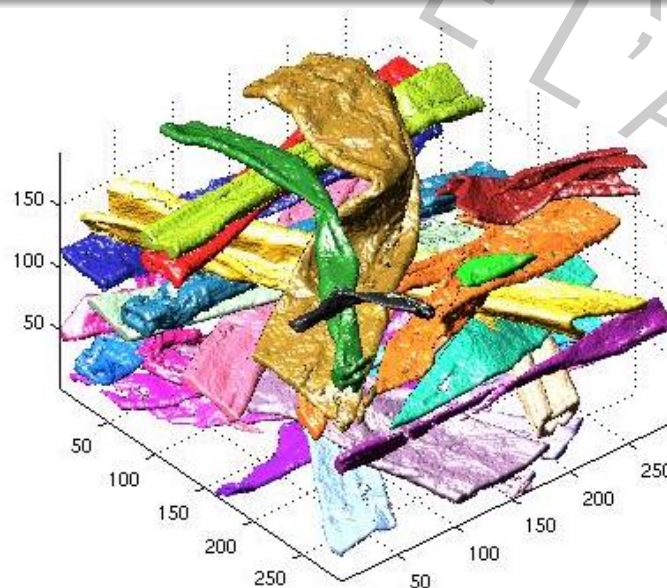


MICROSTRUCTURES ET COUPLAGES HYGRO-MÉCANIQUES DANS LES MATÉRIAUX À BASE DE FIBRES LIGNO-CELLULOSIQUES (PAPIERS, NON-TISSÉS ET FILMS)

Pierre Dumont¹, Laurent Orgéas², Jérémie Viguié^{1,2}, Sabine Rolland du Roscoat², Cyril Marulier^{1,2}, Pierre Latil^{1,2}, Florian Martoia^{1,2}

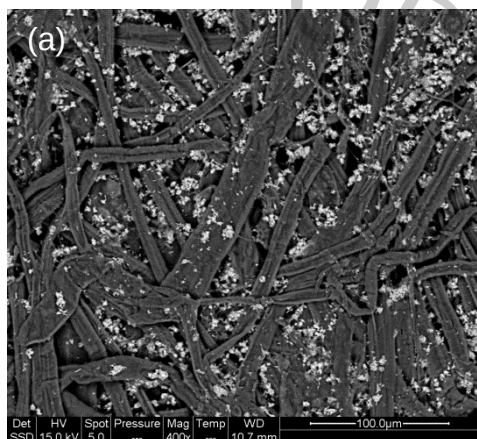
¹Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers (LGP2) – CNRS – Université de Grenoble Alpes

²Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques – CNRS – Université de Grenoble Alpes

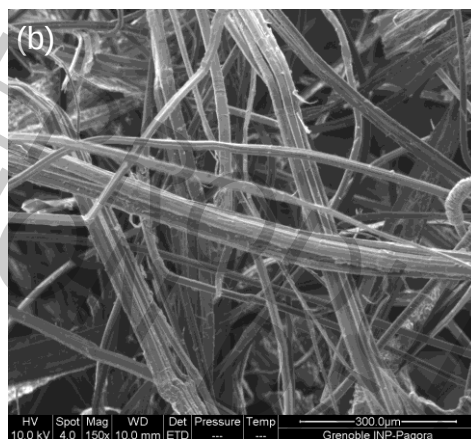


Milieux fibreux biosourcés

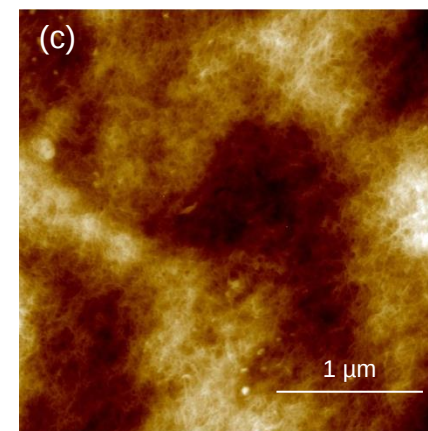
Réseaux de fibres enchevêtrées plus ou moins bien ordonnées



Papiers et cartons



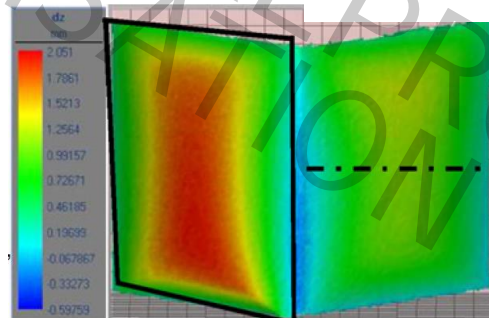
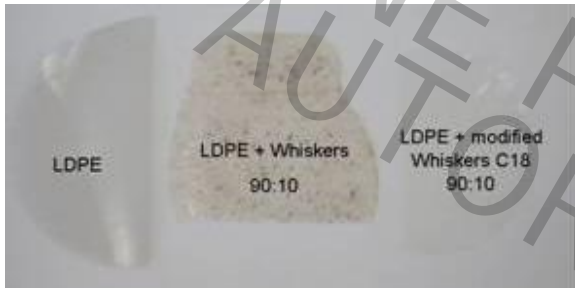
Non-tissés



Films de nanofibrilles de cellulose

Milieux fibreux biosourcés

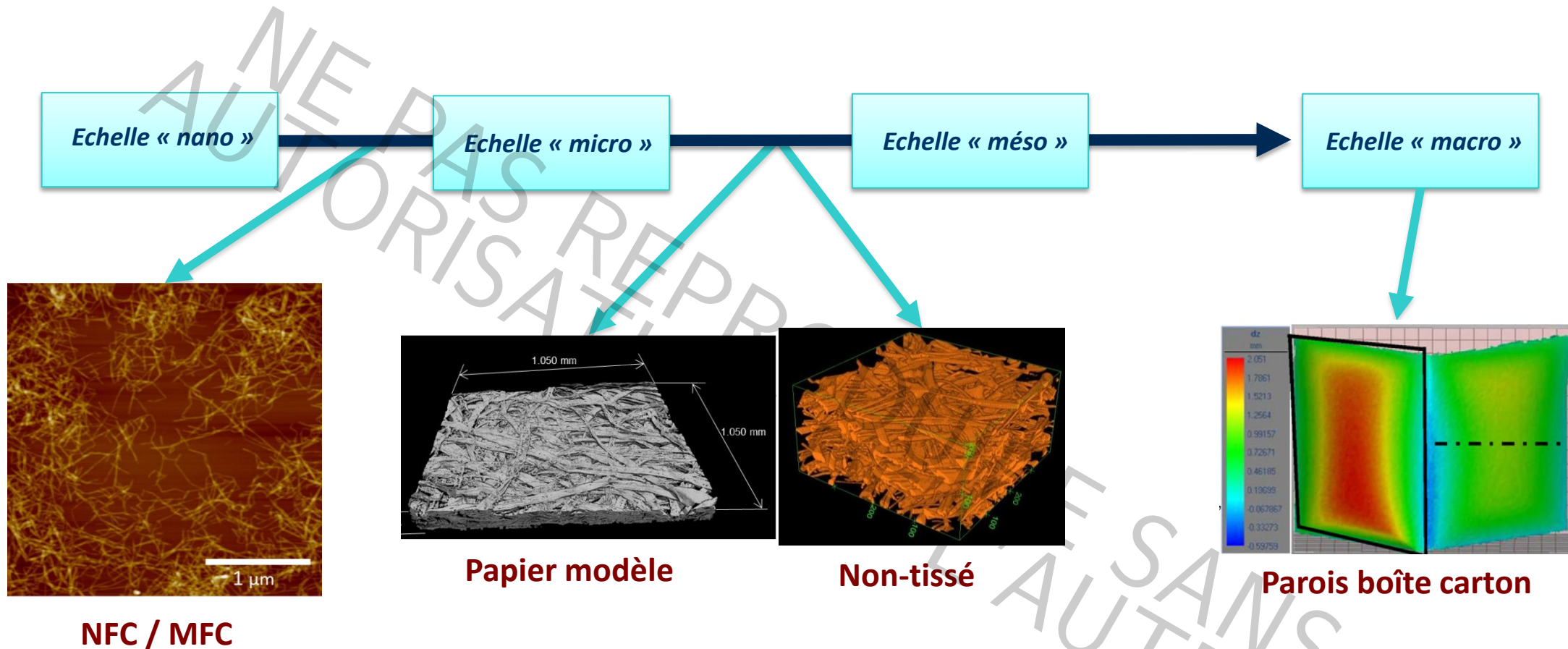
Réseaux de fibres enchevêtrées plus ou moins bien ordonnées



Applications

- Nanopapiers, mousses, aérogels, papiers, cartons, non-tissés, textiles, biocomposites pour
 - Emballage (propriétés barrières et mécaniques)
 - Electroniques et énergie (supports flexibles, propriétés diélectriques ou conductrices)
 - Transport
 - Bâtiment
 - Industrie du sport
 - Ameublement...

