

Simulation numérique du comportement mécanique d'un réseau de fibres enchevêtrées et réticulées pour matériau d'âme

Christophe BOUVET

Fadhel CHATTI, Dominique POQUILLON, Guilhem MICHON



Plan

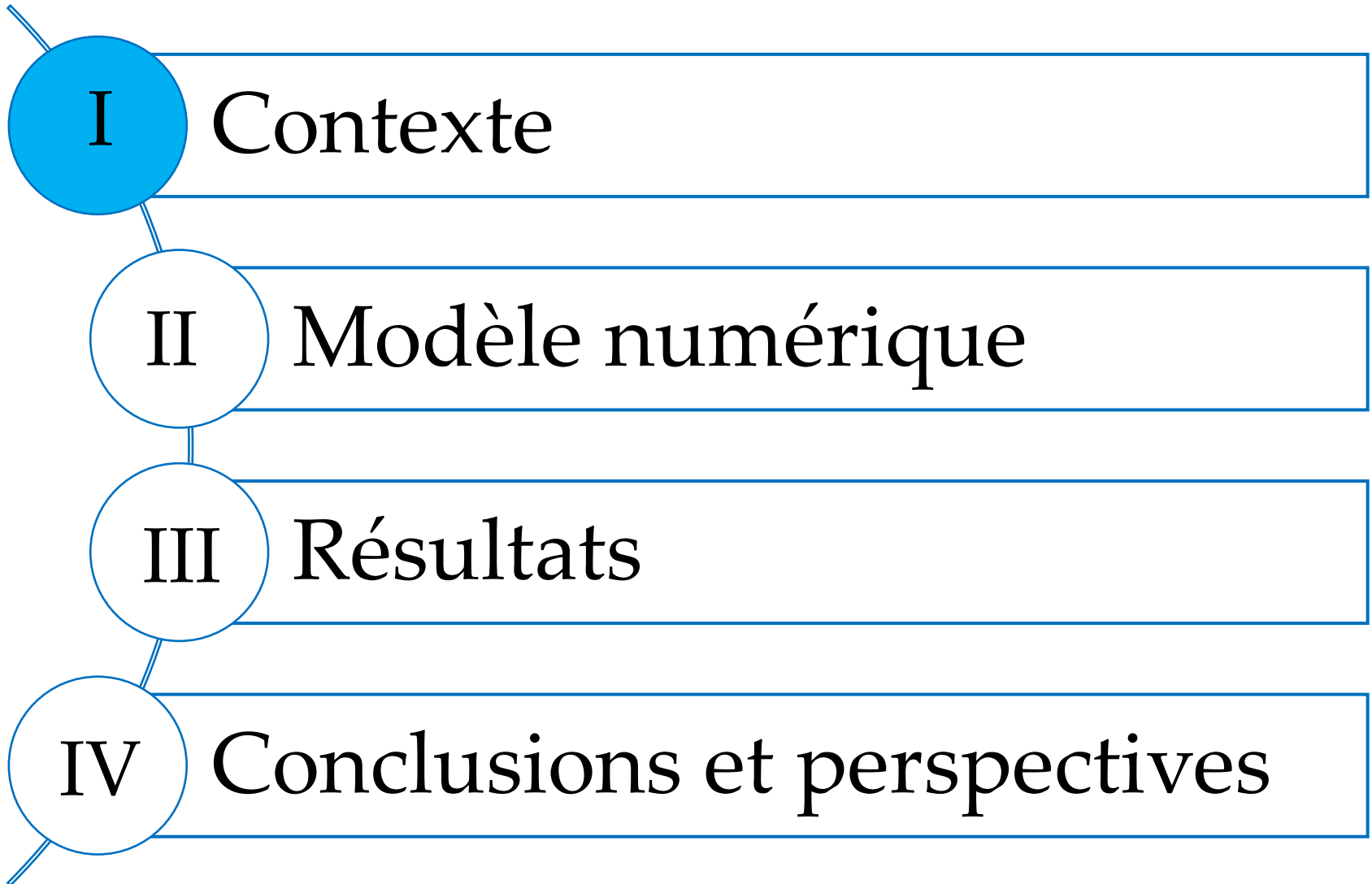
I Contexte

II Modèle numérique

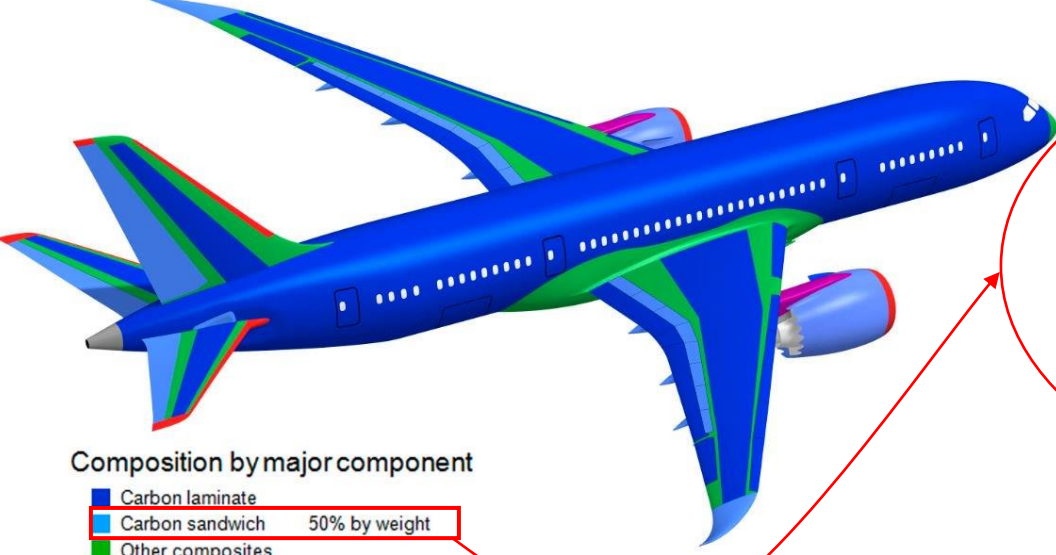
III Résultats

IV Conclusions et perspectives

Plan



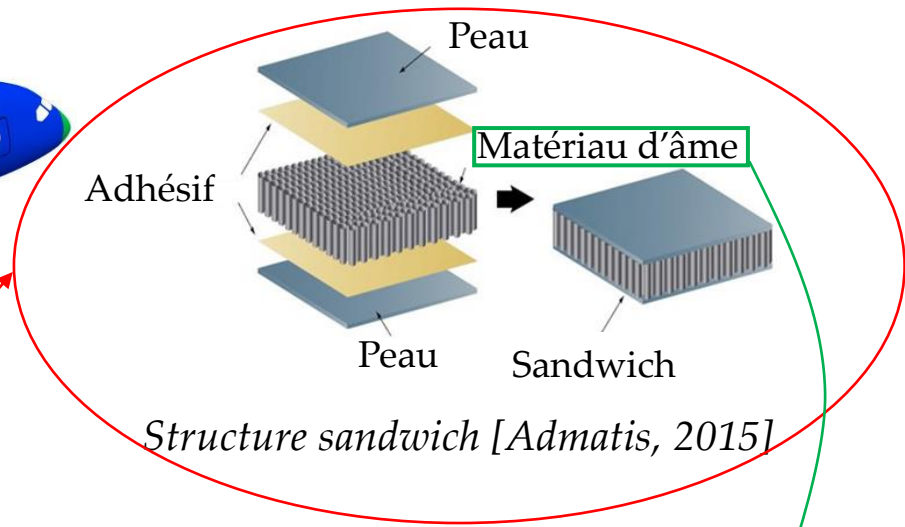
I. Contexte



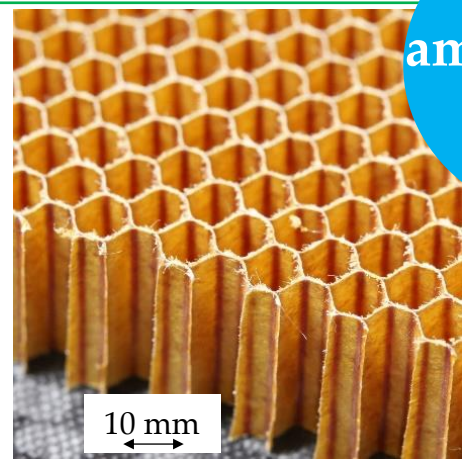
Composition by major component

- Carbon laminate
- Carbon sandwich 50% by weight
- Other composites
- Aluminum, 20%
- Titanium, 15%
- Titanium/steel/aluminum
- Steel, 10%
- Other, 5%

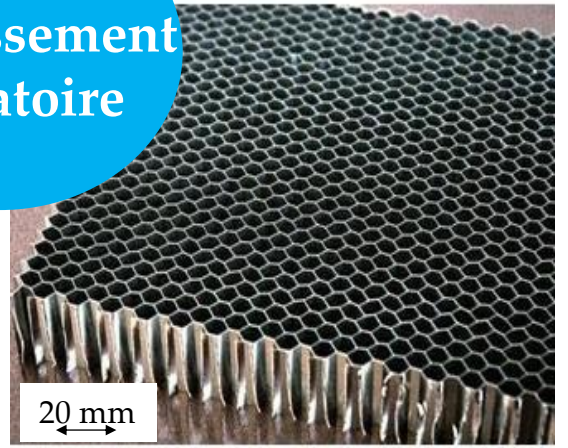
Matériaux du Boeing 787
[Boeing company, 2012]



