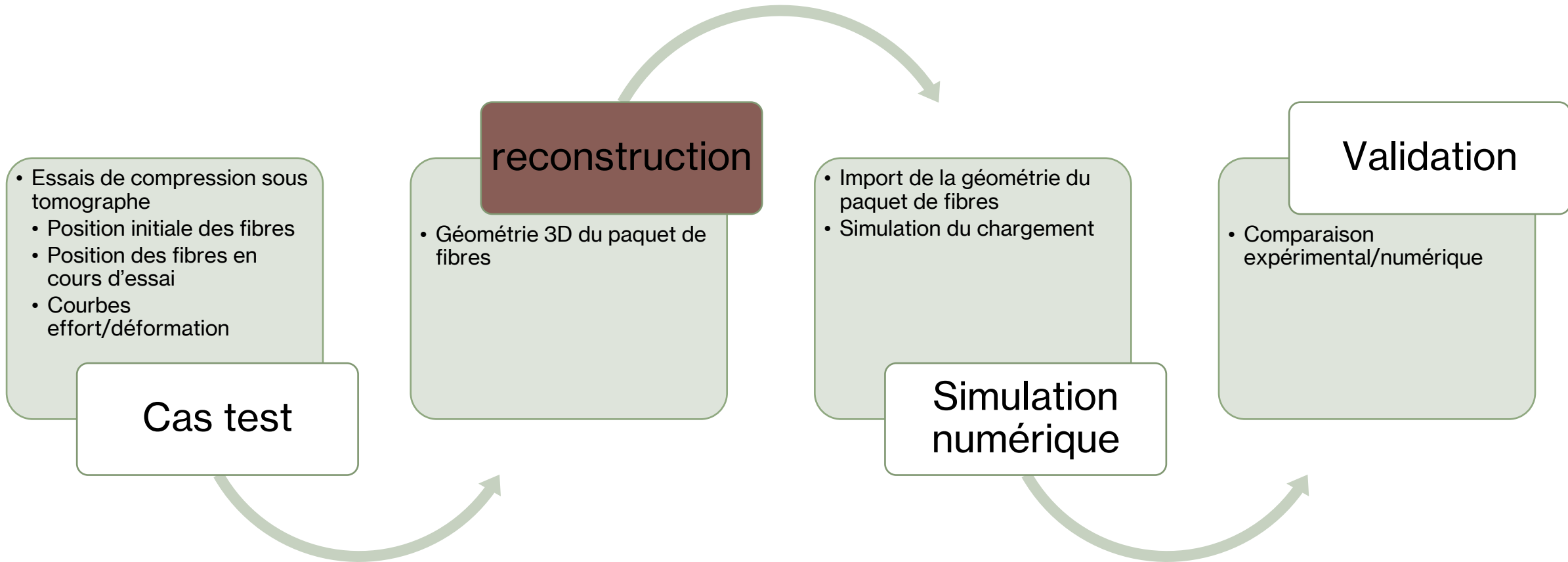
Dynamic movement

Scan



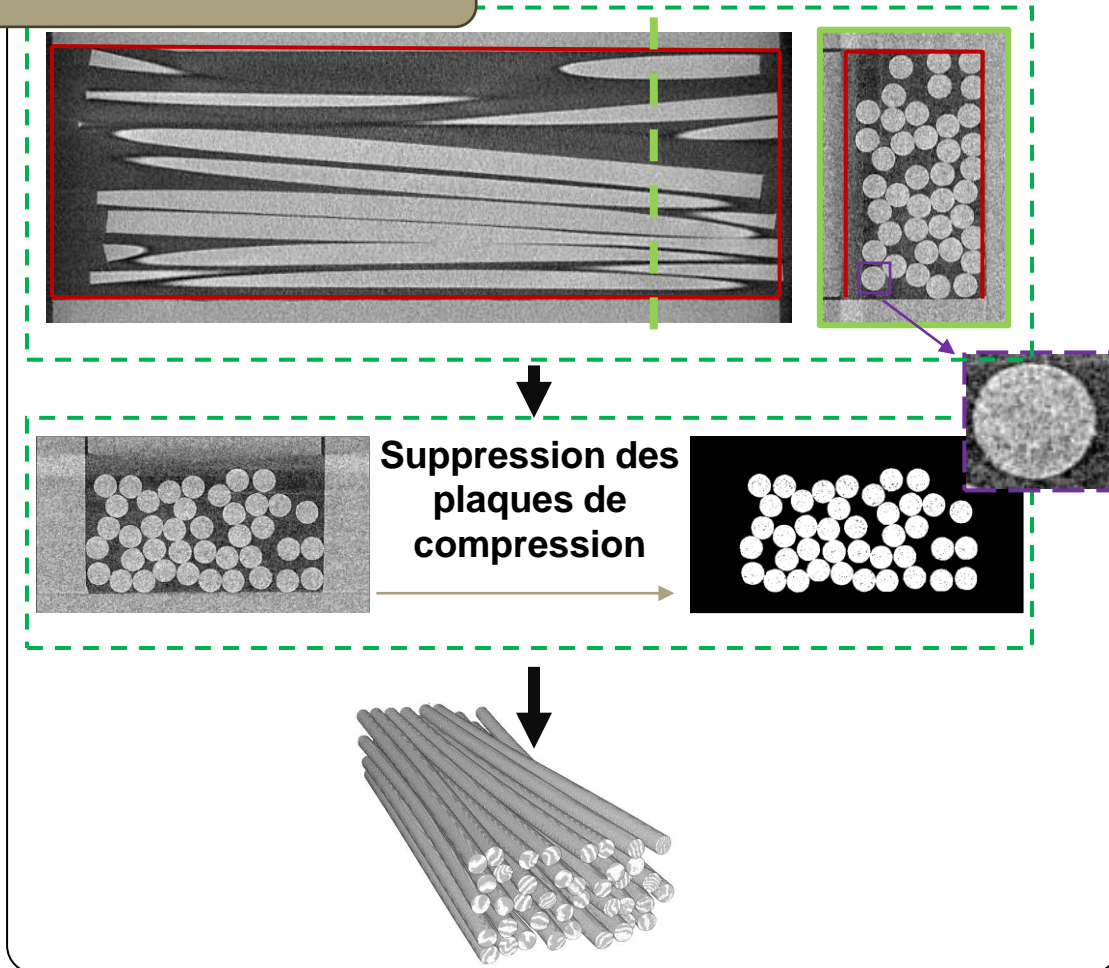
Stratégie de simulation et validation

Outils:
FIJI
MATLAB
CATIA V5®
ABAQUS®



Stratégie de simulation et validation

Post-traitement FIJI

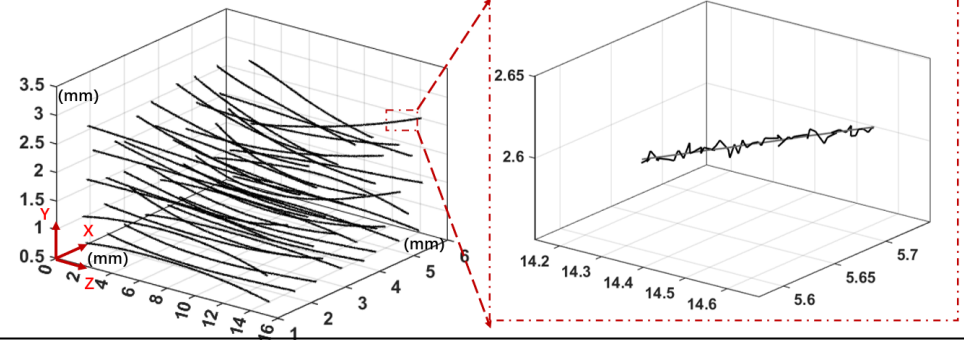
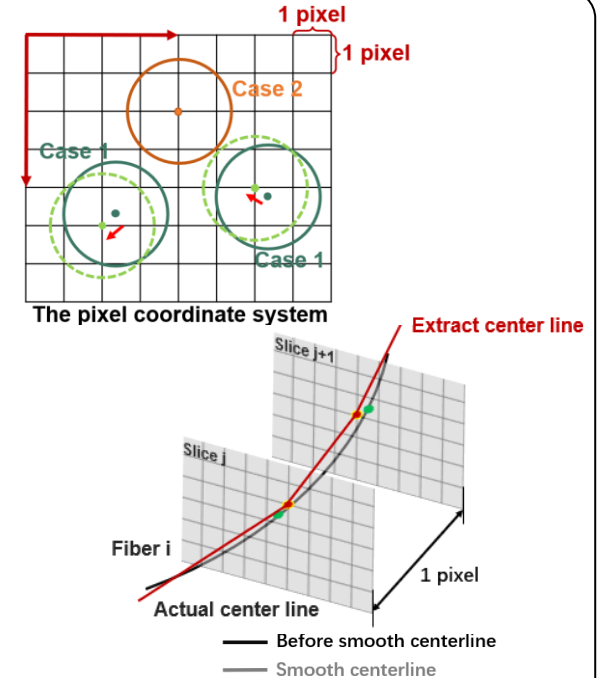