Milieux fibreux biosourcés



Milieux fibreux biosourcés

Fibres

Multi-matériaux

Comportement mécanique complexe :

- anisotrope
- non-linéaire (élasto-viscoplastique)
- couplages avec température et humidité

47 % HR → 80 % HR → 20 % HR → 50 % HR

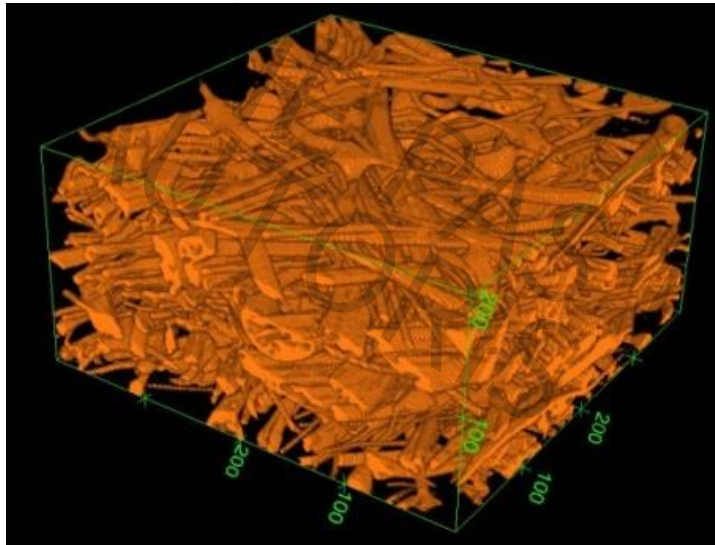


Géométrie et comportement mécanique affectés
par les traitements d'extraction



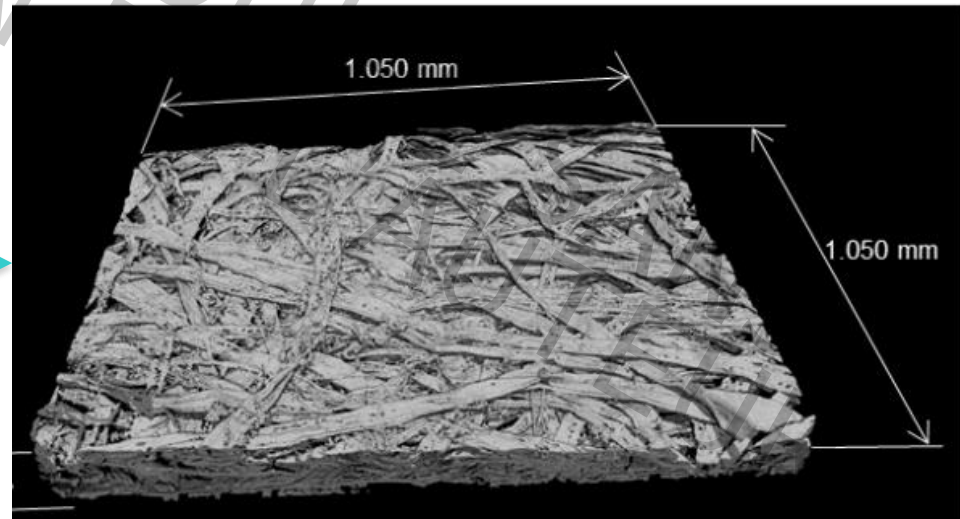
Milieux fibreux biosourcés

Liaisons entre fibres



Liaisons par obstacle, liaisons frottantes par aiguilletage ou hydroliage & liaisons cohésives par thermoliage

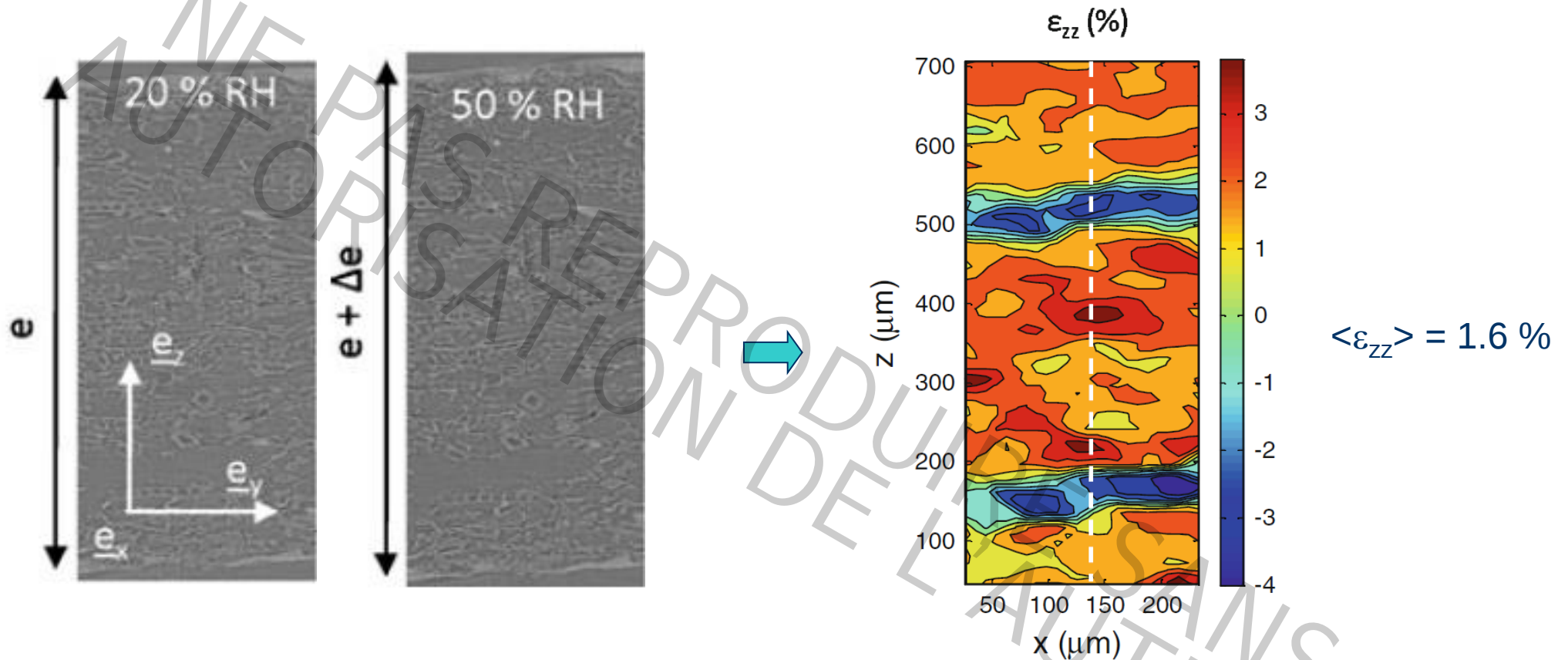
Liaisons cohésives (nature chimique : liaisons de type hydrogène ou van der Waals)



Mauvaise connaissance des propriétés morphologiques et mécaniques des liaisons

Milieux fibreux biosourcés

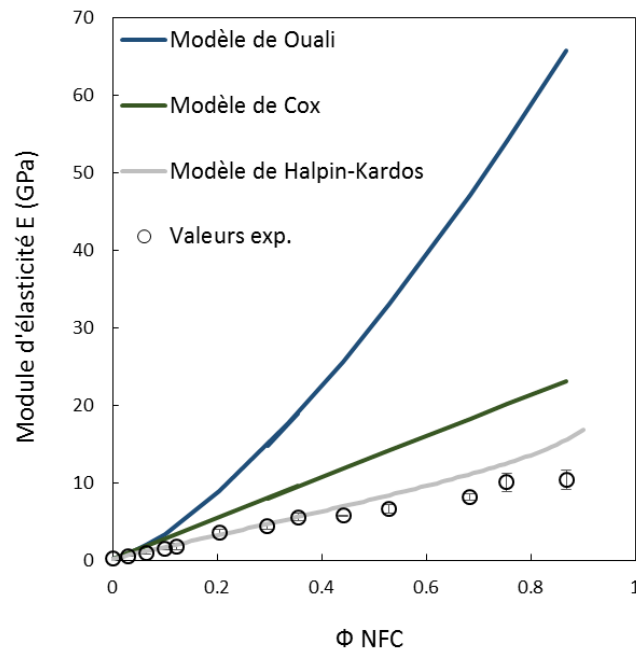
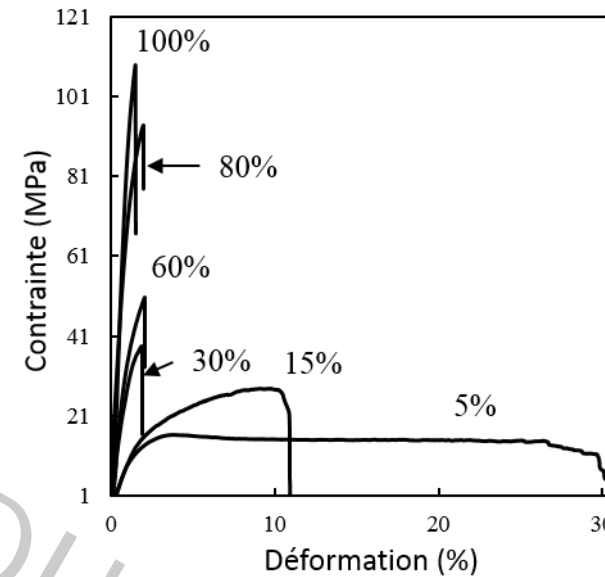
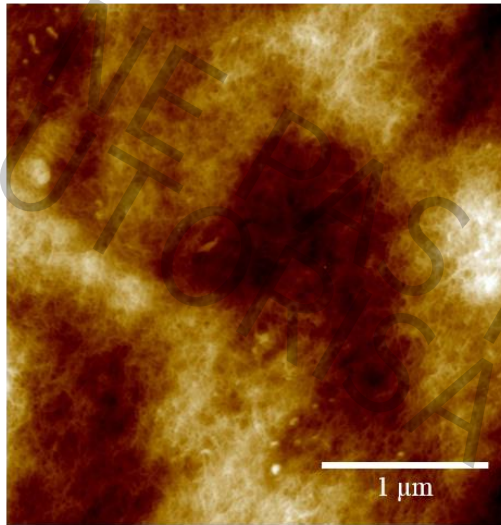
Hygroexpansion – carton plat