Faible amortissement vibratoire

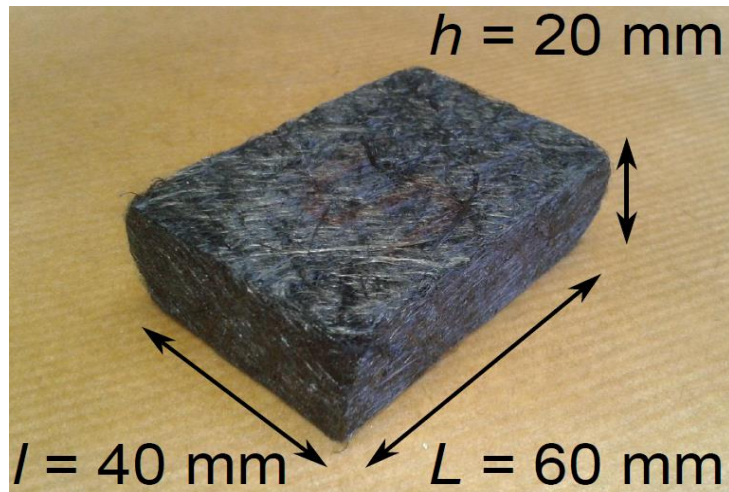


Nid d'abeille en Nomex
[Rock west Composites]

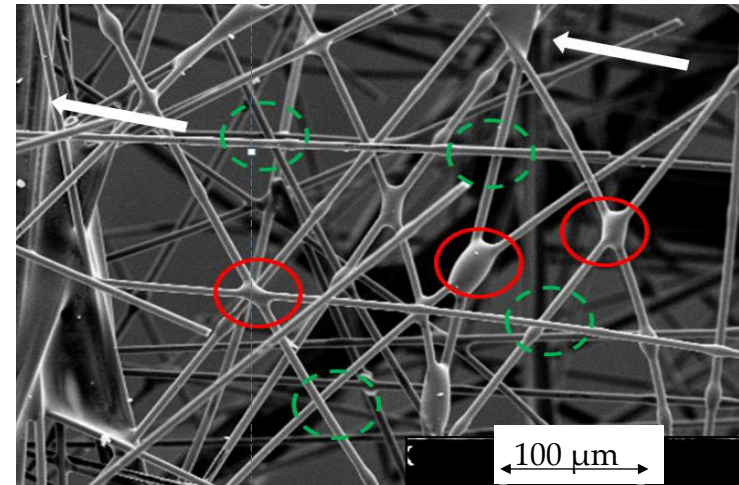


Nid d'abeille en aluminium [Trading Companies and Manufacturers]

Matériau enchevêtré réticulé



Matériau enchevêtré réticulé



Observation au MEB de fibres de carbone enchevêtrées réticulées

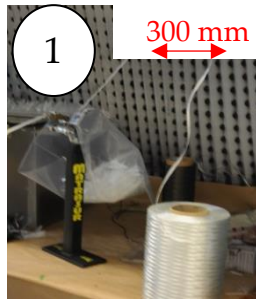
Avantages

- Bon amortissement vibratoire [Piollet, 2014]
- Porosité ouverte
- Solution pour recycler des fibres
- Capacité d'intégrer des formes complexes

Inconvénients

- Faible rigidité [Mezeix, 2009]

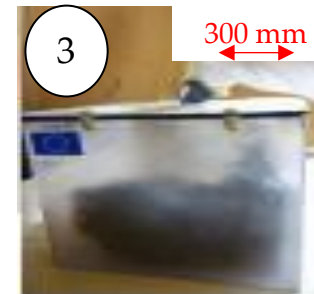
Procédé de fabrication



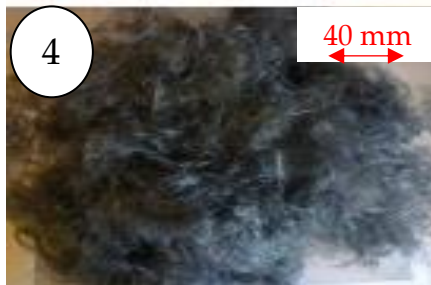
Phase de découpe



Torons coupés



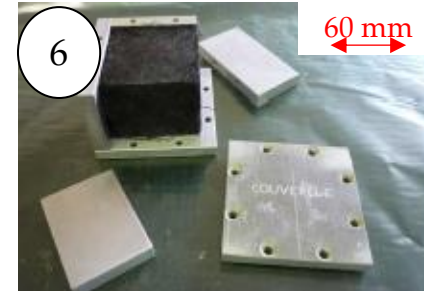
Fibres séparées et enchevêtrées
sous air comprimé



Fibres
enchevêtrées



Pulvérisation
de la résine



Fibres enchevêtrées
réticulées

Procédé de fabrication [Mezeix,2009]

- Imperfection de la séparation des fibres
- Distribution des orientations des fibres anisotrope à la fin du moulage
- Des contacts libres + des contacts bloqués par les jonctions d'époxy

Plan

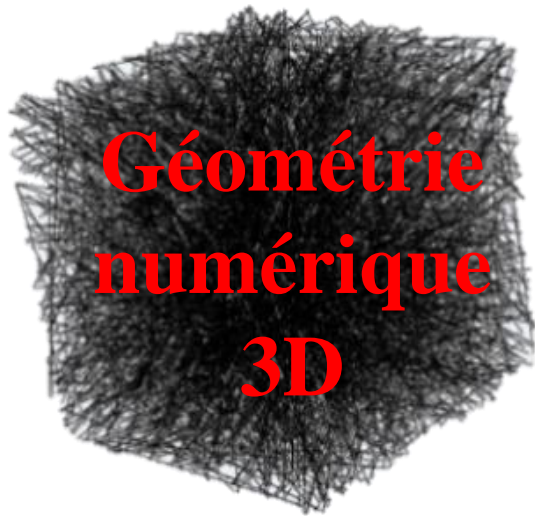
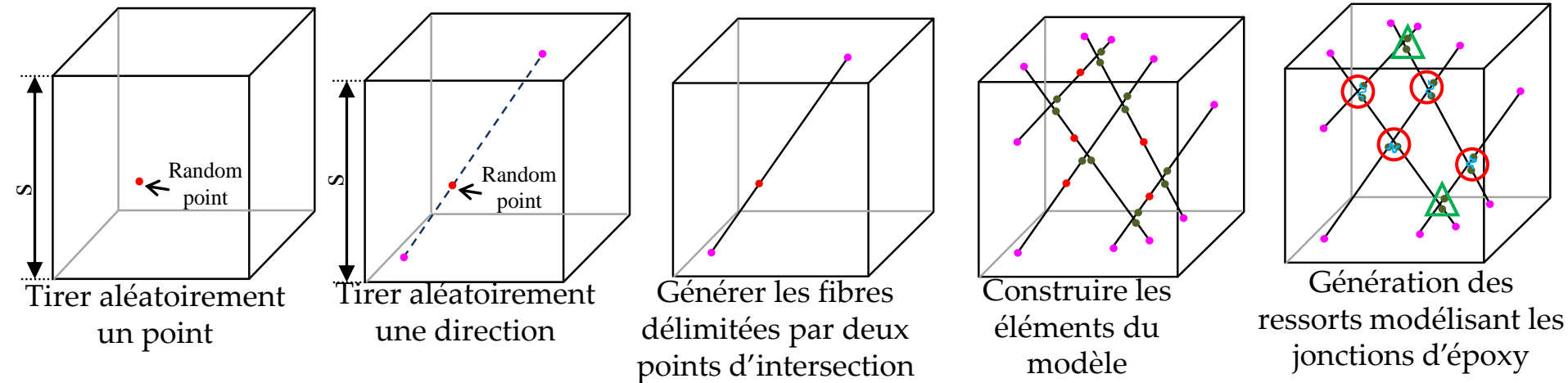
I Contexte

II Modèle numérique

III Résultats

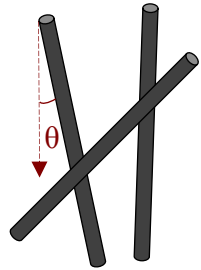
IV Conclusions et perspectives

Génération de la géométrie numérique



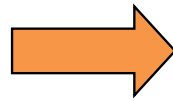
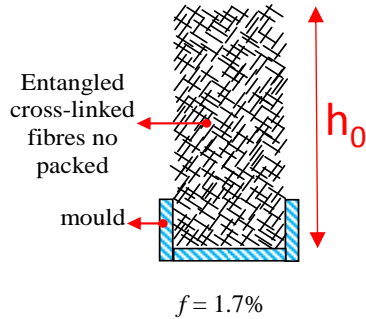
- *Fraction volumique = 8,5 %*
- $D_{contact}^{exp} = 120_{-70}^{+140} \mu m$ [Mezeix, 2010]
- *Distribution des orientations de fibres ?*
- *Raideurs de jonction d'époxy ?*