Traitement MATLAB

Détection des centres de section de chaque fibre

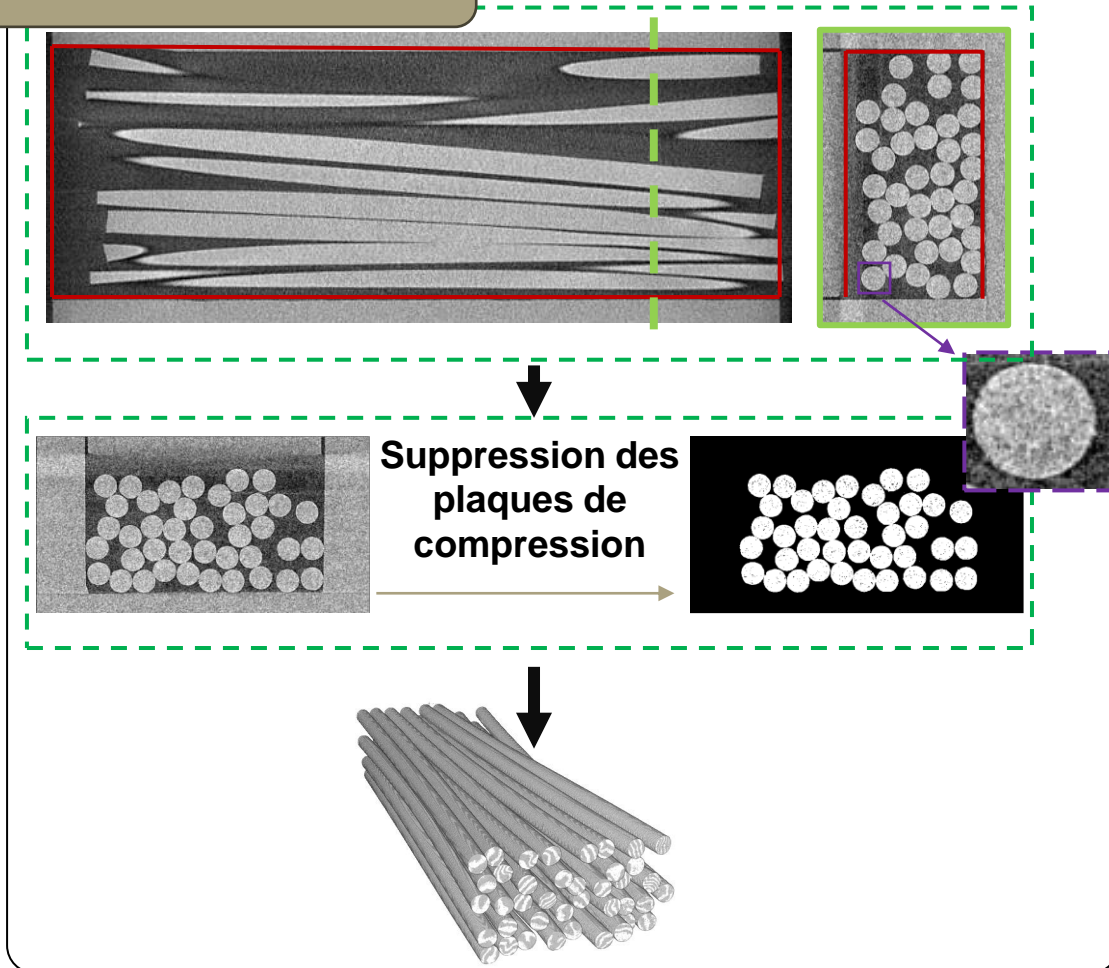
Raccordement des centres de section

Lissage



Stratégie de simulation et validation

Post-traitement FIJI

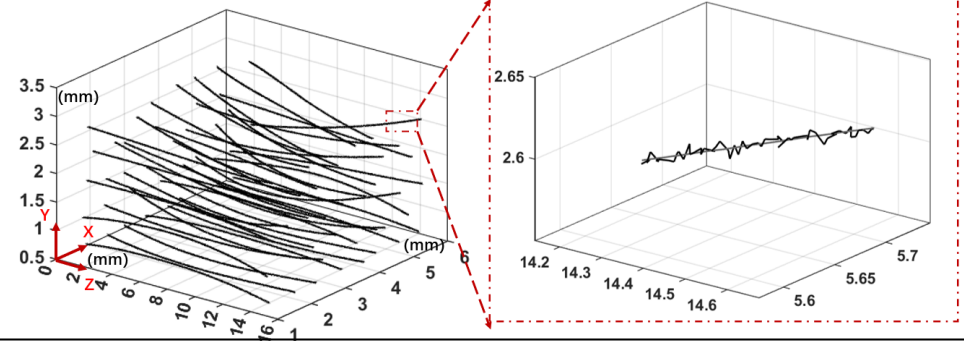
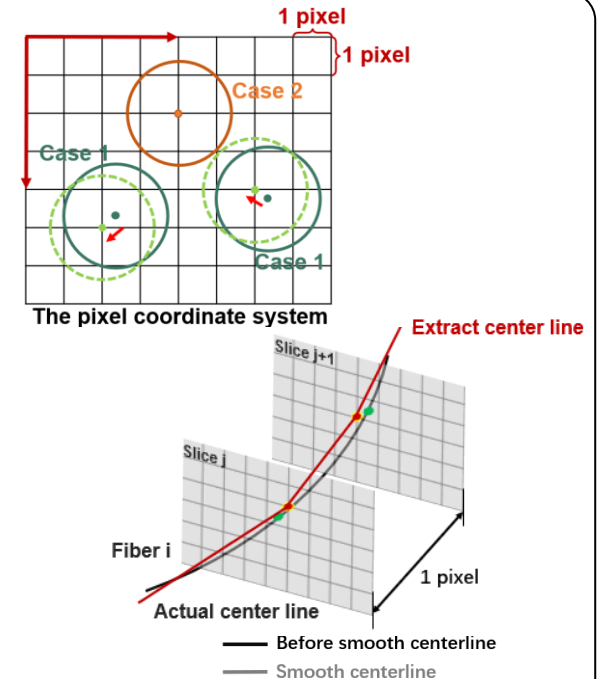