☹ Observations à l'échelle du réseau

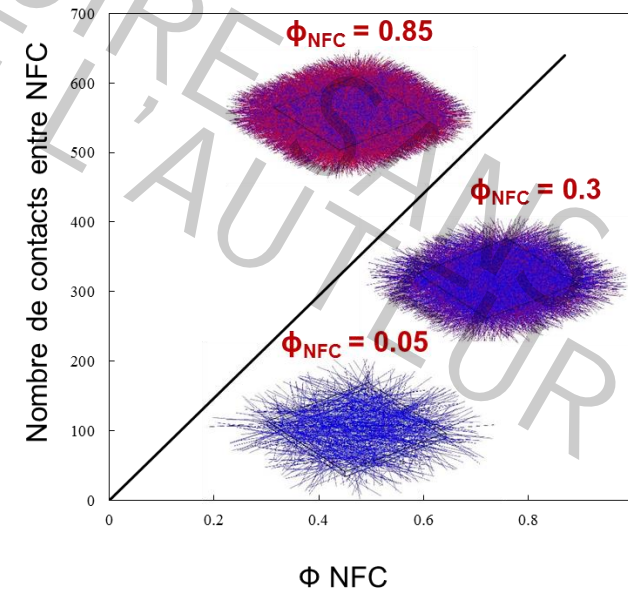
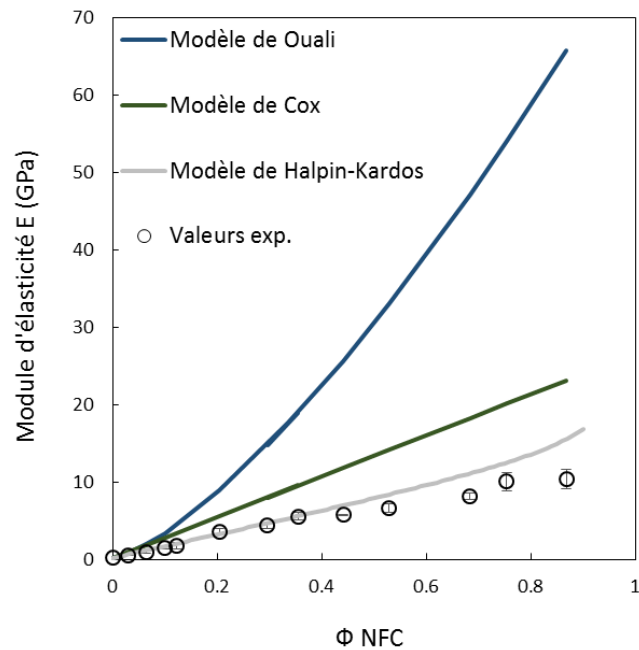
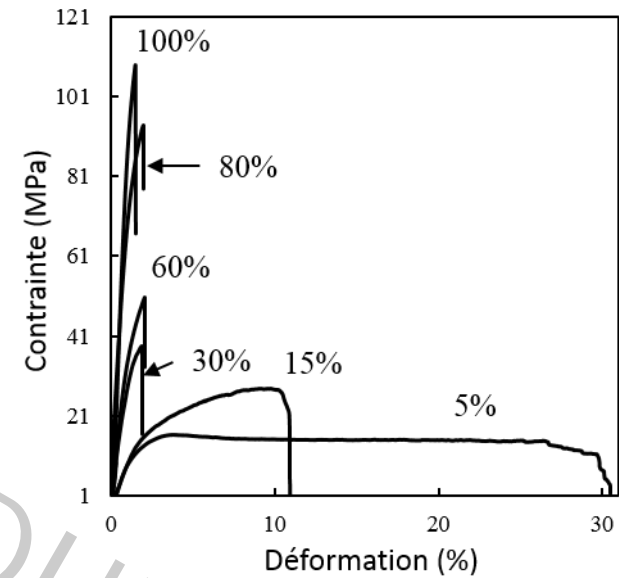
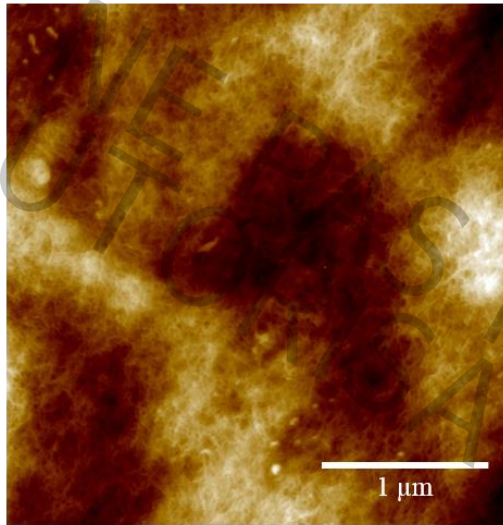
→ Manque d'observations expérimentales fines et directes au sein des microstructures fibreuses

Propriétés mécaniques – films composites de PEO - NFC



Hypothèses micromécaniques et microstructurales des modèles usuels inadaptées aux nanocomposites PEO – NFC

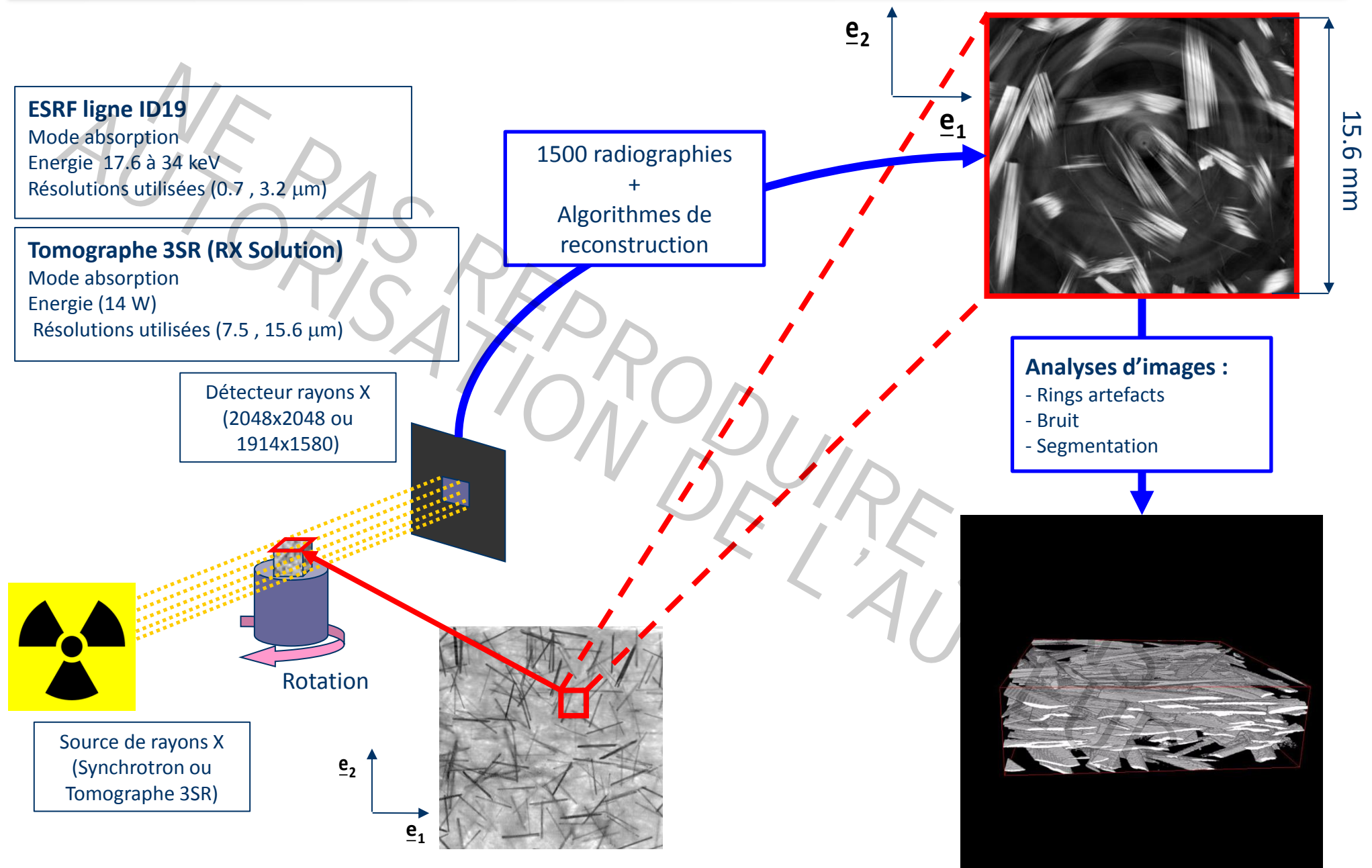
Propriétés mécaniques – films composites de PEO - NFC