Détermination Num. de la distribution des orientations de fibres

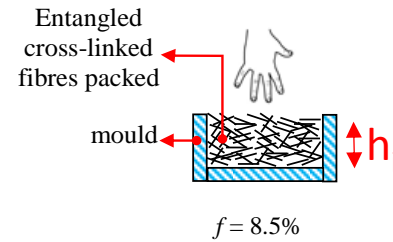


Isotropic distribution

Before moulding step



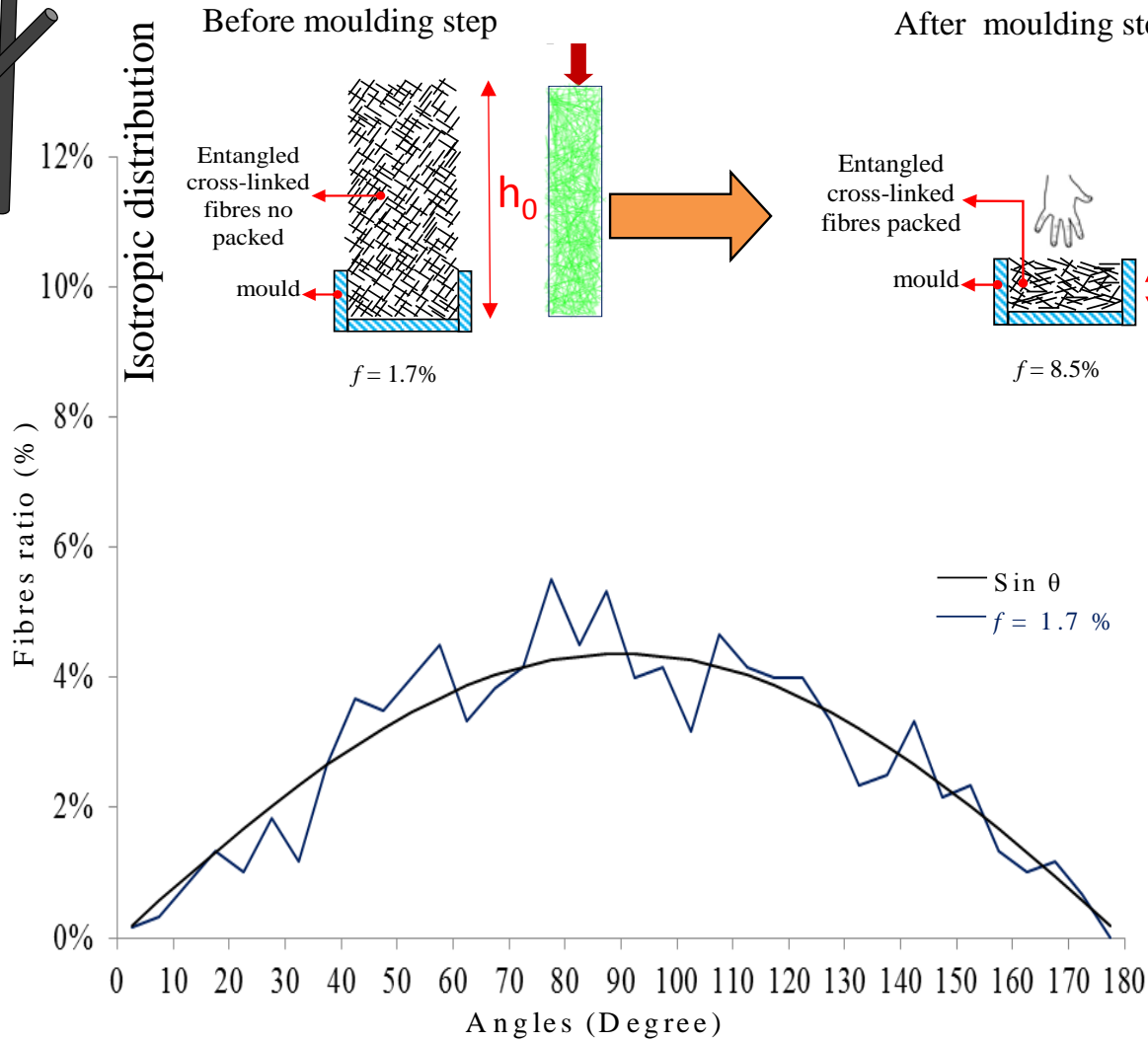
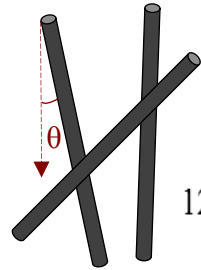
After moulding step



Anisotropic distribution

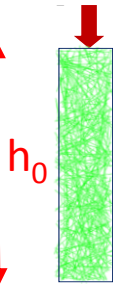
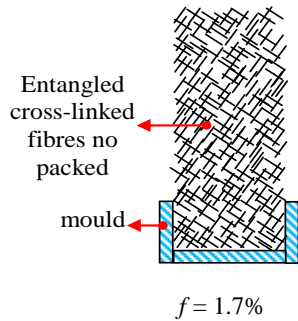
✓ $h_0 = 5 \times h_i$

Détermination Num. de la distribution des orientations de fibres

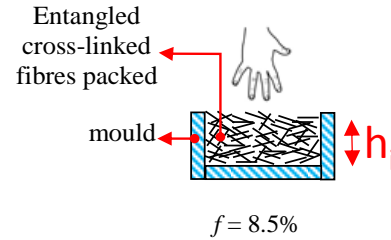


Isotropic distribution

Before moulding step



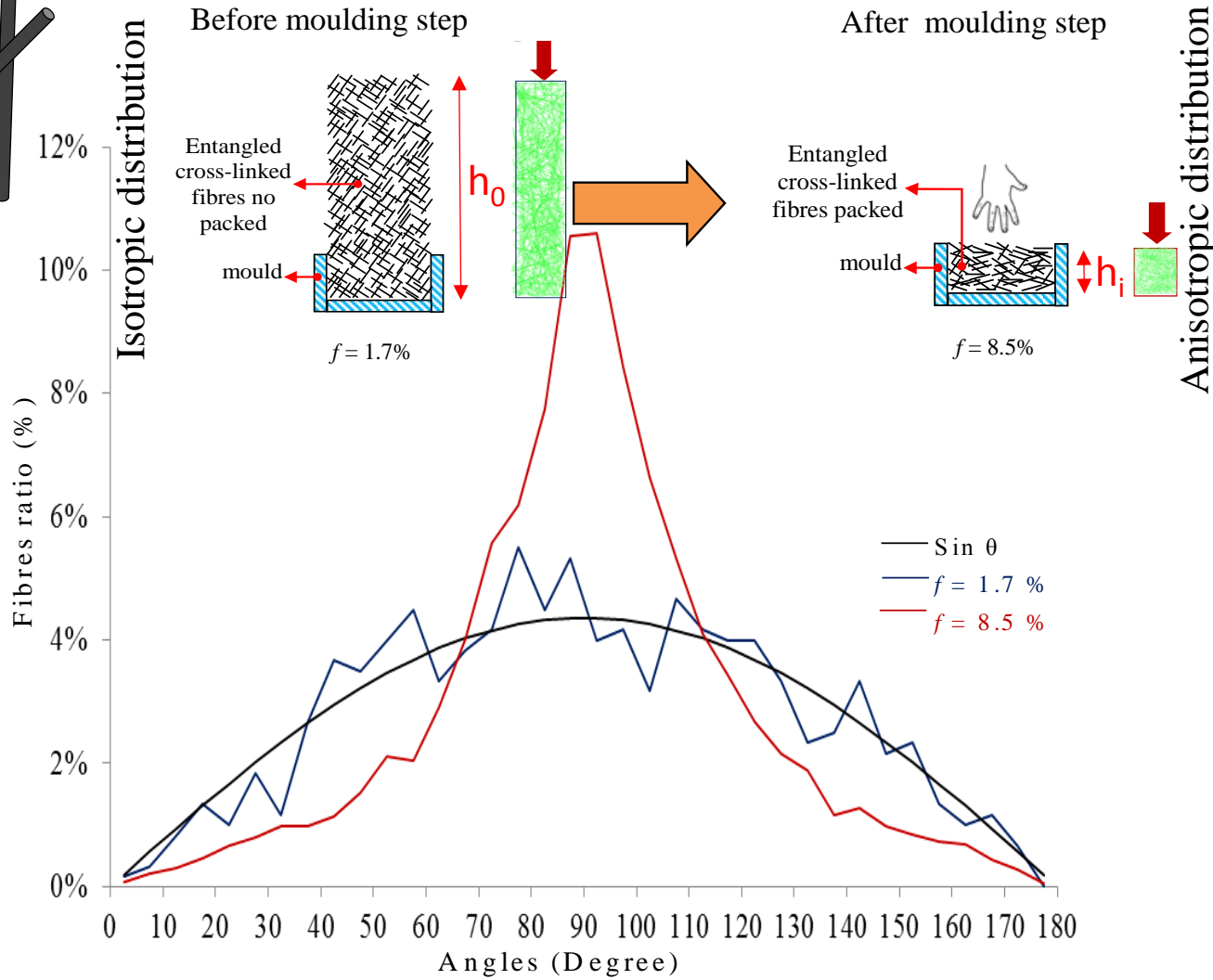
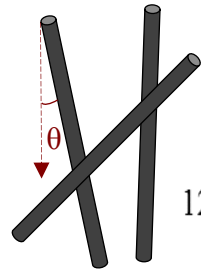
After moulding step