Traitement MATLAB

Détection des centres de section de chaque fibre

Raccordement des centres de section

Lissage

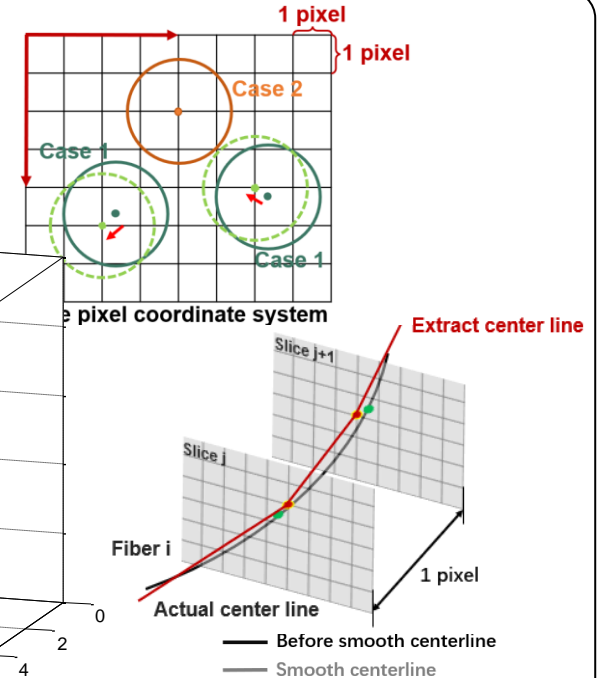


Stratégie de simulation et validation

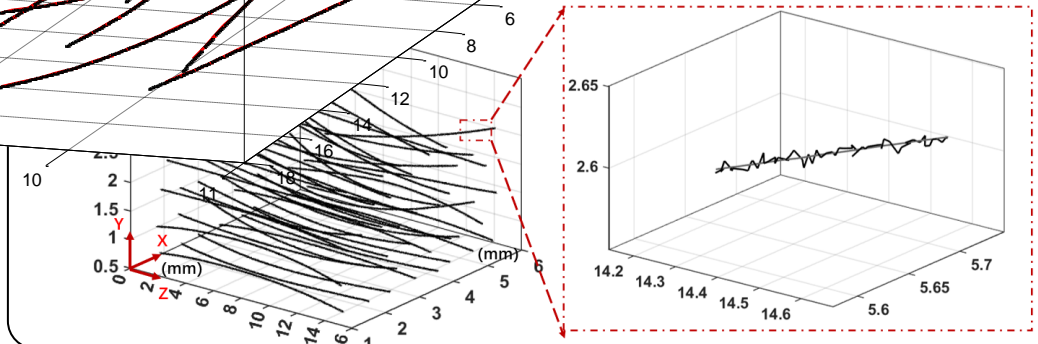
Post-traitement FIJI

Traitement MATLAB

Détection des centres de section

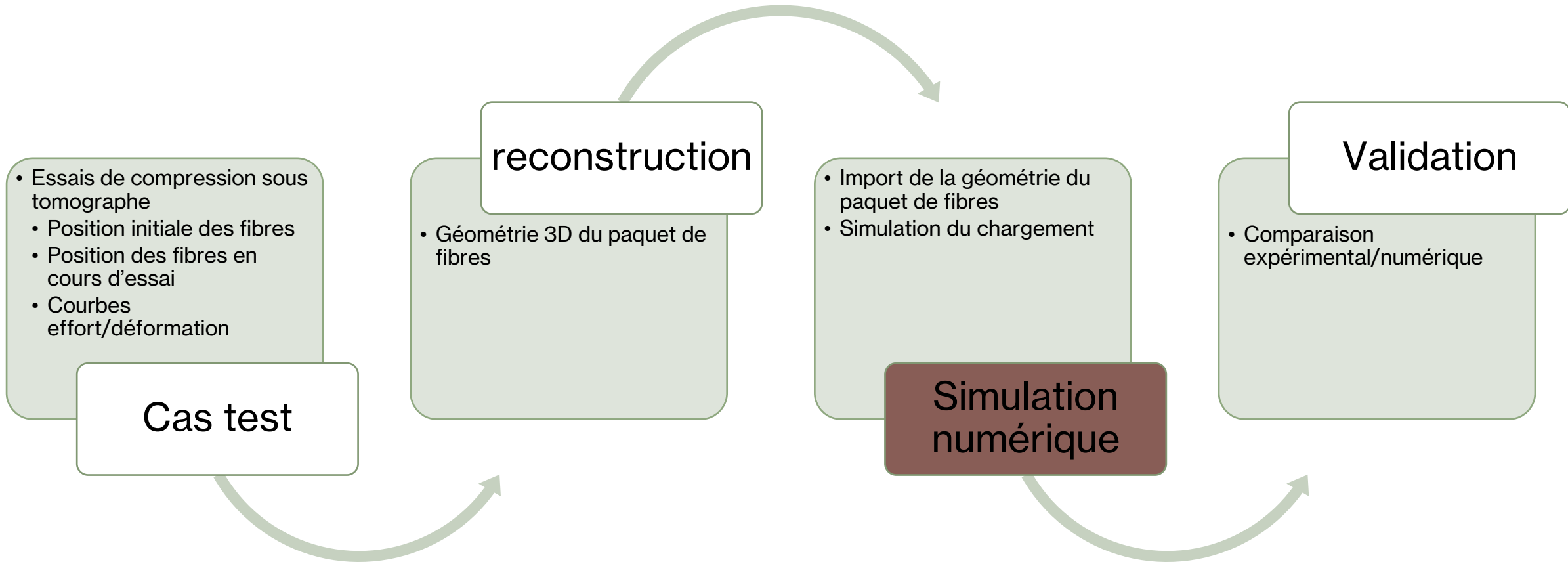


Les deux microstructures initiales sont bien confondues

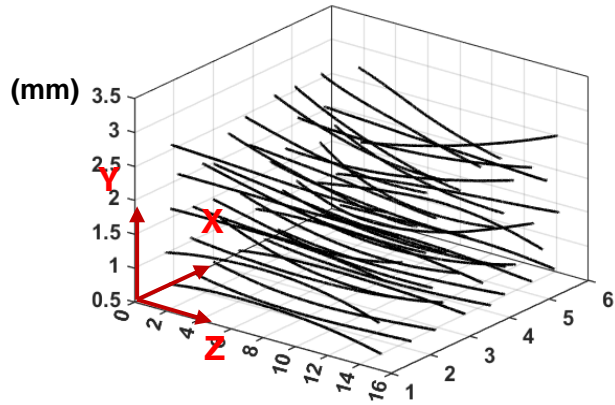


Stratégie de simulation et validation

Outils:
FIJI
MATLAB
CATIA V5®
ABAQUS®

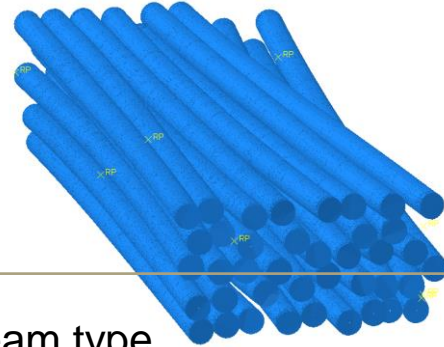


Stratégie de simulation et validation



Géométrie du paquet de fibres issu de la reconstruction

ABAQUS/EXPLICIT®



Beam type

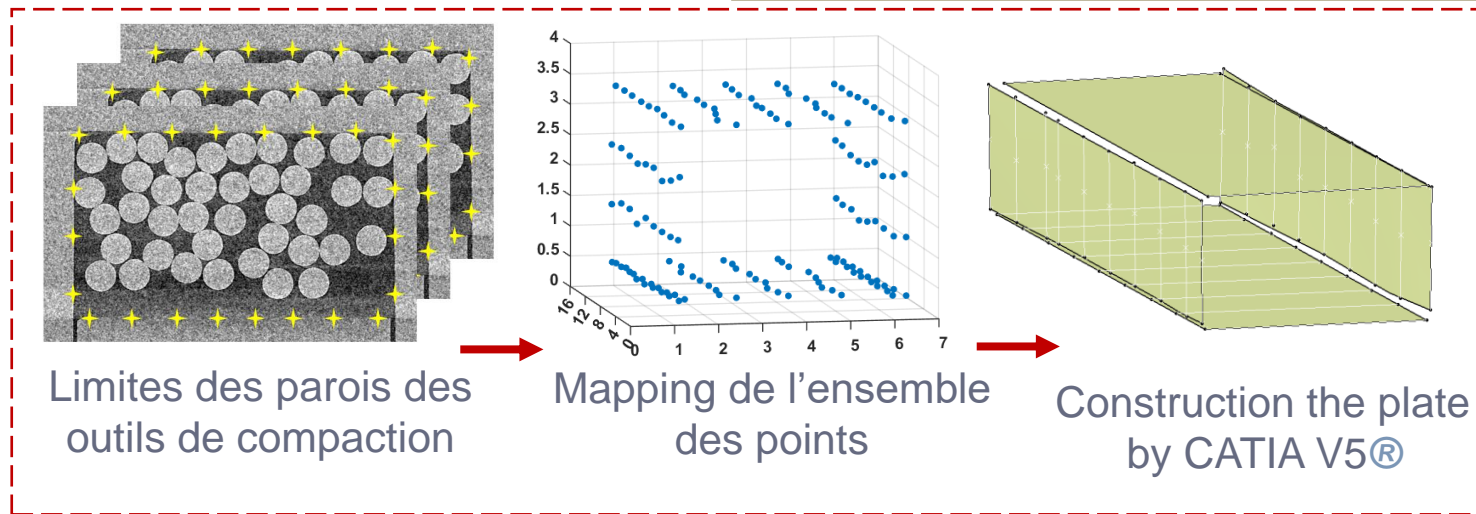
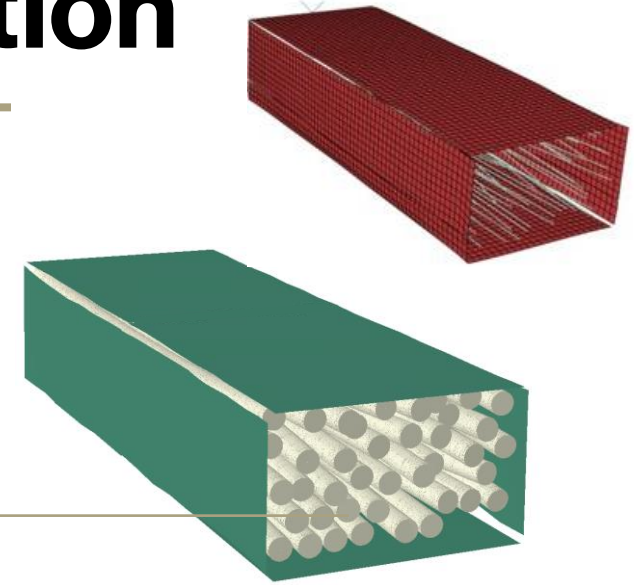
B31