UTILISATION D'IMAGES 3D POUR L'ANALYSE DES MICROSTRUCTURES :

EXEMPLE D'UN PAPIER MODELE

Microtomographie à rayons X



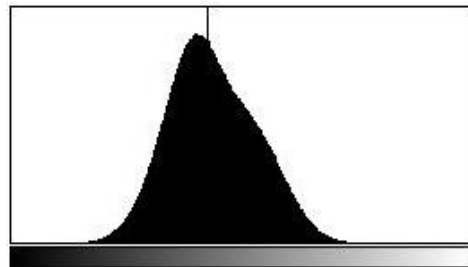
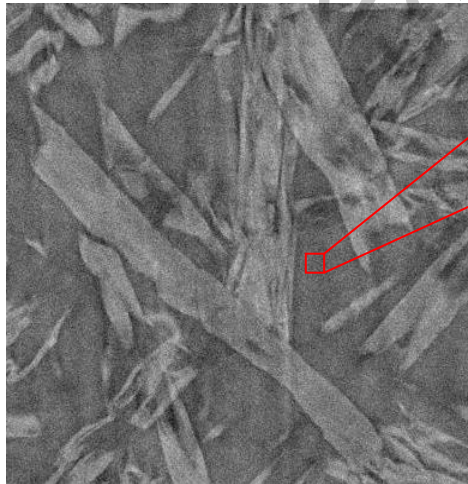
Microtomographie à rayons X

Débruitage et segmentation des images tridimensionnelles

Objectif : séparer les phases fibreuse et poreuse de niveaux de gris proches

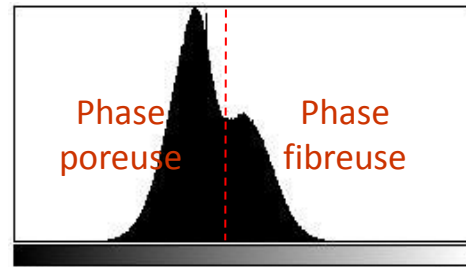
- Outils spécifiques de débruitage et de segmentation pour les papiers (Rolland du Roscoat, 2007)
- Méthodes d'imagerie et de reconstruction basées sur le contraste de phase (mode Paganin)

Coupe brute



Histogramme des niveaux de gris

Coupe débruitée

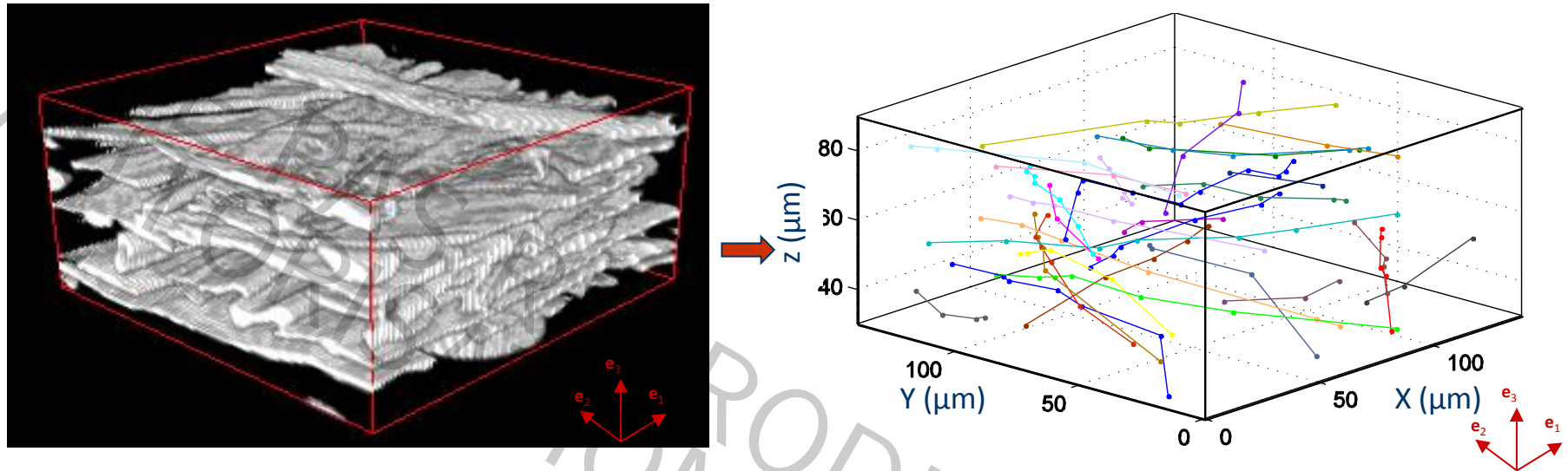


Coupe binarisée

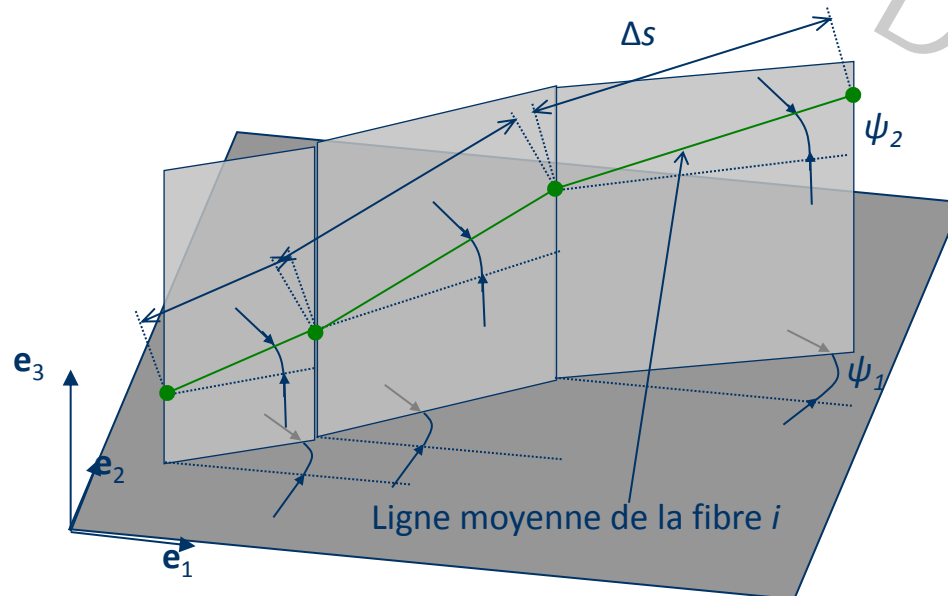


Descripteurs microstructuraux discrets à l'échelle des fibres et des liaisons

Ligne moyenne des fibres



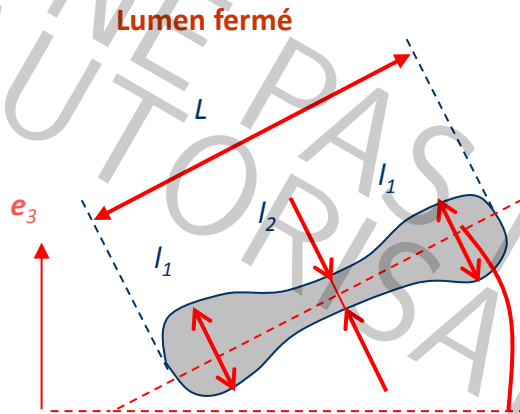
→ Les coordonnées des liaisons / contacts définissent la ligne moyenne



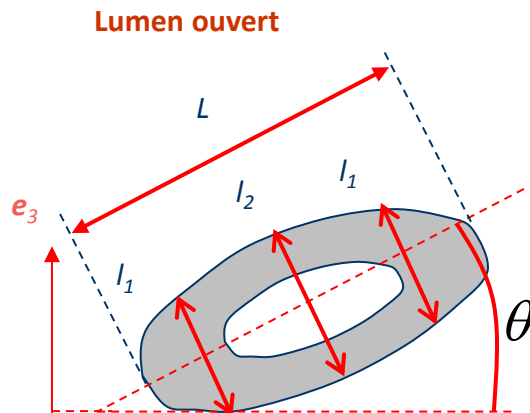
→ Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne : ψ_1 , ψ_2 et Δs

Descripteurs microstructuraux discrets à l'échelle des fibres et des liaisons

Dimensions caractéristiques des sections



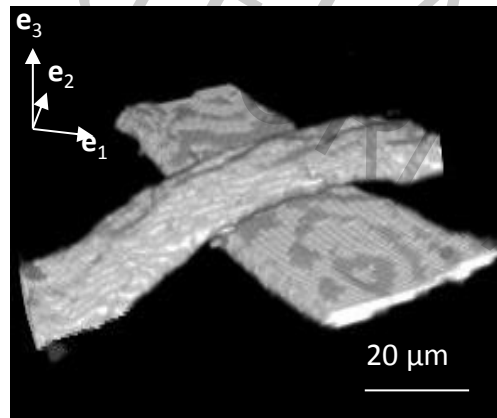
- L : Largeur des fibres
- l_1 : épaisseur des sections proche des extrémités
- l_2 : épaisseur des sections au milieu
- θ : angle entre l'axe principal des sections et le plan du papier