Anisotropic distribution

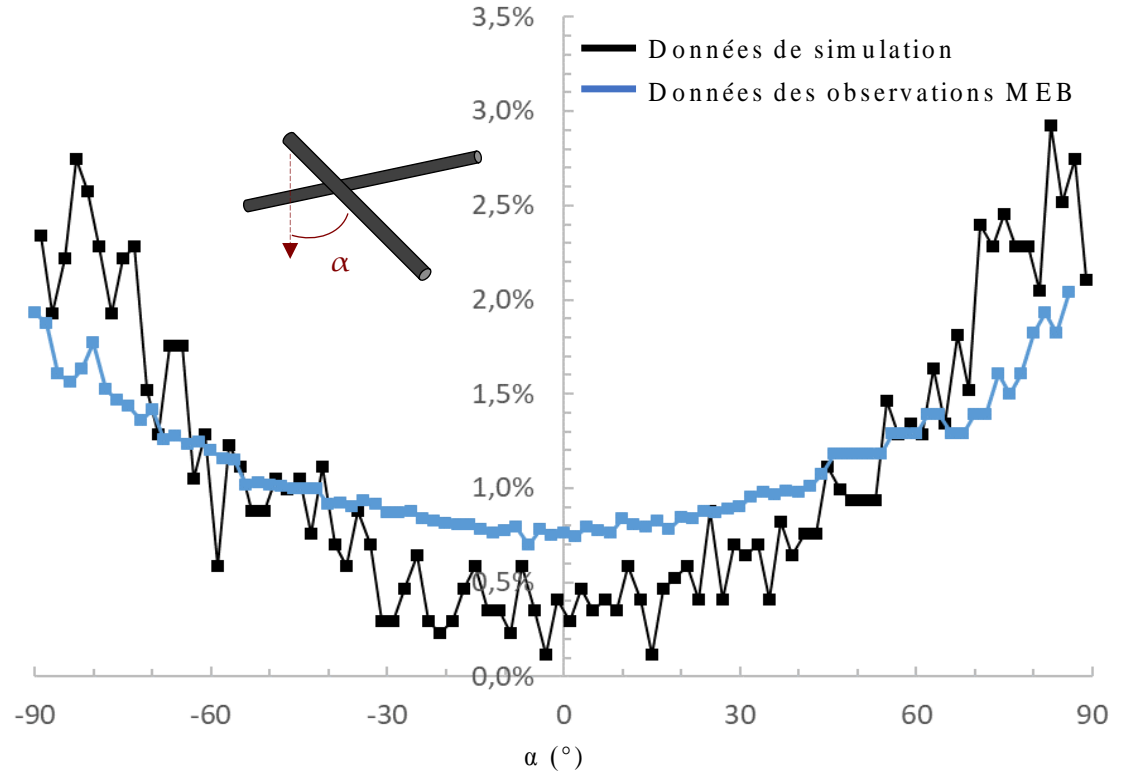
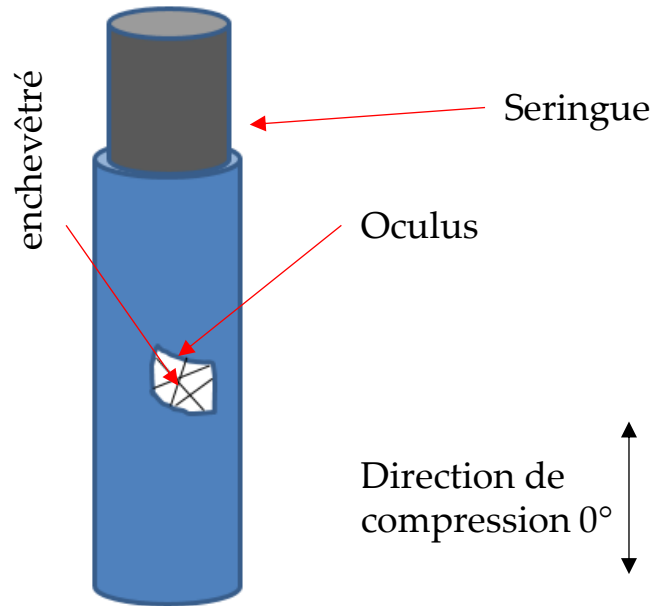
✓ $h_0 = 5 \times h_i$

Détermination Num. de la distribution des orientations de fibres



✓ $h_0 = 5 \times h_i$

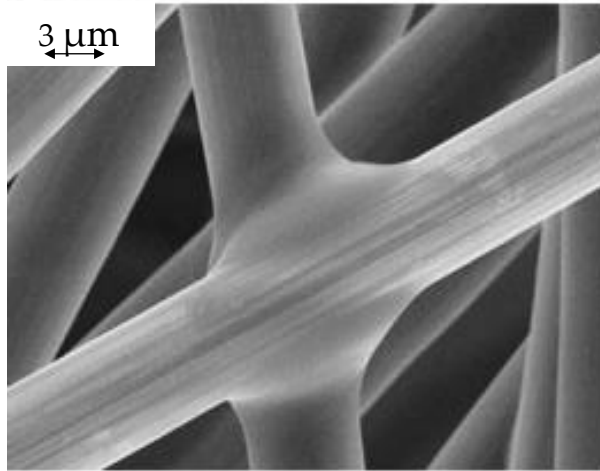
Détermination Exp. de la distribution des orientations de fibres



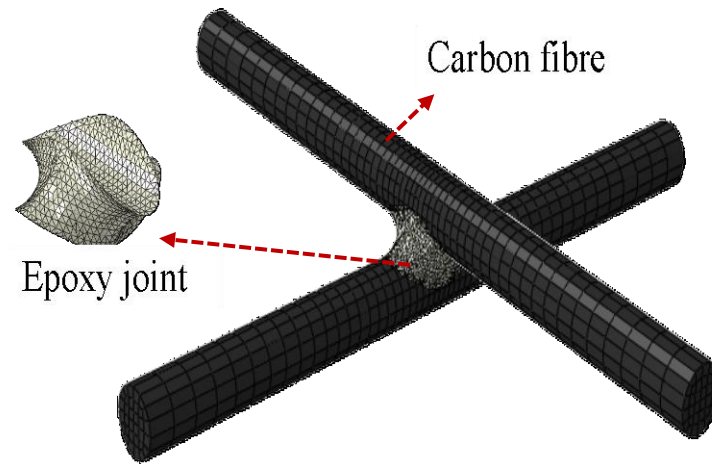
Orientation des fibres par rapport à l'axe de compression après projection en 2D

- ✓ Observations au MEB d'un enchevêtré comprimé à $f = 8,5\%$
- ✓ Seringue graduée avec un orifice découpé (oculus)
- ✓ Séries d'observations à fort grandissement

Détermination Exp. de la distribution des orientations de fibres



Jonction époxy observée au MEB

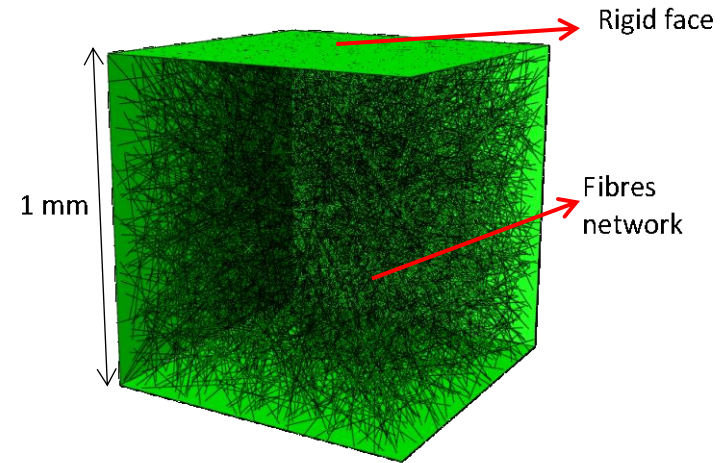
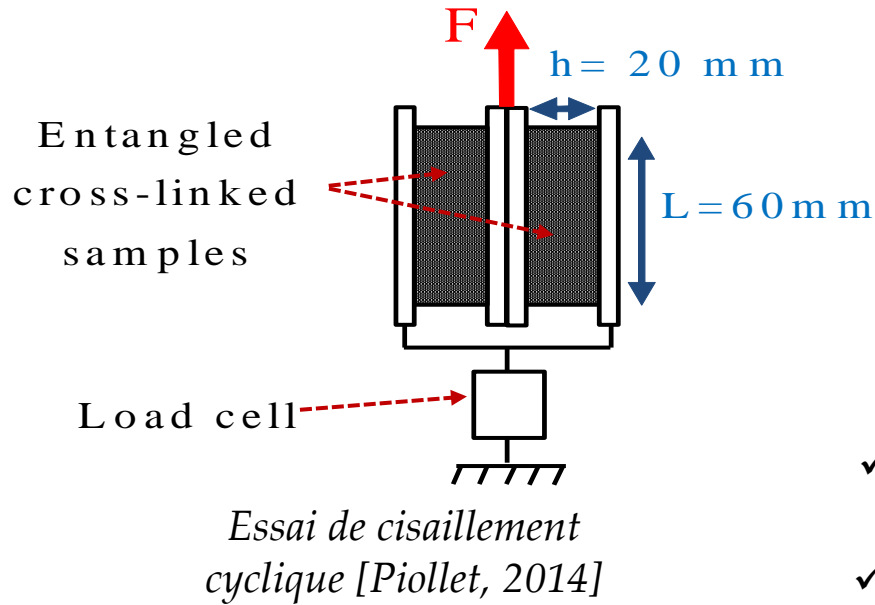


Modèle EF de deux fibres liées avec une jonction d'époxy

- ✓ Modèle simplifié (raideur de traction + raideur de torsion)
- ✓ Détermination des raideurs {
 - Modèle numérique
 - Modèle analytique (théorie des poutres)
- ✓ Configuration géométrique déduite de l'imagerie MEB