Compaction plate type

Discrete rigid finite elements

Compaction speed

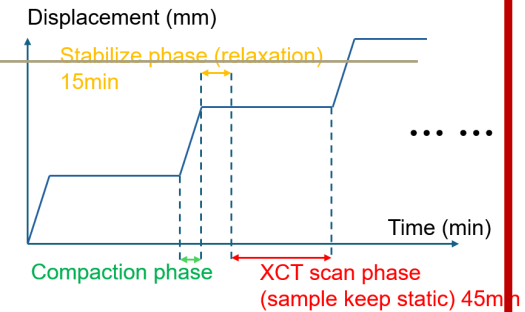
10^3 mm/min



Limites des parois des outils de compaction

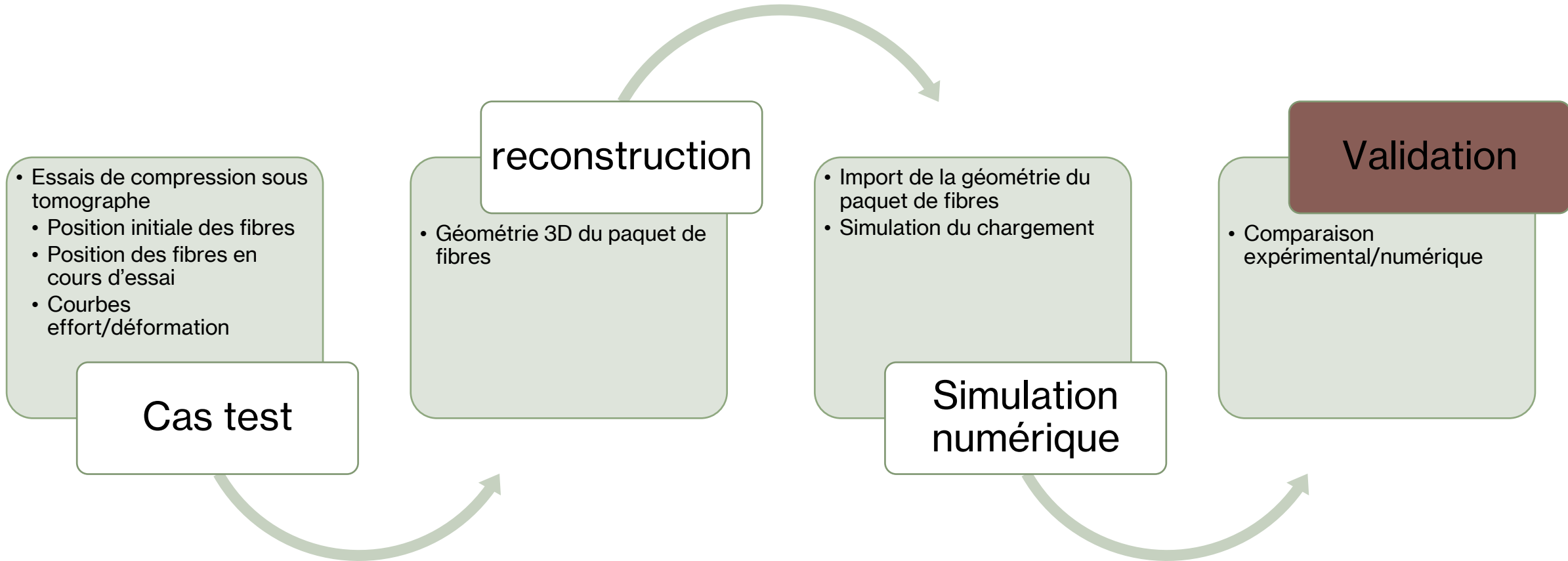
Mapping de l'ensemble des points

Construction the plate by CATIA V5®

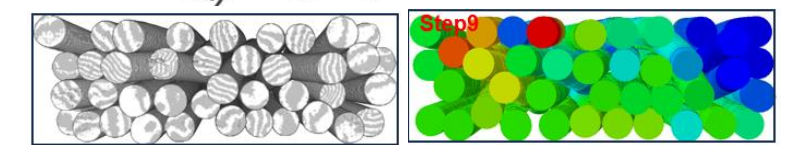
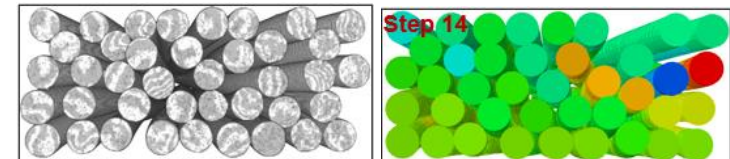
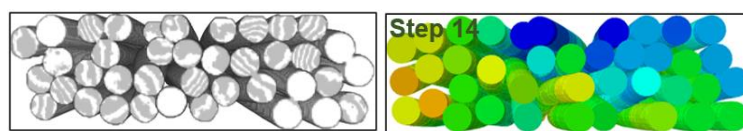