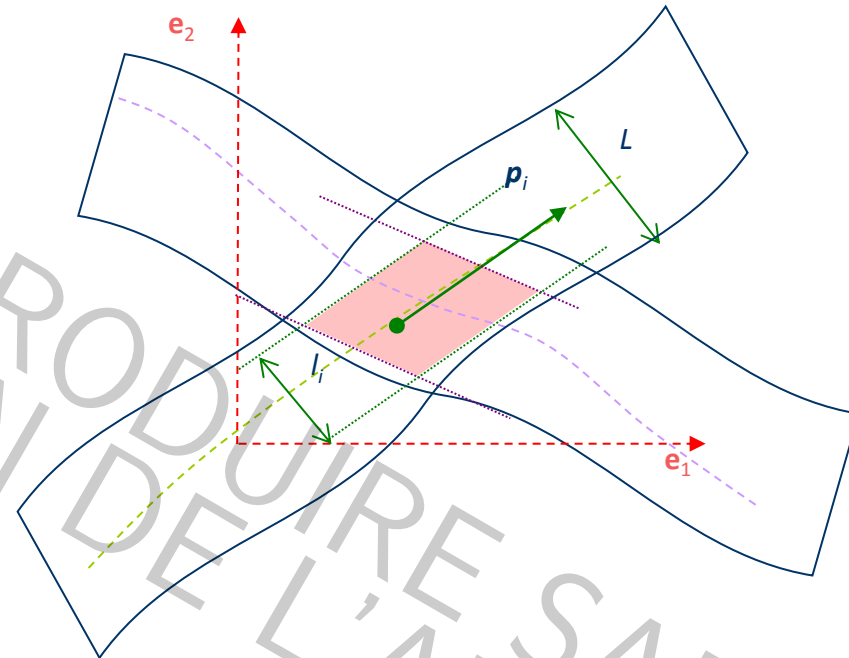
- 120 mesures pour obtenir des distributions stables
- Deux types de sections:
 - Lumen fermé : $l_2 < l_1$
 - Lumen ouvert : $l_1 < l_2$

Descripteurs microstructuraux discrets à l'échelle des fibres et des liaisons

Dimensions des liaisons entre fibres



Vue de dessus



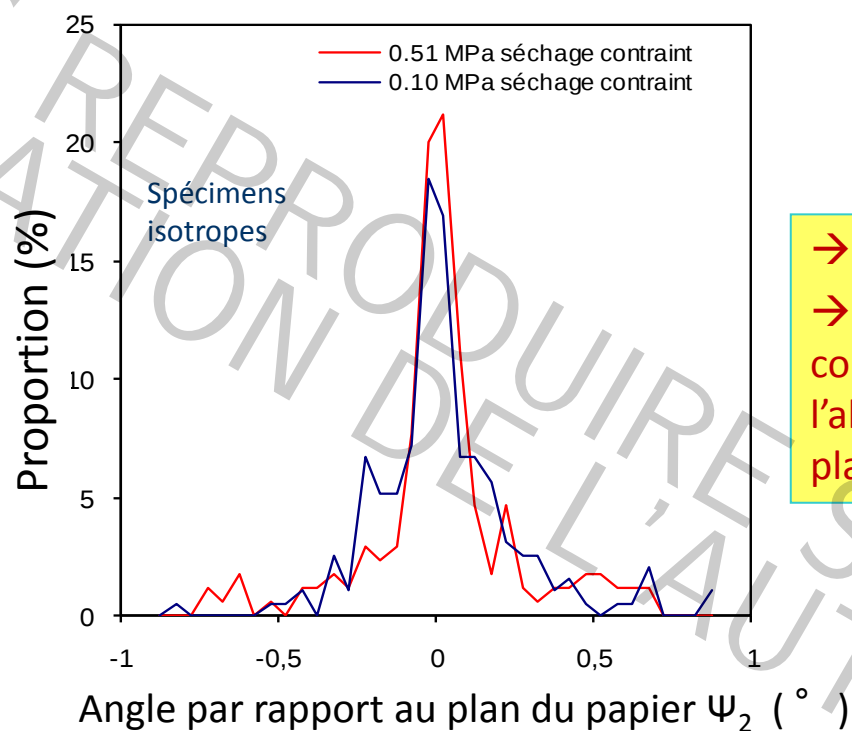
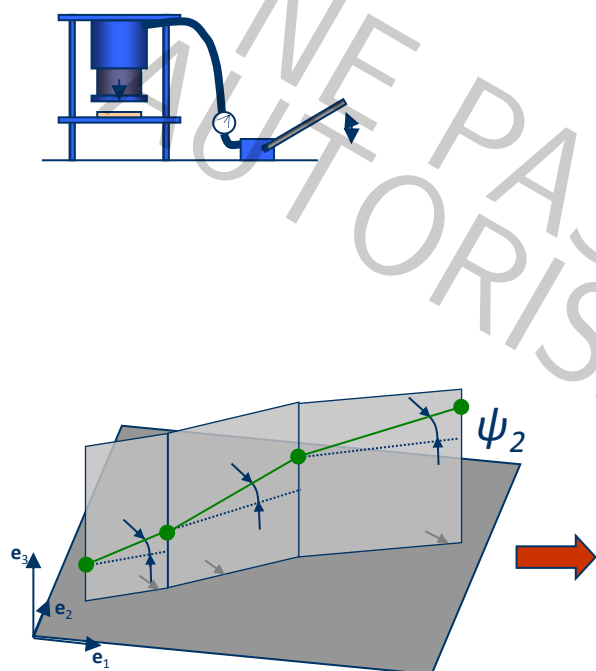
- Degré de liaison: rapport entre l_i et L

$$r_i = \frac{l_i}{L}$$

**APPORT DES IMAGES TRIDIMENSIONNELLES POUR L'ANALYSE DE L'INFLUENCE
DES OPERATIONS DE FABRICATION SUR LA MICROSTRUCTURE DES MILIEUX
FIBREUX**

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

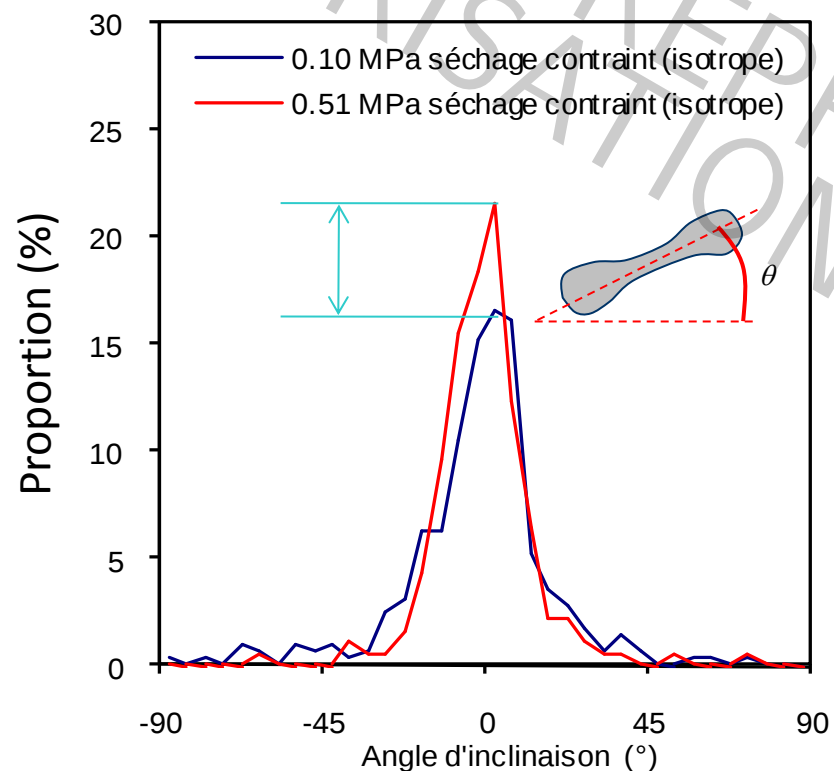
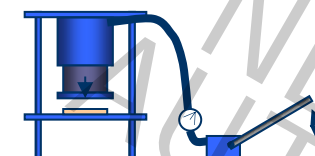
Ligne moyenne des fibres (spécimens isotropes)



→ Quasi 2D
→ l'augmentation de la contrainte de pressage accentue l'alignement des fibres dans le plan