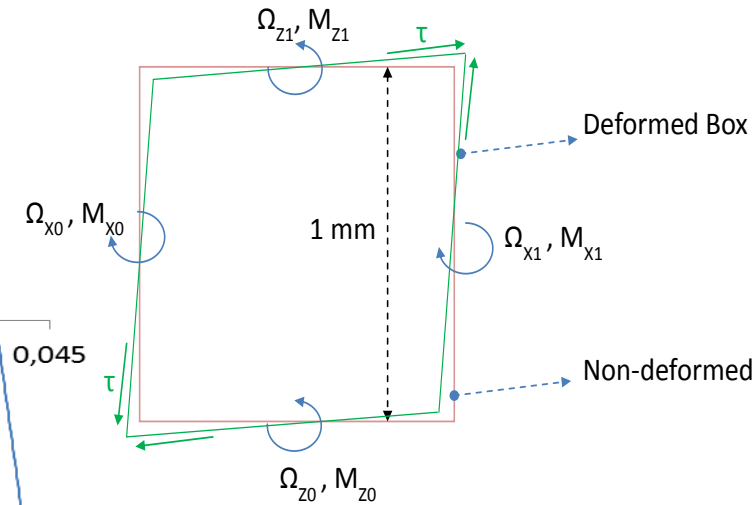
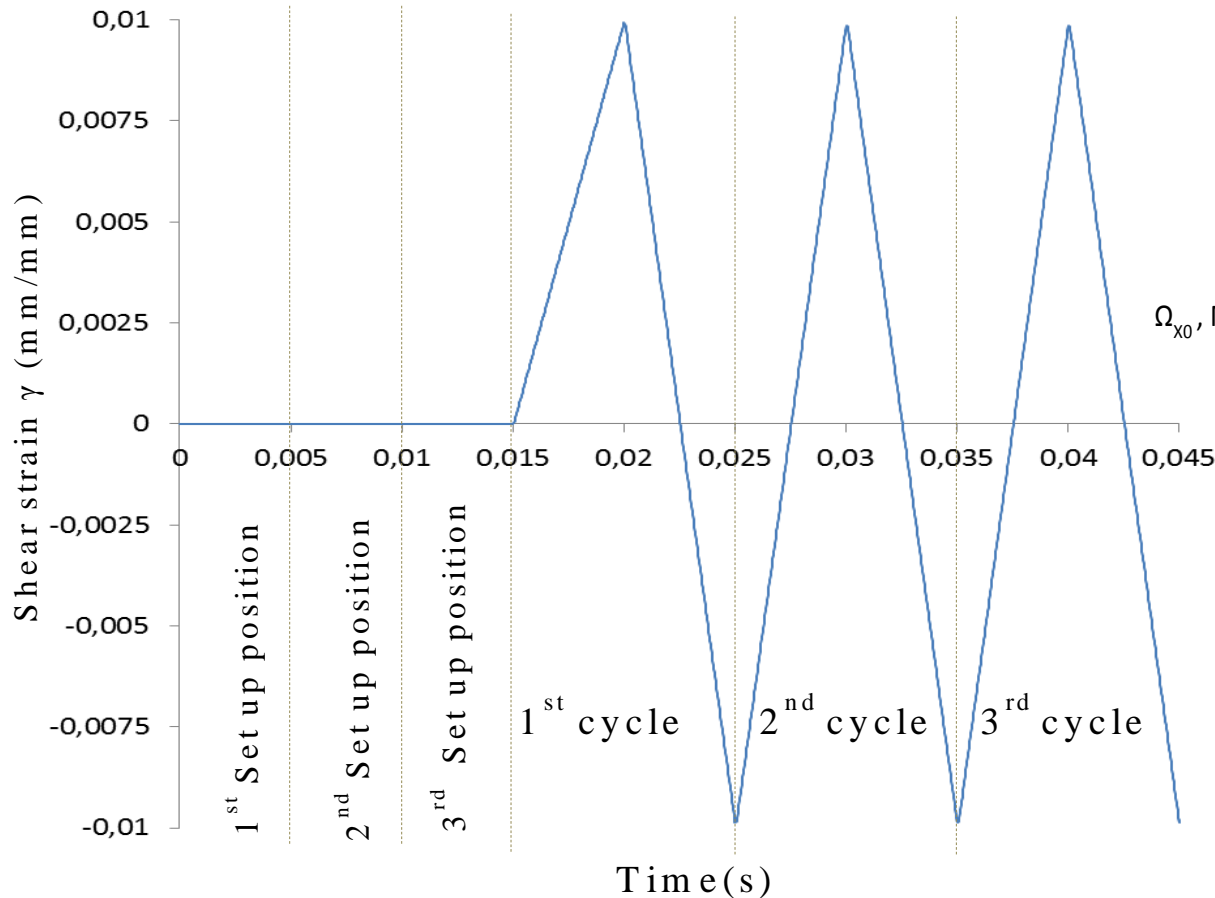
- Raideur de traction, $K_{\text{tension}} = 0.4 \text{ N/mm}$
- Raideur de torsion, $K_{\text{torsion}} = 3.10^{-4} \text{ N.mm}$

Conditions aux limites



- ✓ Abaqus/Explicit {
 - Forte non-linéarité géométrique
 - Grand nombre de contacts
- ✓ Surfaces rigides entourant la géométrie numérique
- ✓ Éléments poutre 3D de type Timoshenko (B31)
- ✓ Plus de 2000 contacts activés avec la condition de non-pénétration
- ✓ Frottement de Coulomb

Technique de chargement

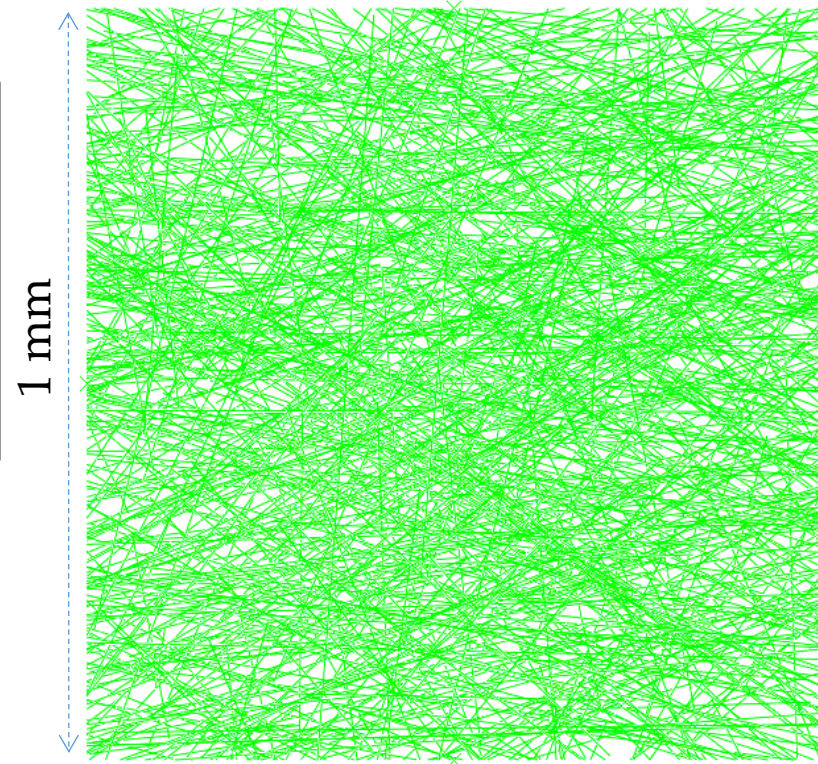


- ✓ Rotation des surfaces rigides
- ✓ Annulation des interpénétrations
- ✓ 3 cycles de chargement
- ✓ Déformation imposée de 1%

Simulation numérique

- 2460 fibres de carbone
- Diamètre de fibre = 7 μm
- Module d'Young des fibres, $E = 240 \text{ GPa}$
- Fraction volumique, $f = 8,5 \%$
- Coefficient de frottement = 0,05 [Tourolonias 2017]
- Distribution des orientations des fibres anisotrope
- 2 contacts collés sur 3

- ✓ Calculateur CALMIP
- ✓ 20 processeurs en parallèle
- ✓ 3 GB de mémoire
- ✓ Durée de simulation : 84 h



*Chargement de cisaillement cyclique du
VER
(déformations $\times 10$)*

Plan

I Contexte

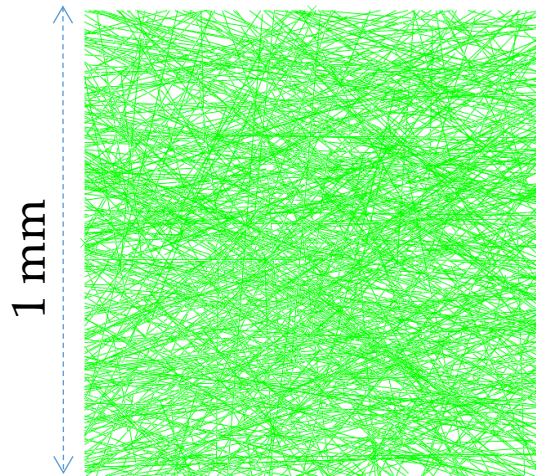
II Modèle numérique

III Résultats

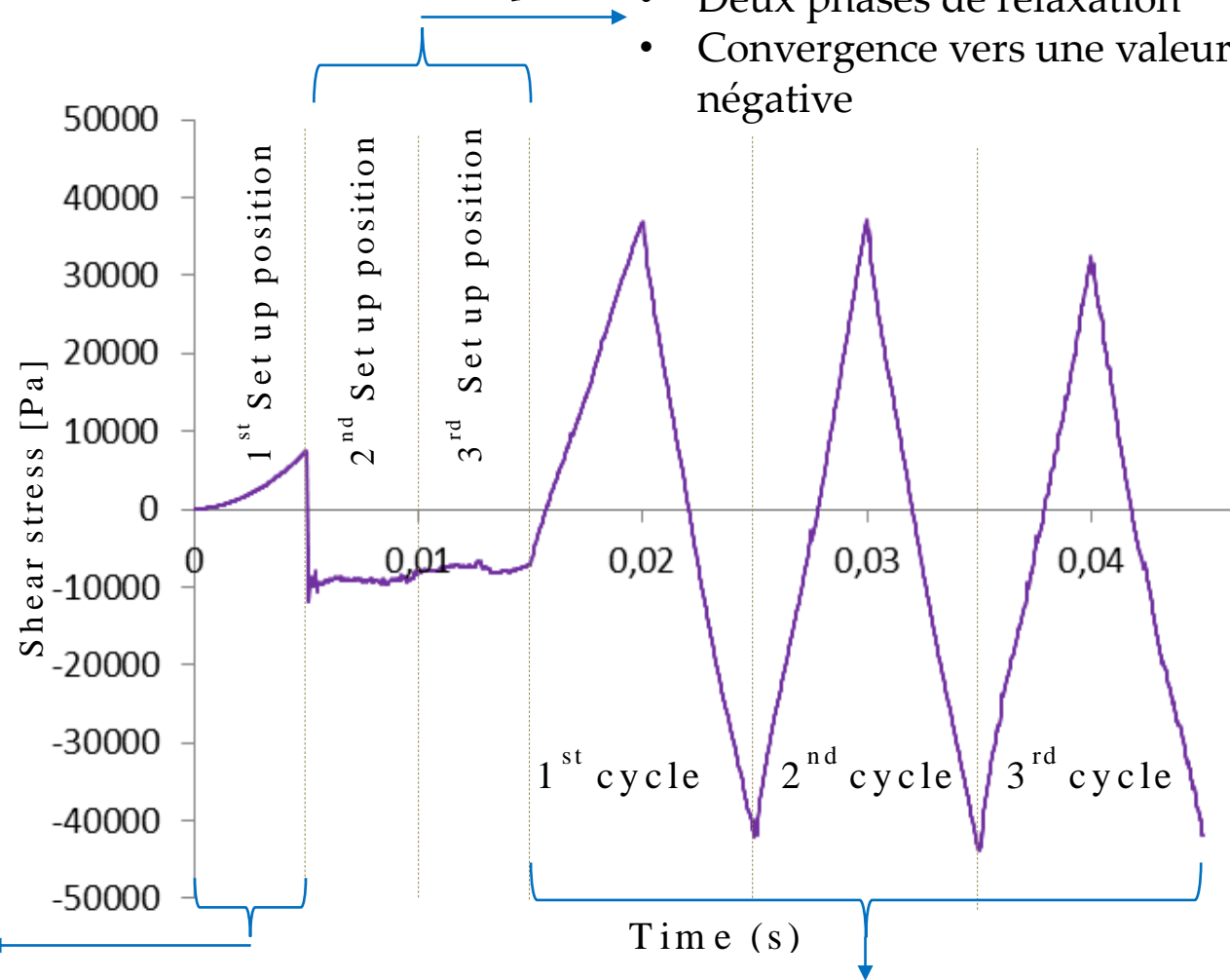
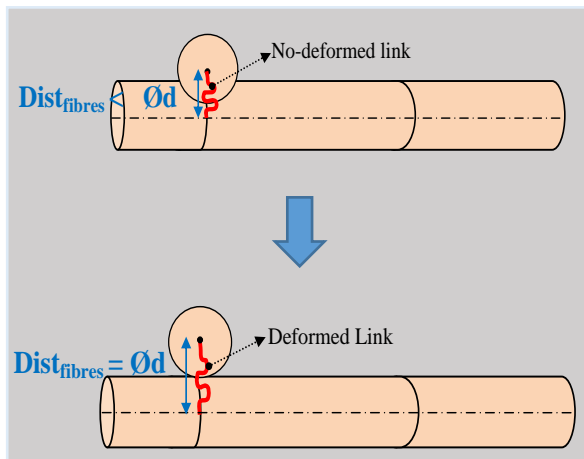
IV Conclusions et perspectives