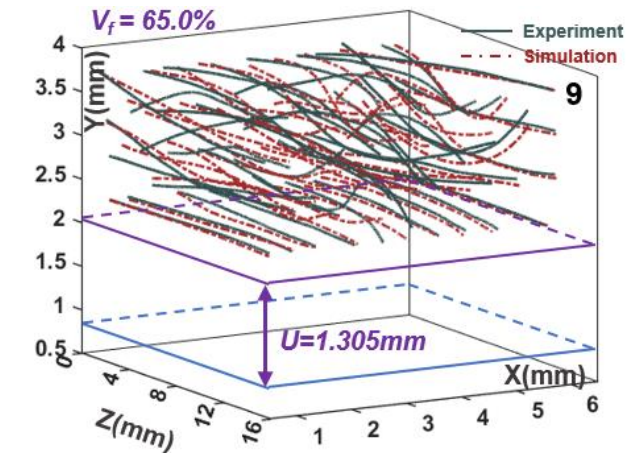
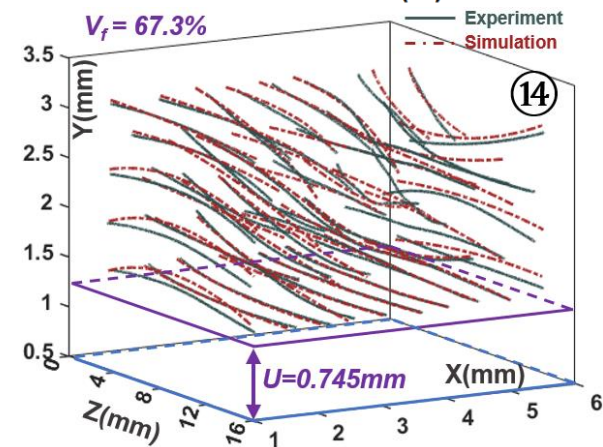
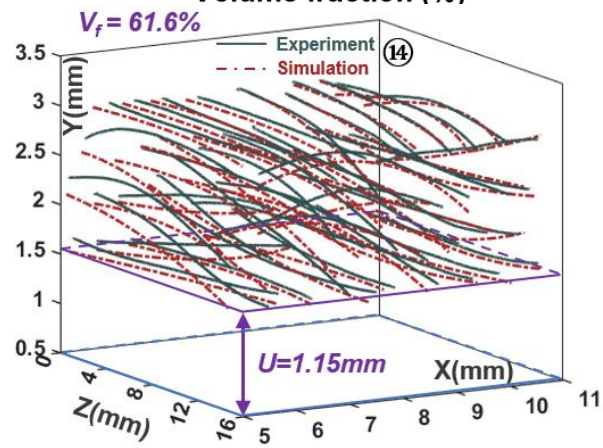
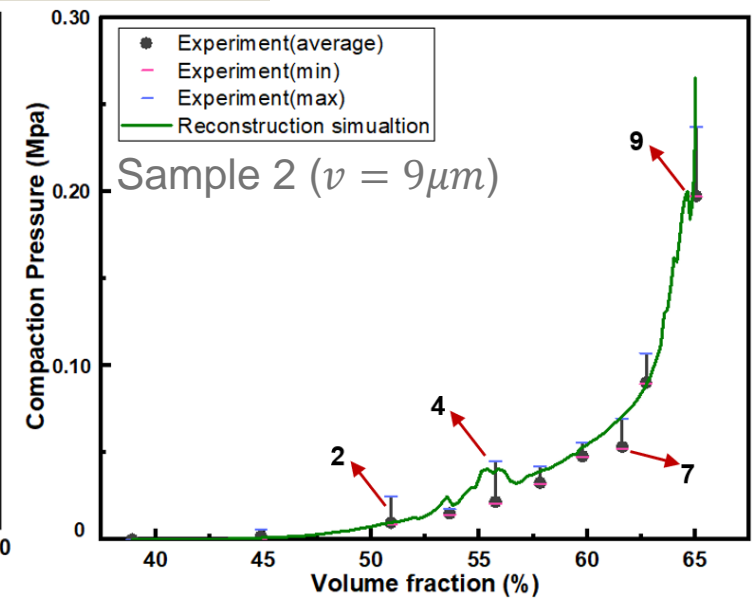
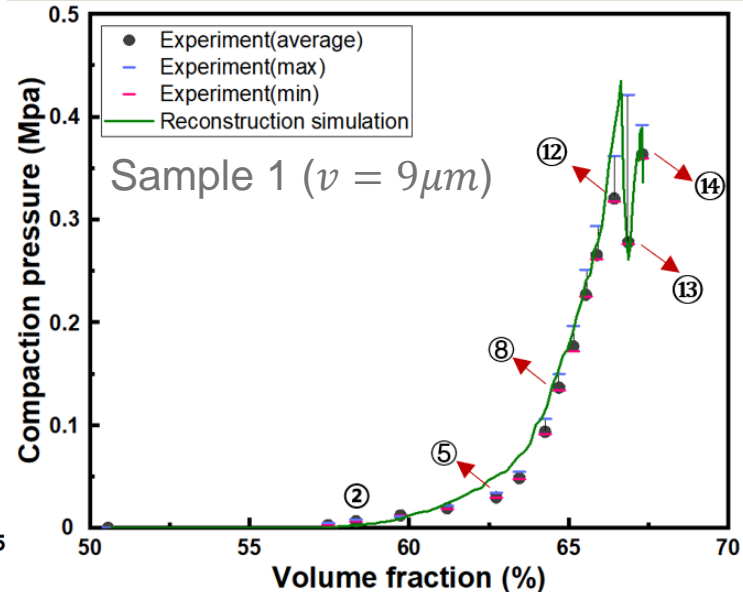
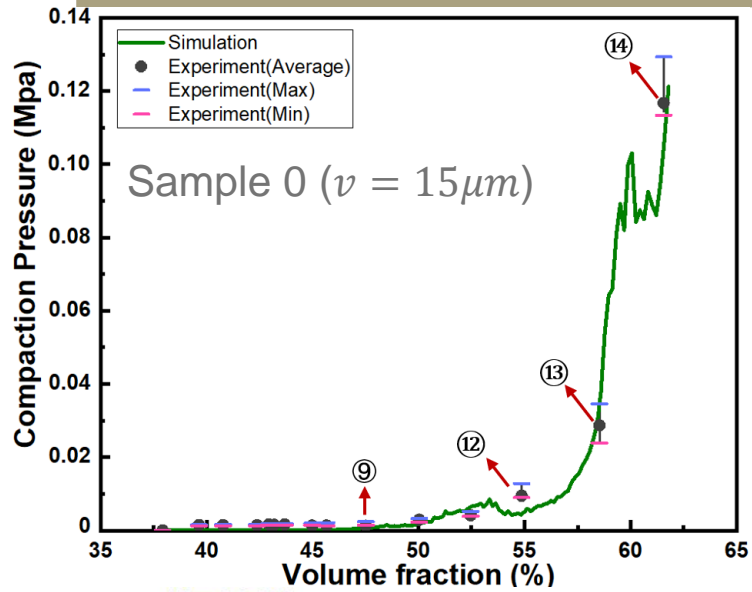


Stratégie de simulation et validation

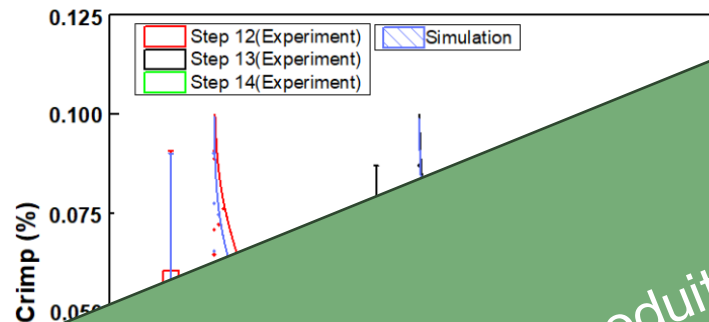
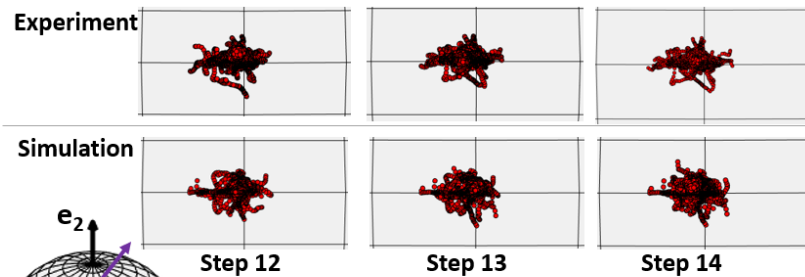
Outils:
FIJI
MATLAB
CATIA V5®
ABAQUS®