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

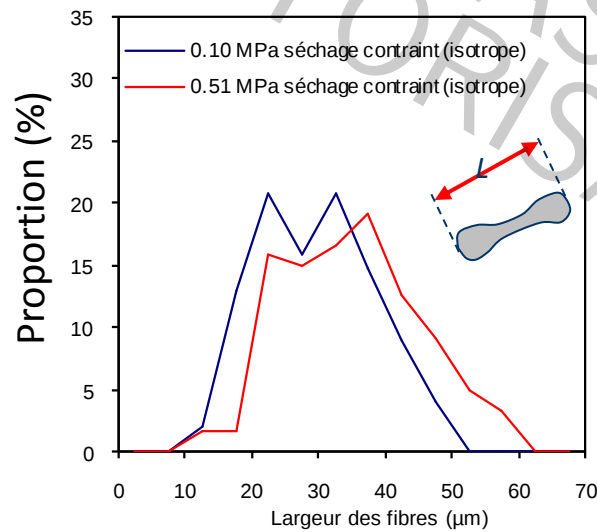
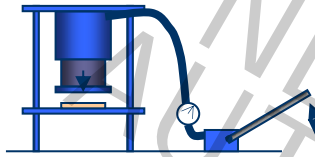
Orientation des sections droites des fibres (spécimens isotropes)



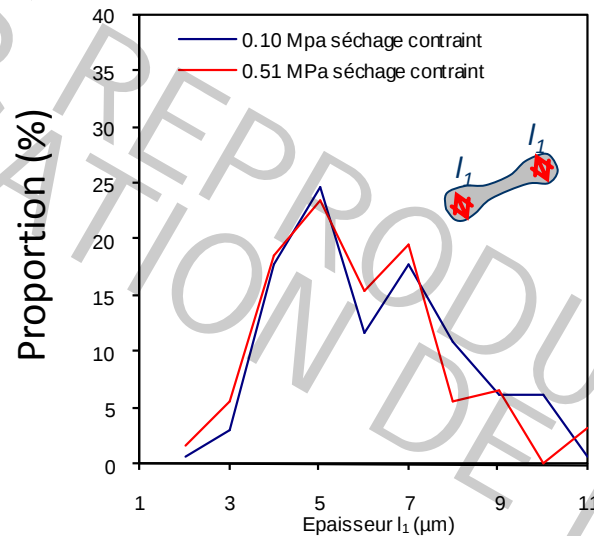
→ Majorité des axes principaux des sections dans le plan des papiers
→ Le fort pressage tend à amener l'axe principal des sections dans le plan des papiers

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

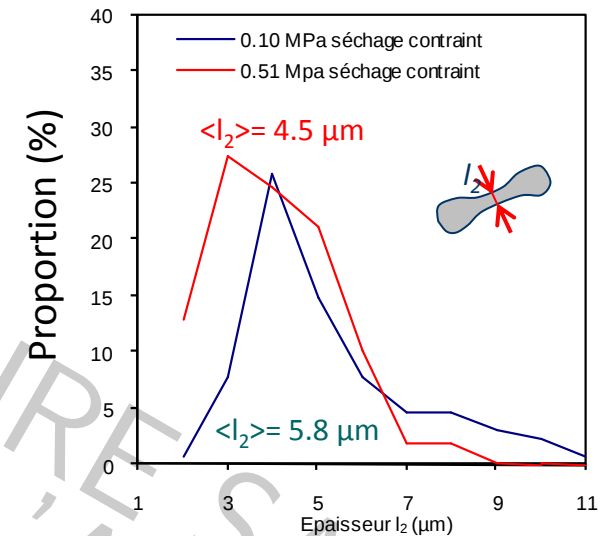
Déformation des sections droites des fibres (spécimens isotropes)



→ Augmentation de la largeur avec l'augmentation de la contrainte de pressage



→ Influence négligeable des conditions de pressage



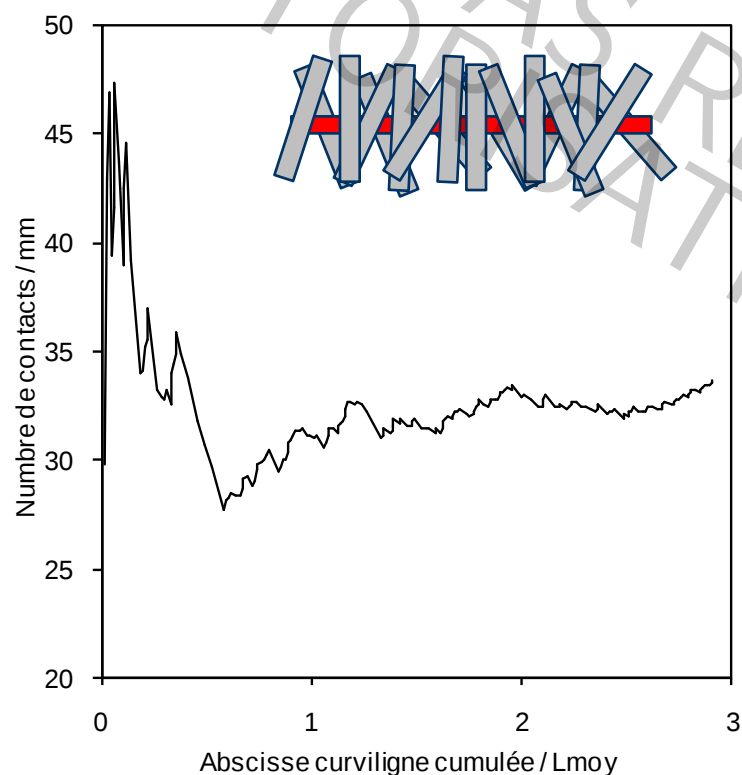
→ Le pressage tend à écraser les sections des fibres : disparition du lumen



Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

Nombre moyen de contacts par fibre



- Beaucoup de contacts par fibres !!!
- Distance entre contacts de l'ordre de $\langle L \rangle$!
- 1 longueur cumulée de segments de fibres = une longueur de fibres suffisante pour déterminer le nombre de contacts moyen

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

Comparaison à un modèle de prévision du nombre de contacts de type « tube model »

Hypothèses du modèle

- Fibres droites de longueur l
- Axe principal des sections contenu dans le plan
- Répartition homogène des fibres dans le plan
- Fibres à sections elliptiques (grand axe d_{max} ; petit axe d_{min})

Expression du nombre de contacts

$$\bar{z} = 4\alpha\Phi\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$$

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

Comparaison à un modèle de prévision du nombre de contacts de type « tube model »

Hypothèses du modèle

- Axe principal des sections contenu dans le plan
- Répartition homogène des fibres dans le plan
- Fibres droites de longueur l
- Fibres à sections elliptiques (grand axe $d_{\max}$; petit axe $d_{\min}$)

Expression du nombre de contacts

$$\bar{z} = 4\alpha\Phi\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{\max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$$

The diagram illustrates the components of the equation for the average number of contacts $\bar{z}$. Brackets and arrows connect the terms in the equation to their physical interpretations:

- 4α is linked to **Fraction volumique de fibres**.
- $\frac{2}{\pi}$ is linked to **Morphologie des fibres**.
- $\frac{l}{d_{\max}}$ is linked to **Morphologie des fibres**.
- ϕ_1 is linked to **Distribution de l'orientation des fibres**.
- ϕ_2 is linked to **Distribution de l'orientation des fibres**.
- $+1$ is linked to **Distribution de l'orientation des fibres**.

→ Tous ces paramètres sont connus expérimentalement !

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

Comparaison à un modèle de prévision du nombre de contacts de type « tube model »

Hypothèses du modèle

- Axe principal des sections contenu dans le plan
- Répartition homogène des fibres dans le plan
- Fibres droites de longueur l
- Fibres à sections elliptiques (grand axe d_{max} ; petit axe d_{min})

Expression du nombre de contacts

$$\bar{z} = 4\alpha\Phi\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$$

Diagram illustrating the components of the contact number expression:

- 4α : Fraction volumique de fibres
- Φ : Morphologie des fibres
- $\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$: Distribution de l'orientation des fibres

→ Tous ces paramètres sont connus expérimentalement !

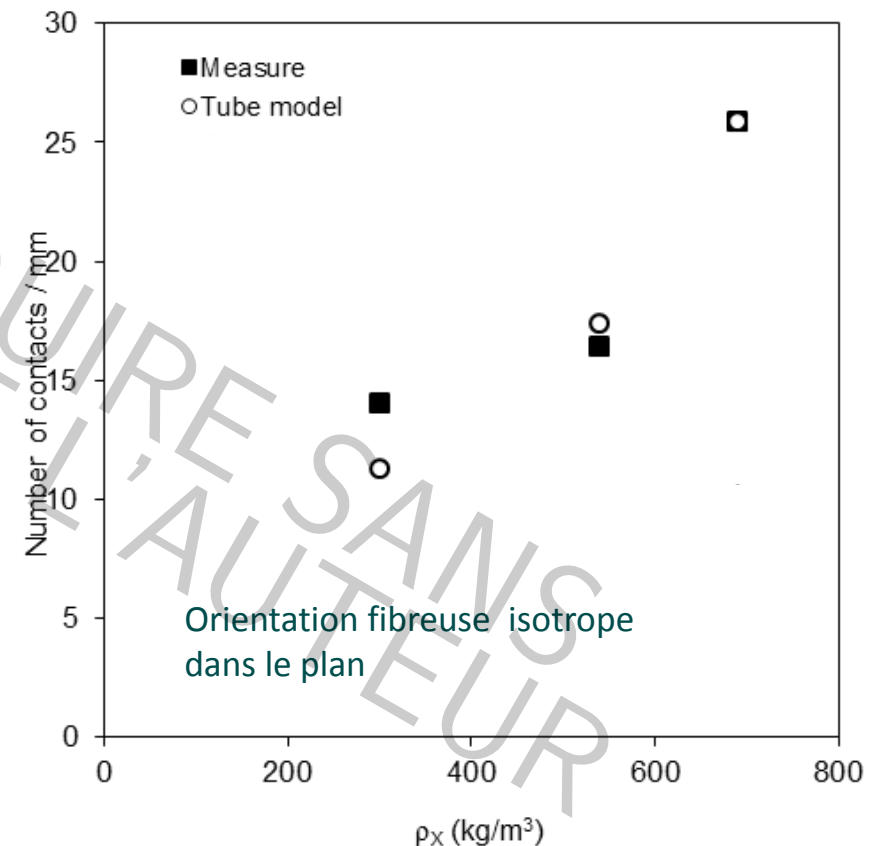


Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

Comparaison à un modèle de prévision du nombre de contacts de type « tube model »