Simulation numérique

- Deux phases de relaxation
- Convergence vers une valeur négative

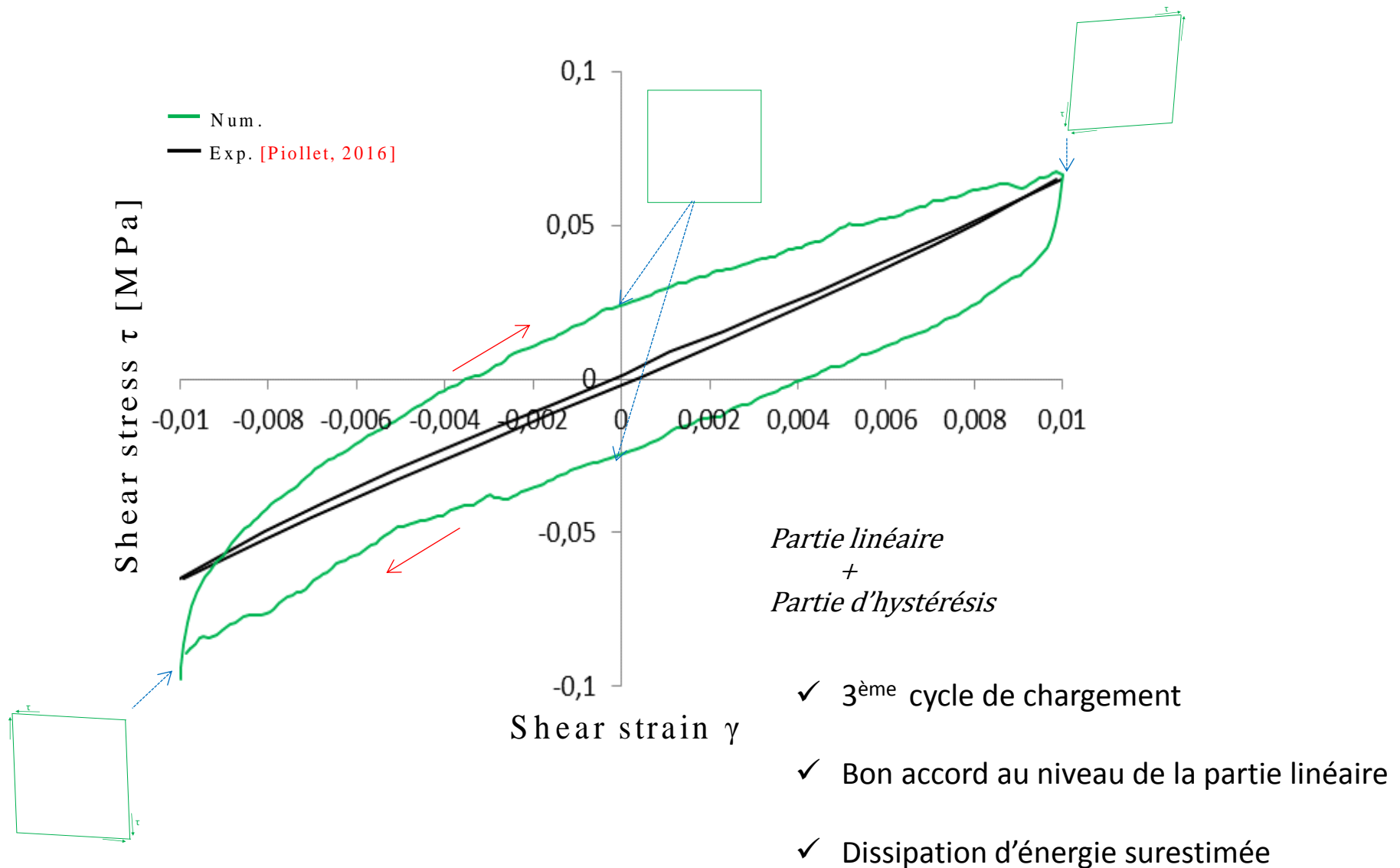


Chargement de cisaillement cyclique du VER (déformations $\times 10$)

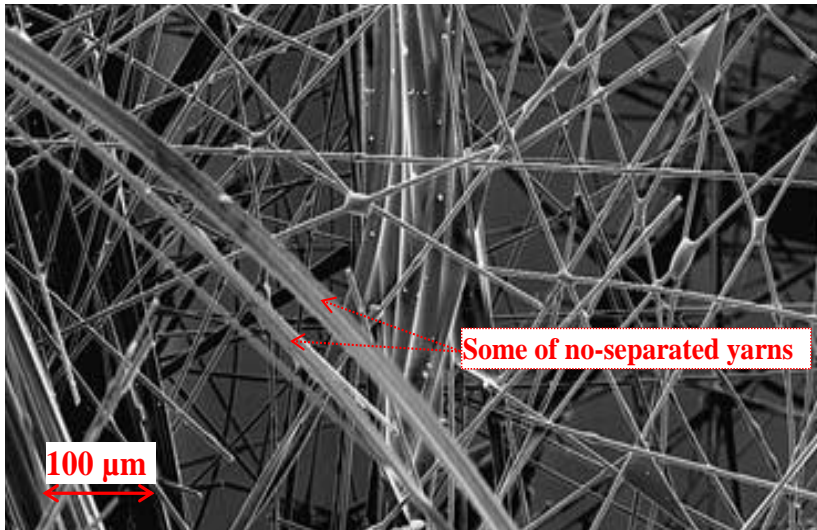


- Variation des contraintes autour d'une valeur négative
- Stabilité des contraintes de cisaillement

Résultats de simulation numérique



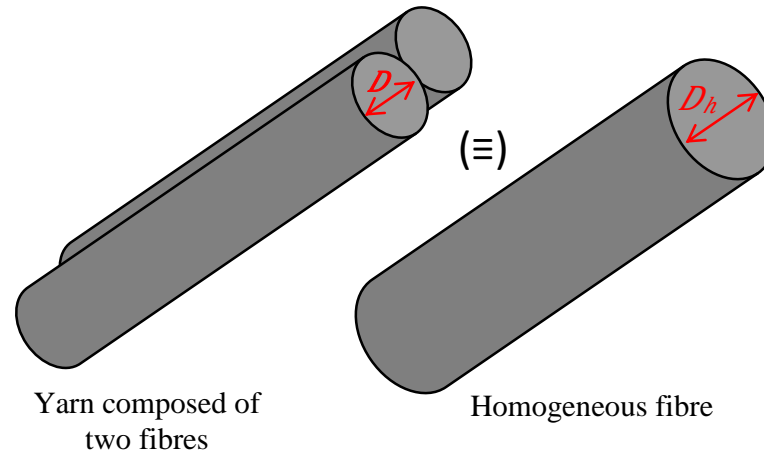
Prise en compte des torons non séparés



Observation au MEB du matériau enchevêtré réticulé

$$2 \times (\pi D^2 / 4) = \pi D_h^2 / 4 \quad \dots \rightarrow D_h = \sqrt{2} \times D$$