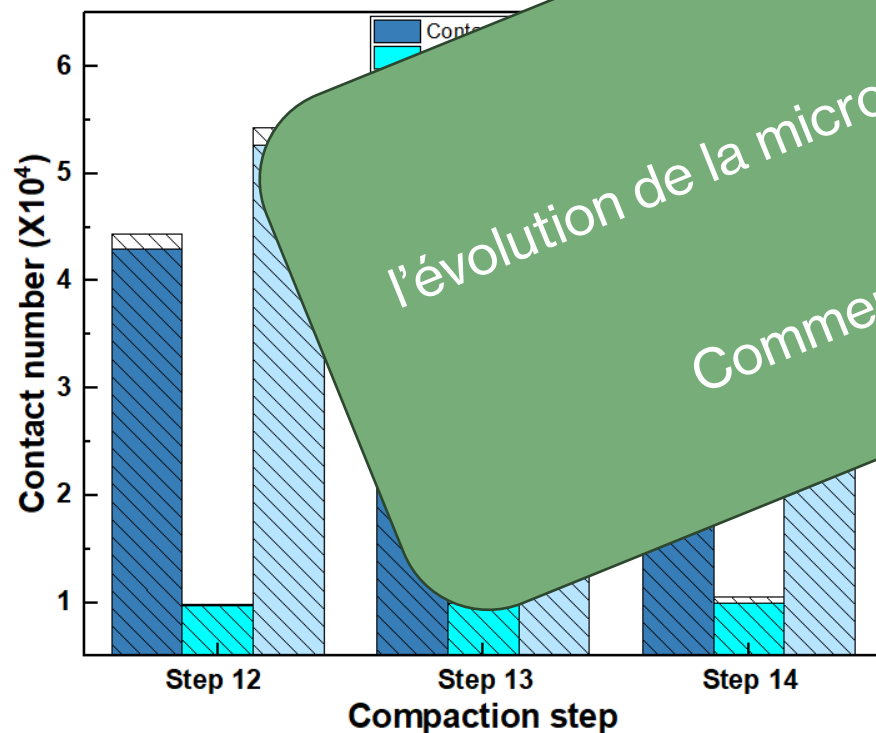
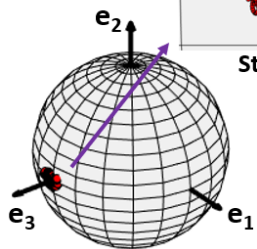
Stratégie de simulation et validation



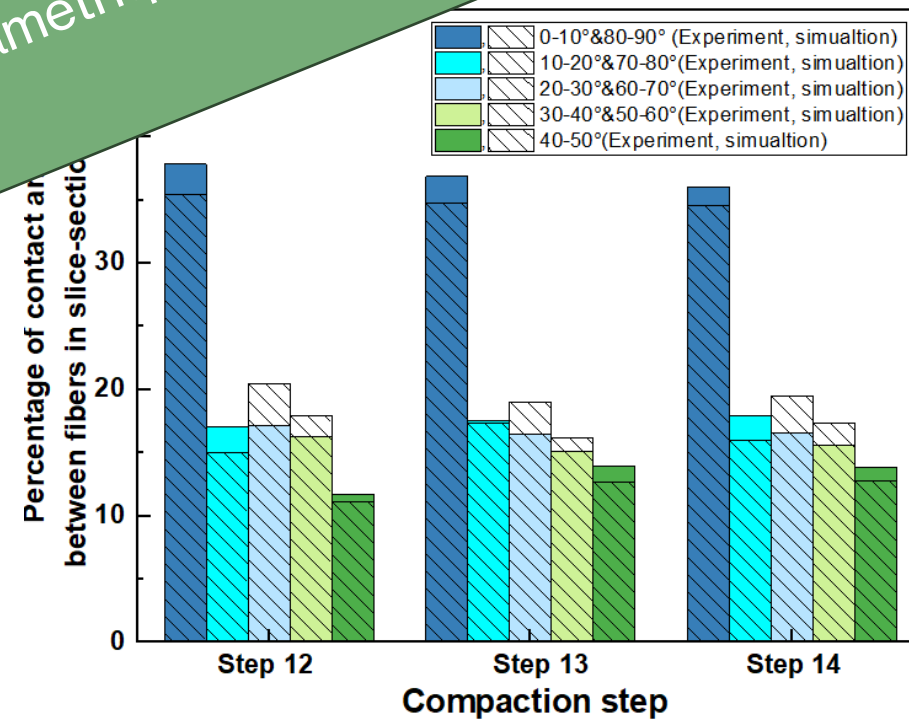
Stratégie de simulation et validation



Indicateurs de la microstructure

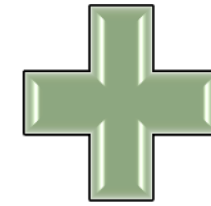


Conclusion :
l'évolution de la microstructure numérique reproduit bien celle des
essais expérimentaux
Question :
Comment réaliser des essais paramétriques ?



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



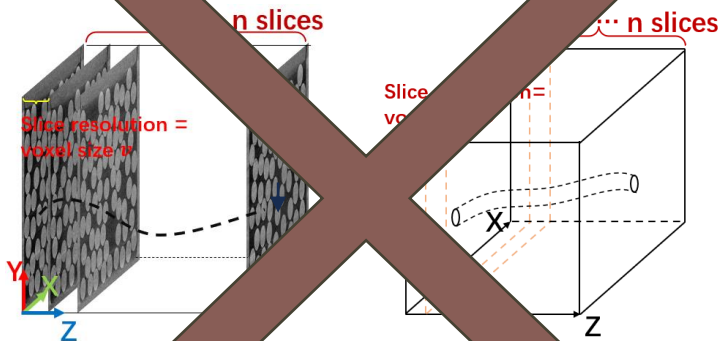
Création d'un estimateur virtuel

Objectif : création automatisée de paquets de fibres réalistes

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

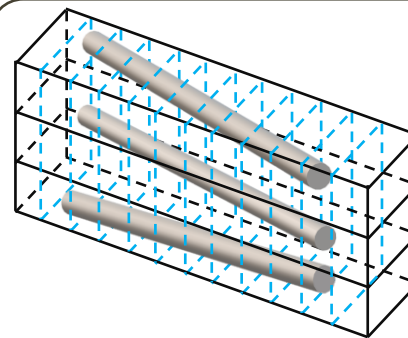
Solution 1

Create fiber's point in each slice and connect the point.

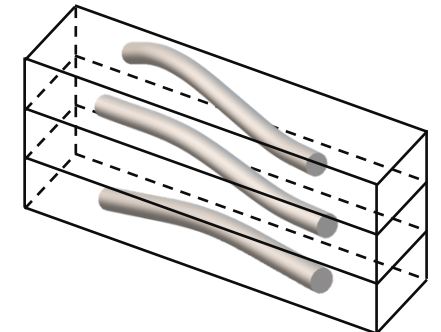


Ne permet pas d'éviter
les pénétrations entre
fibres

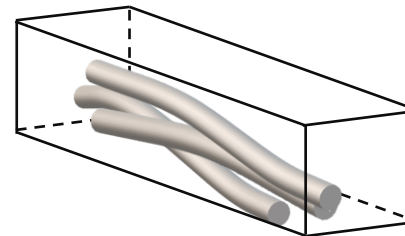
Solution 2 : créer des « strates » de fibres isolées (N fibres → N strates) puis imposer un step de gravité



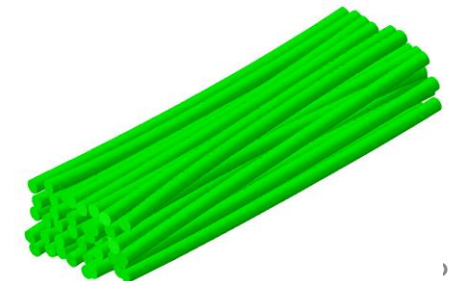
Etape 1: creation de fibres droites
avec désorientation (MATLAB)



Etape 2: Application d'une
ondulation (MATLAB)