Hypothèses du modèle

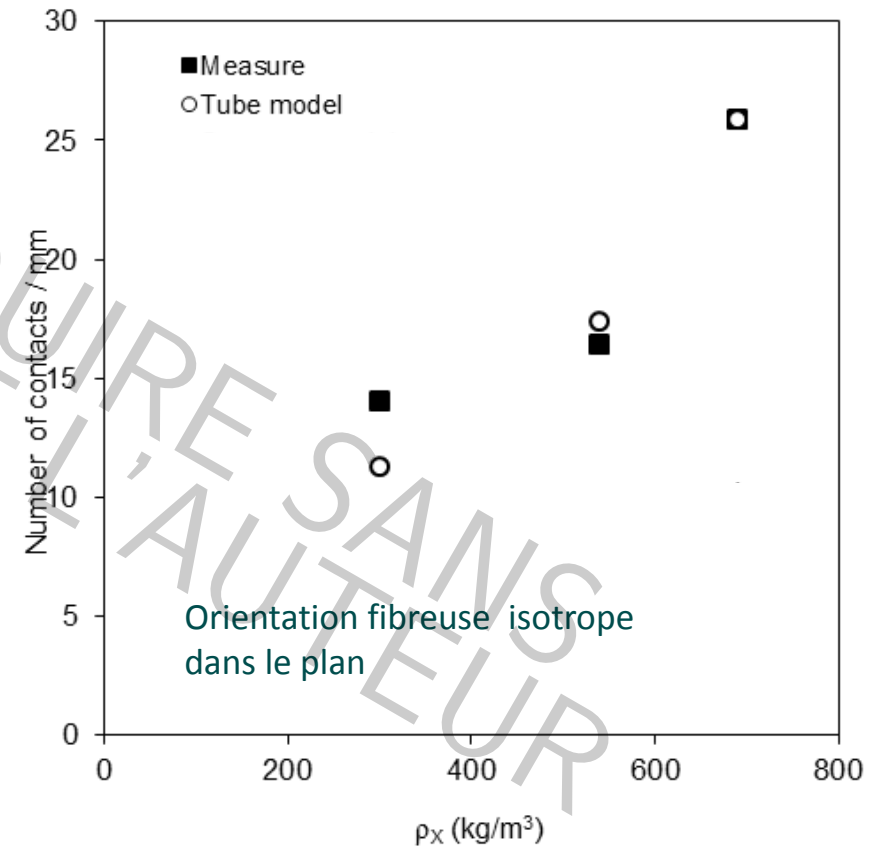
- Axe principal des sections contenu dans le plan
- Répartition homogène des fibres dans le plan
- Fibres droites de longueur l
- Fibres à sections elliptiques (grand axe d_{max} ; petit axe d_{min})

Expression du nombre de contacts

$$\bar{z} = 4\alpha\Phi\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$$

Diagram illustrating the components of the contact number expression:

- Fraction volumique de fibres (points to 4α)
- Morphologie des fibres (points to $\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}}$)
- Distribution de l'orientation des fibres (points to $\phi_1 + \phi_2 + 1$)



Fibres à orientation isotrope dans le plan : bonne prévision du « tube model »

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Liaisons / contacts fibre-fibre

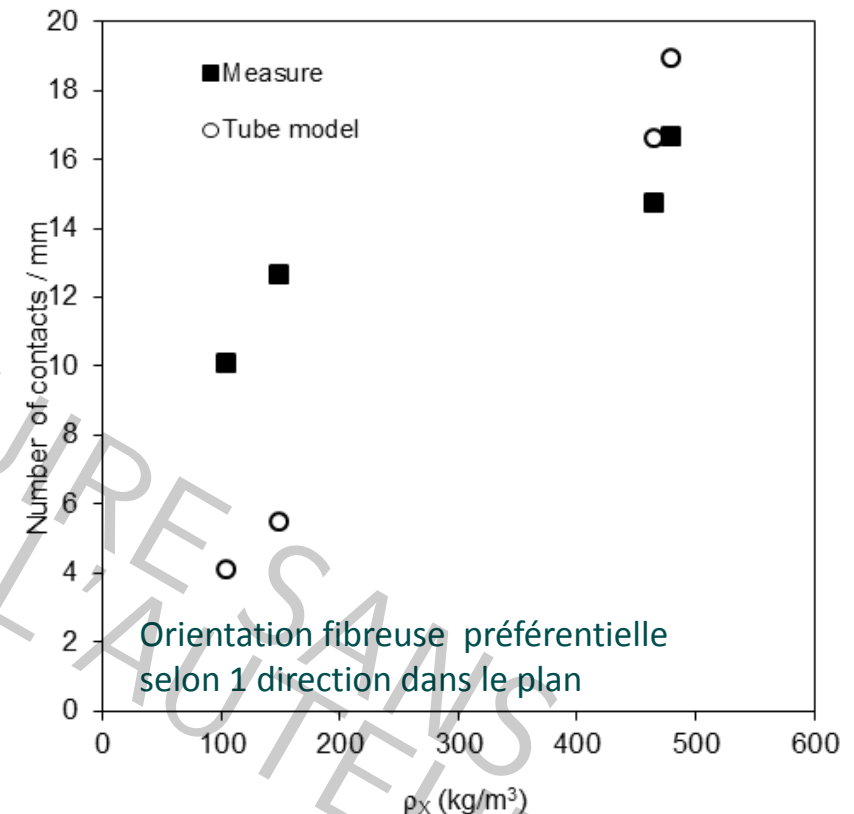
Comparaison à un modèle de prévision du nombre de contacts de type « tube model »

Hypothèses du modèle

- Axe principal des sections contenu dans le plan
- Répartition homogène des fibres dans le plan
- Fibres droites de longueur l
- Fibres à sections elliptiques (grand axe d_{max} ; petit axe d_{min})

Expression du nombre de contacts

$$\bar{z} = 4\alpha\Phi\left(\frac{2}{\pi} \frac{l}{d_{max}} \phi_1 + \phi_2 + 1\right)$$



Cas isotrope

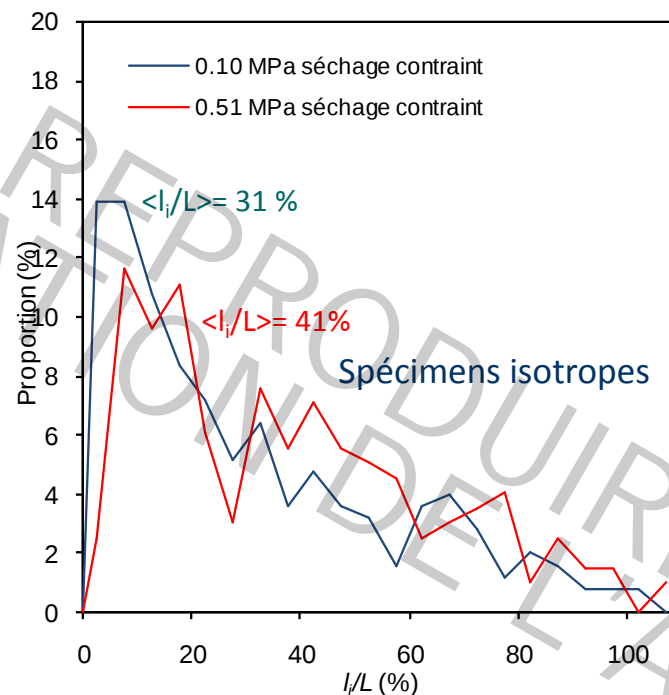
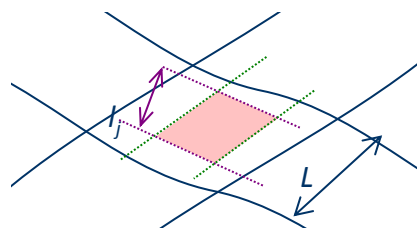
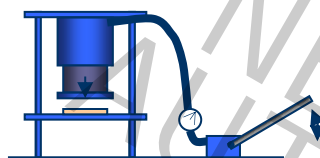
→ Bonne prévision du « tube model »

Cas orienté

→ Prévisions sous estimées pour les faibles masses volumiques → cause possible : fibres plus ou moins vrillées

Illustration : influence des opérations unitaires de fabrication

Degré de liaison (spécimens isotropes)