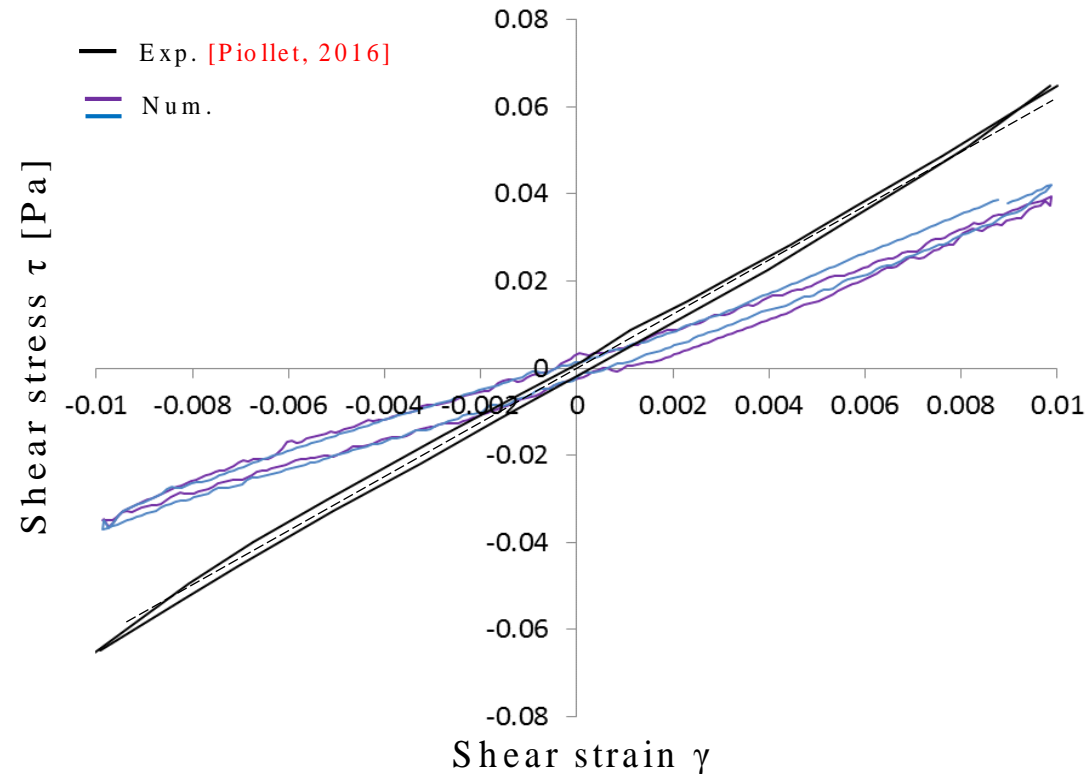
$$2 \times (EI) = (E_h I) \quad \dots \rightarrow E_h = E/2$$



- ✓ Paquets de deux fibres en moyenne
- ✓ Fibre équivalente $\begin{cases} E_h = E/2 \\ D_h = \sqrt{2} D \end{cases}$
- ✓ Même section
- ✓ Même module de flexion

Résultats de nouvelle simulation numérique

- 1230 fibres de carbone équivalentes
- Diamètre de fibre = $7\sqrt{2} \mu\text{m}$
- Module d'Young des fibres, $E_h = E/2 = 120 \text{ GPa}$
- Fraction volumique, $f = 8,5 \%$
- Coefficient de frottement = 0,05 [Tourolonias, 2017]
- Distribution des orientations des fibres anisotrope
- 2 contacts collés sur 3

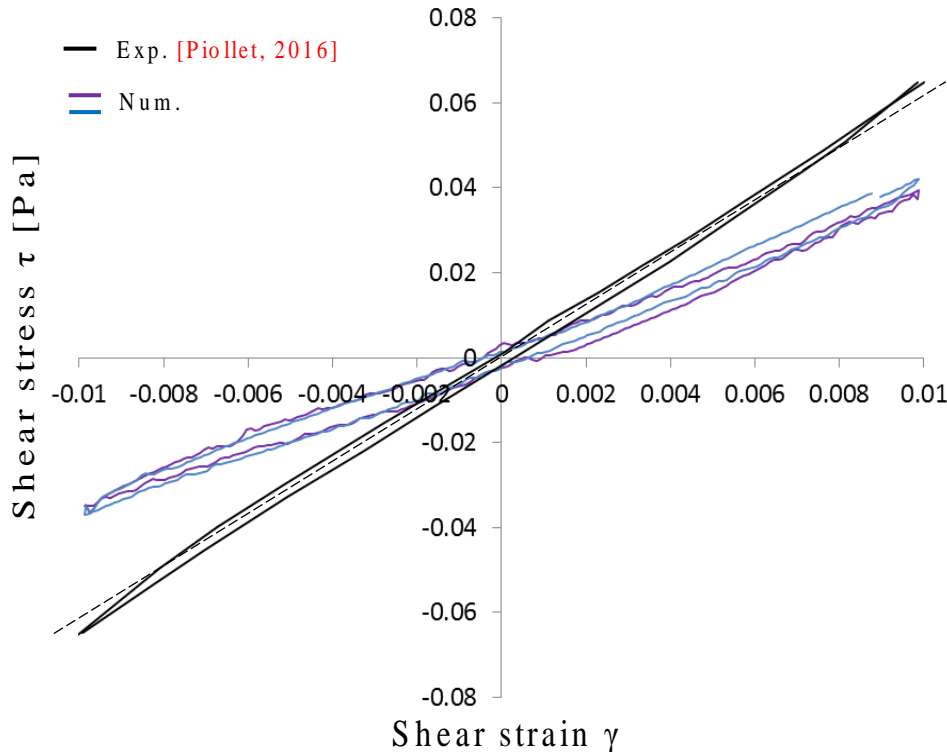


- ✓ 3^{ème} cycle de chargement
- ✓ Bon accord au niveau de la dissipation d'énergie
- ✓ Courbe numérique moins raide
 - Moins de fibres
 - Moins de ressorts

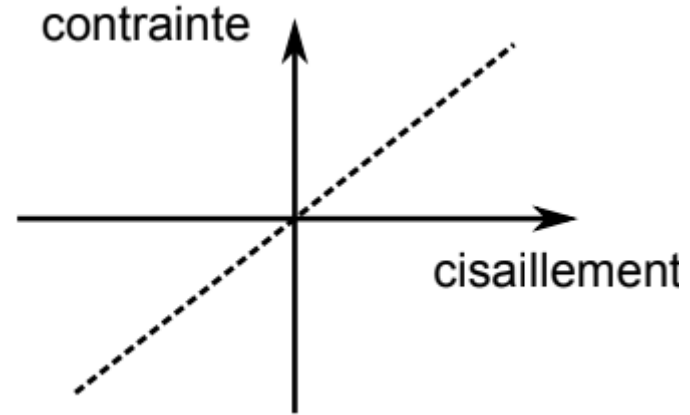
Décomposition de la courbe d'hystérésis

$$G = \left. \frac{d\gamma}{d\tau} \right|_{\gamma=0} \quad G_{exp} = 6 \text{ MPa}$$