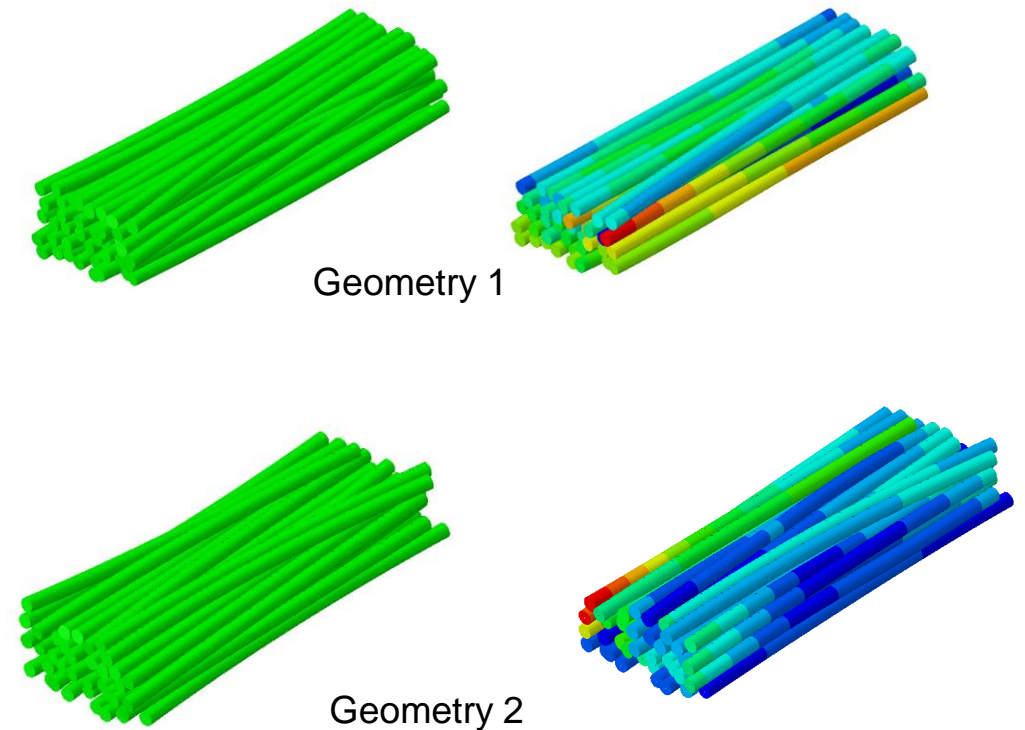
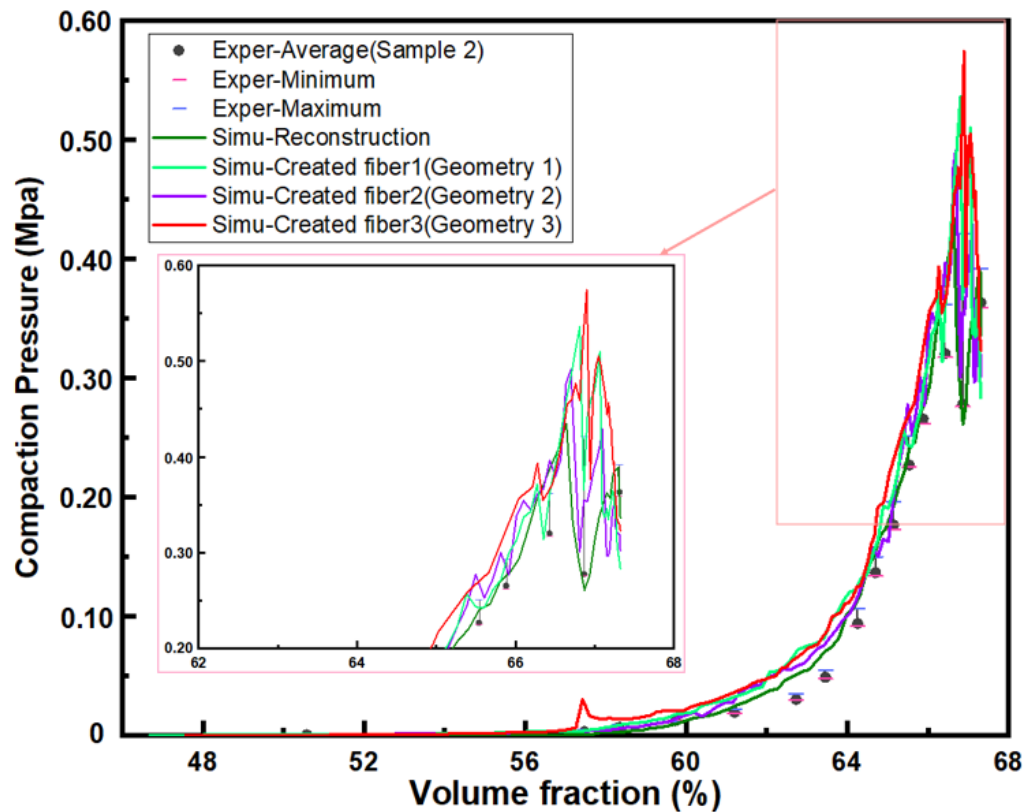


Etape 3: Gravité (ABAQUS®)



Création d'un estimateur virtuel

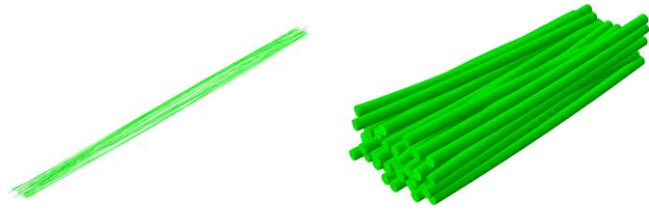
- Validation : création d'une géométrie avec les mêmes paramètres que celle des essais expérimentaux



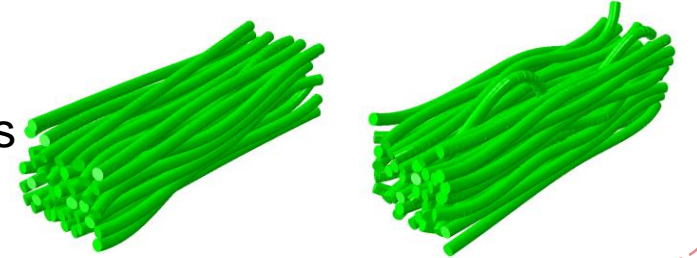
Création d'un estimateur virtuel

- Possibilités « infinies »

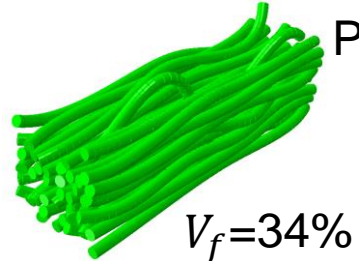
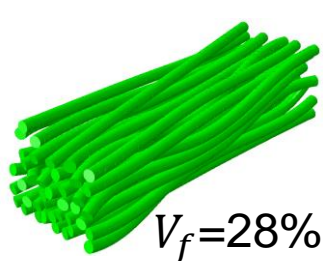
Elancements différents



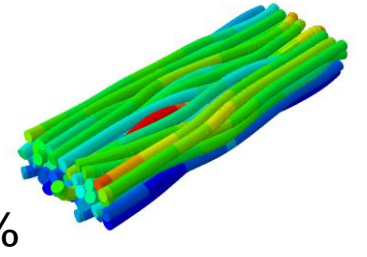
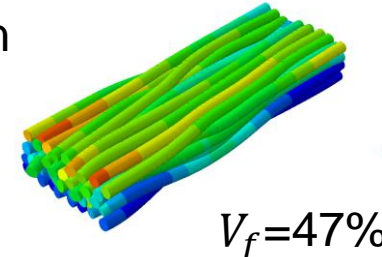
Ondulations différentes