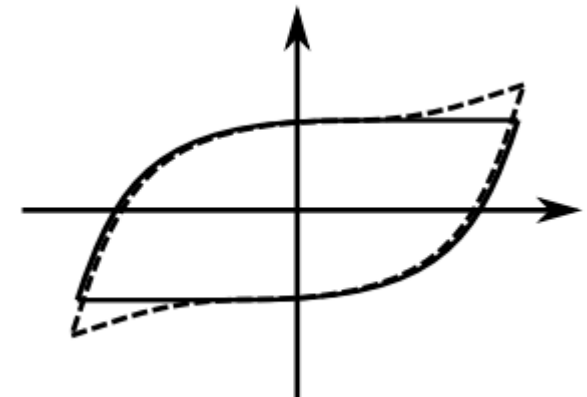
$$G_{num} = 4 \text{ MPa}$$



Composante linéaire + hystérésis

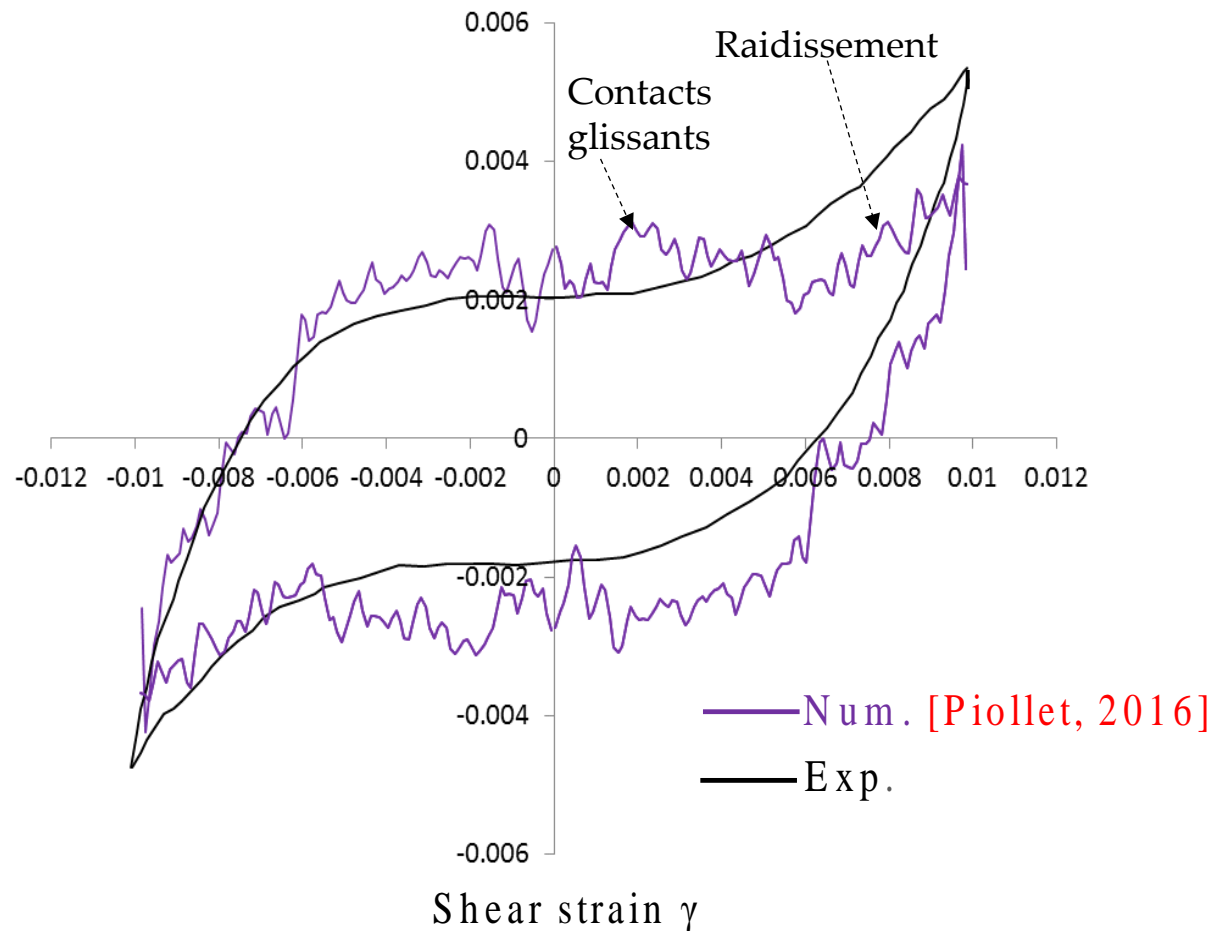


Partie linéaire



Partie d'hystérésis

Partie d'hystérésis



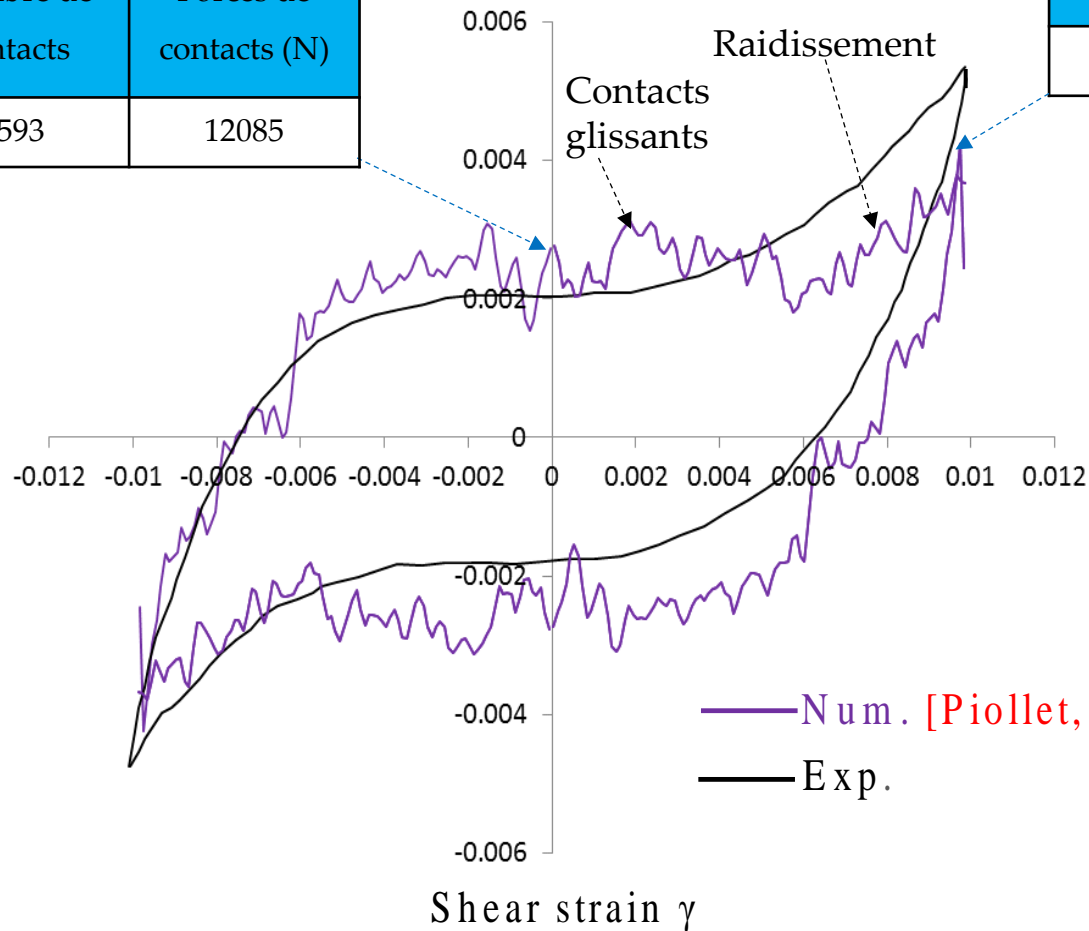
$$\tau' = \tau - G \times \gamma$$

Hystérésis sans composante linéaire

Partie d'hystérésis

Nombre de contacts	Forces de contacts (N)
2593	12085

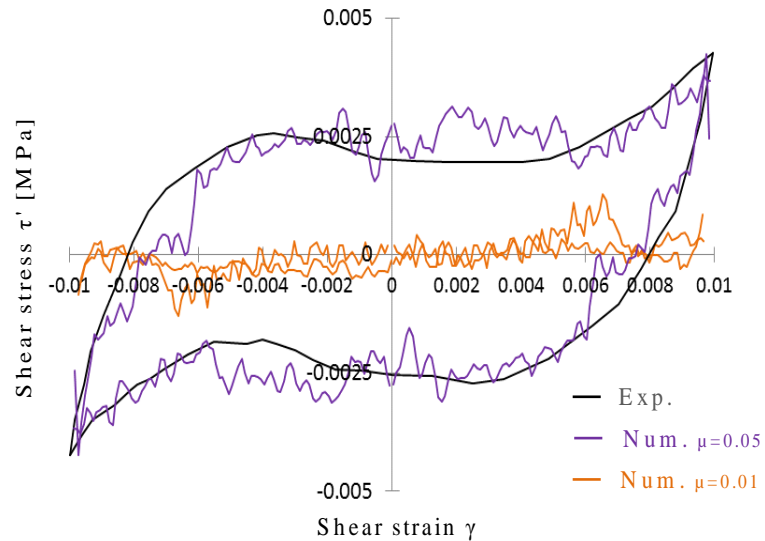
Nombre de contacts	Forces de contacts (N)
2705	13880



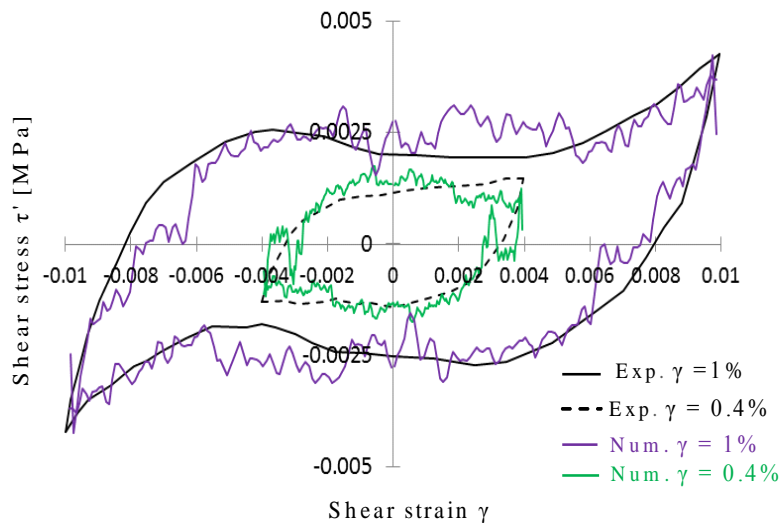
$$\tau' = \tau - G \times \gamma$$

Hystérésis sans composante linéaire

Effet de coefficient de frottement μ et de l'amplitude γ



➤ Dissipation d'énergie due au frottement



➤ Changement de la forme de l'hystérésis

Plan

I Contexte

II Modèle numérique

III Résultats

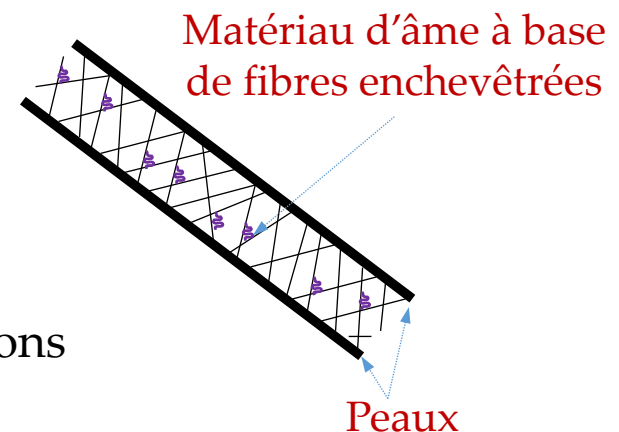
IV Conclusions et perspectives

Conclusions

- Comportement en cisaillement d'un réseau de fibres enchevêtrées avec des jonctions bloquant une partie des contacts entre fibres
- Meilleure compréhension de la forme complexe de la courbe d'hystérésis
- Meilleure compréhension de la source de dissipation d'énergie et de son évolution en fonction de l'amplitude de la déformation imposée ou de la valeur du coefficient de frottement

Perspectives

- Etude de l'effet d'autres paramètres morphologiques sur le comportement dissipatif de l'enchevêtré réticulé
- Etude d'amortissement d'une structure sandwich
- Amélioration du procédé de fabrication
- Détermination expérimentale des raideurs de jonctions



Merci de votre attention

- ◆ Fadhel Chatti, Christophe Bouvet, Dominique Poquillon, Guilhem Michon, “Numerical analysis of shear stiffness of an entangled cross-linked fibrous material, *Int. J. Sol. Struct.* (2019).
- ◆ Fadhel Chatti, Christophe Bouvet, Dominique Poquillon, Guilhem Michon, “Numerical modelling of shear hysteresis of entangled cross-linked carbon fibres intended for core material”. *Comput. Mater. Sci.* 155 (2018) 350–363.
- ◆ Fadhel Chatti, Dominique Poquillon, Christophe Bouvet, Guilhem Michon, “Numerical modelling of entangled carbon fibre material under compression”. *Comput. Mater. Sci.* 151 (2018) 14–24.