V_f différents

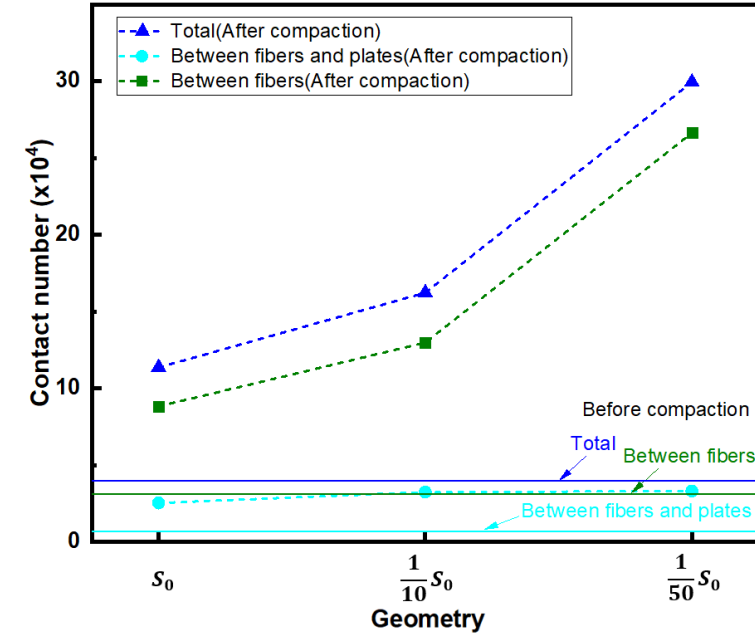
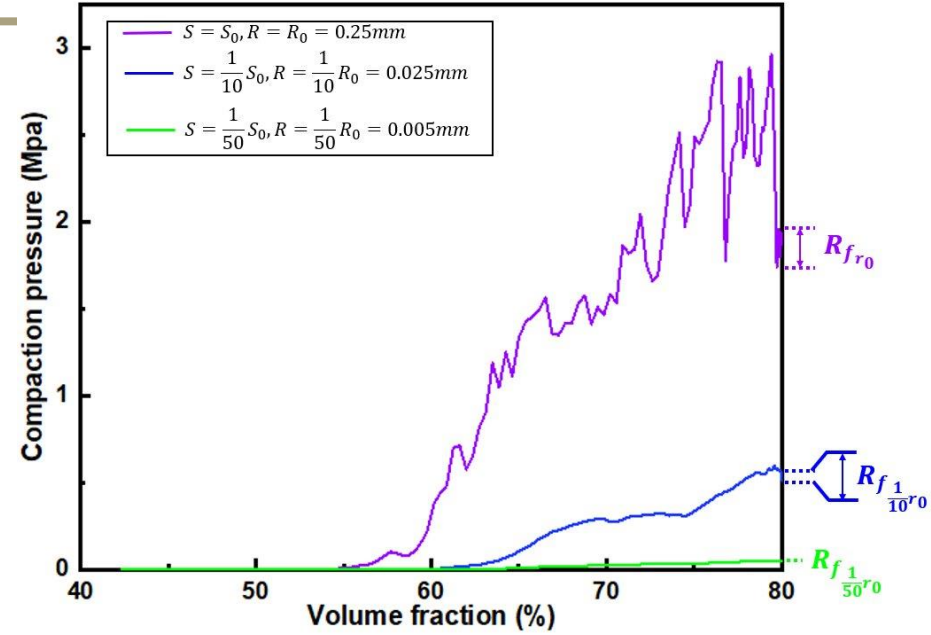
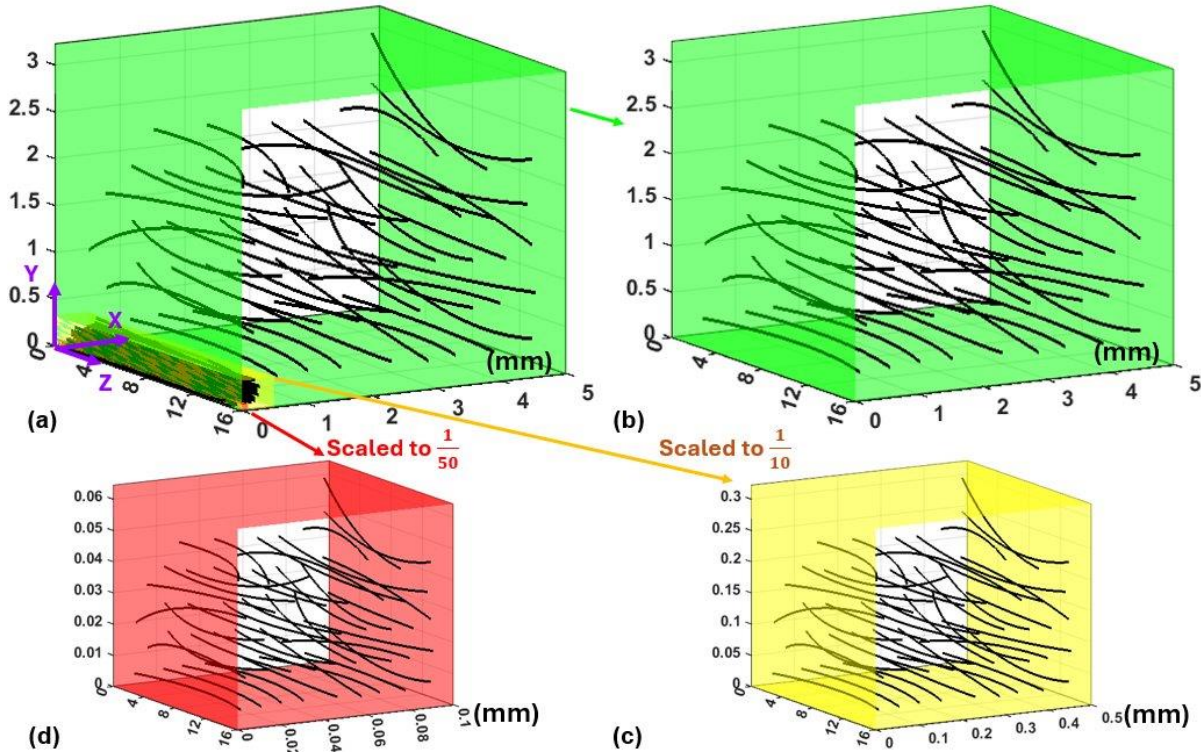


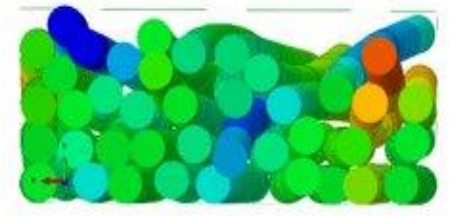
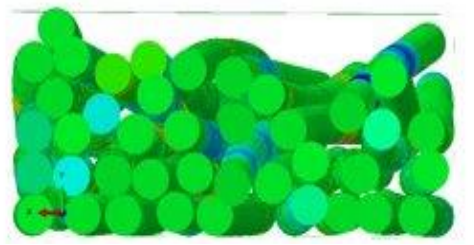
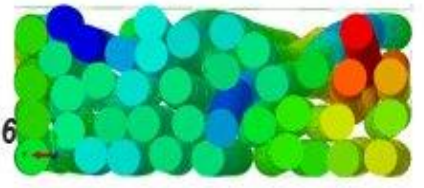
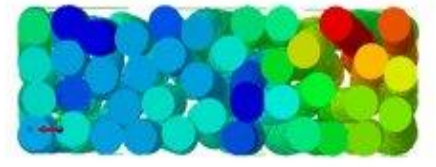
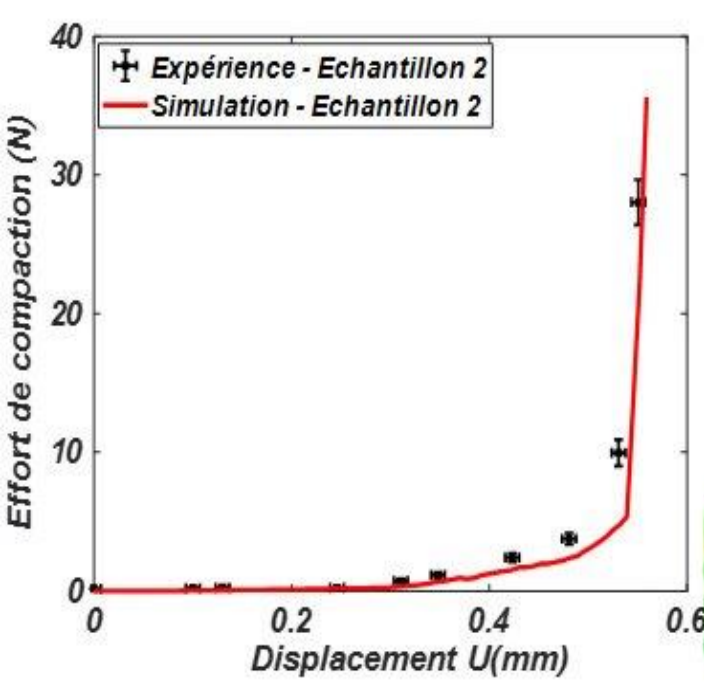
Phase de pré-compaction
(contrôle du V_f)



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