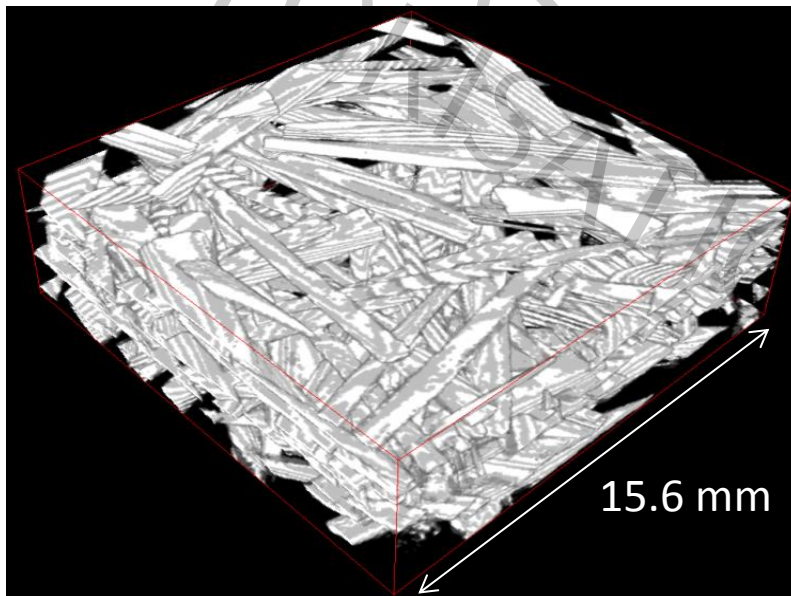


- La majorité des liaisons sont partielles : entre 30 et 40%
- Le fort pressage augmente le degré de liaison

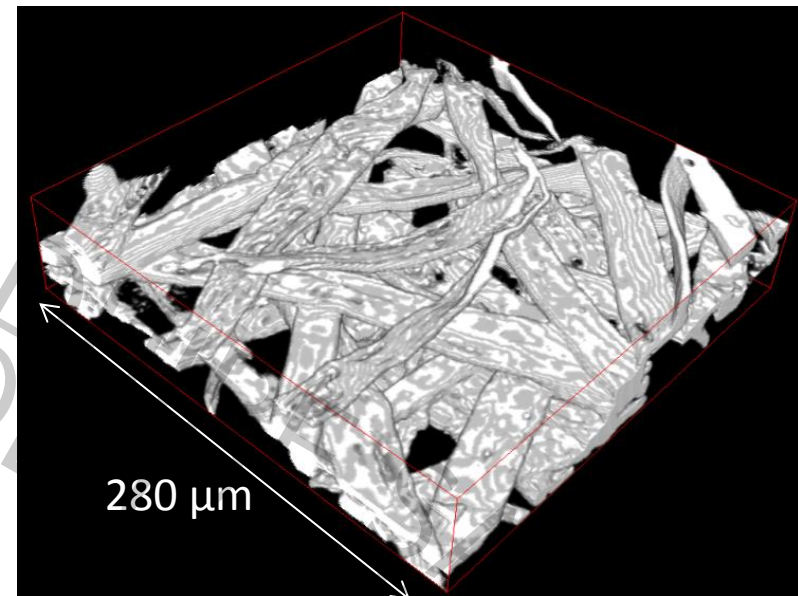
**VERS L'AUTOMATISATION DES TECHNIQUES D'ANALYSE D'IMAGES POUR
L'INDIVIDUALISATION DES FIBRES ET DES CONTACTS**

Analyse automatique des images 3D

→ Identifier automatiquement les fibres et les contacts dans les images tridimensionnelles



Mèches de fibres de verre (tomographe de laboratoire (3SR), 1 voxel = $30 \times 30 \times 30 \mu\text{m}^3$)

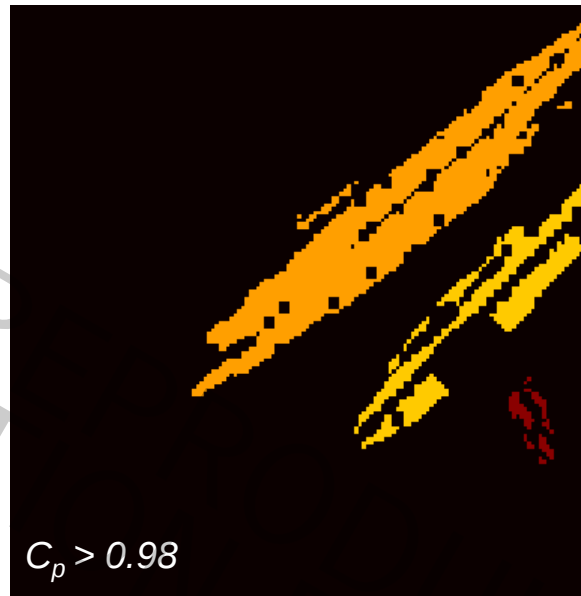


Papier modèle de faible grammage (ESRF, ligne ID 19), 1 voxel = $0.7 \times 0.7 \times 0.7 \mu\text{m}^3$)

→ Pas de méthode efficace pour identifier les fibres et les contacts

Analyse automatique des images 3D

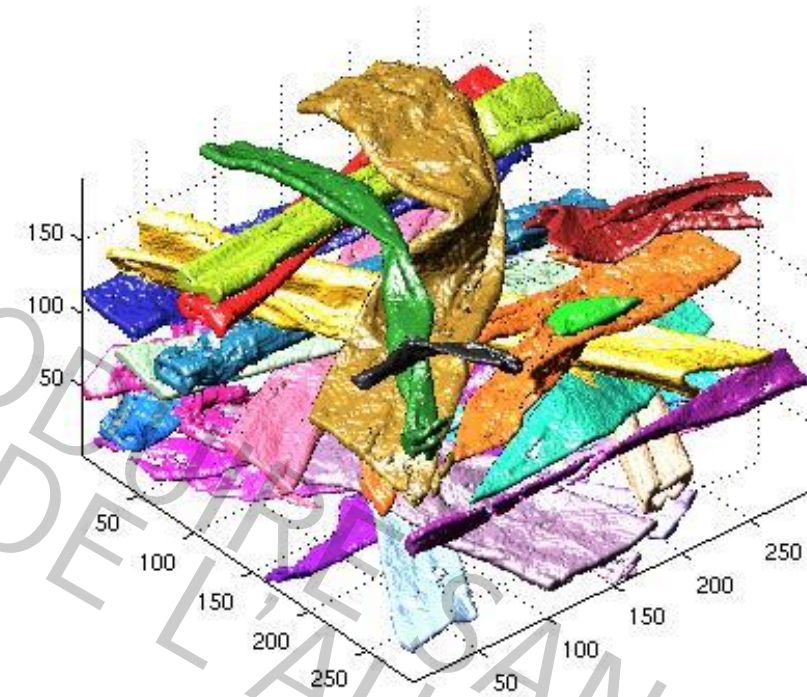
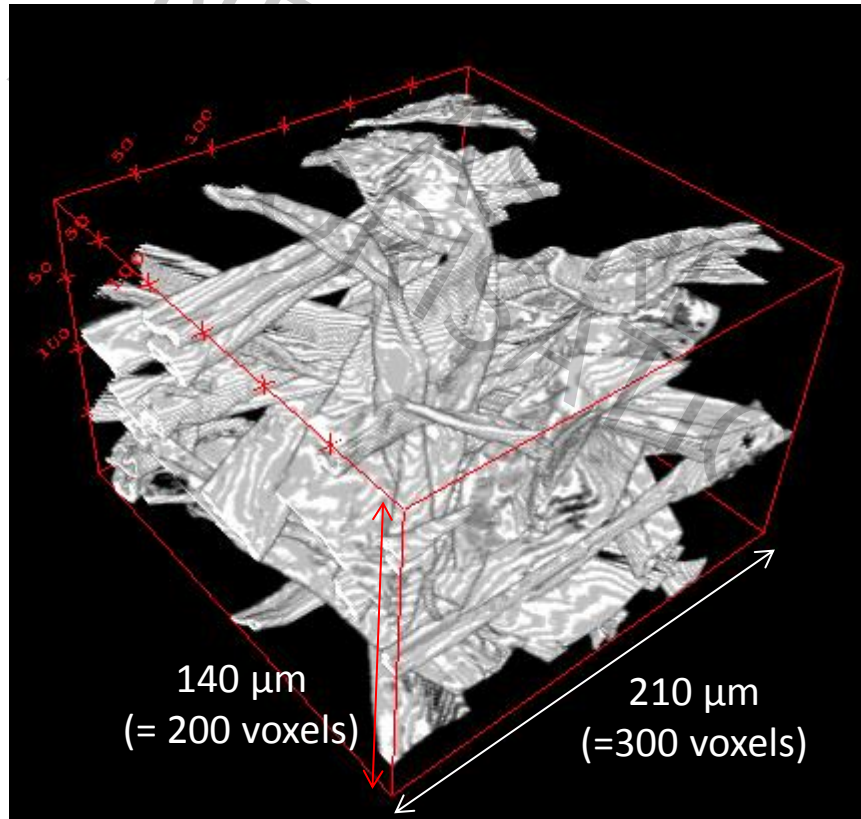
Méthode d'identification



Altendorf & Jeulin, 2009
Vigüé et al., 2013

Analyse automatique des images 3D

Papier modèle (faible pressage)

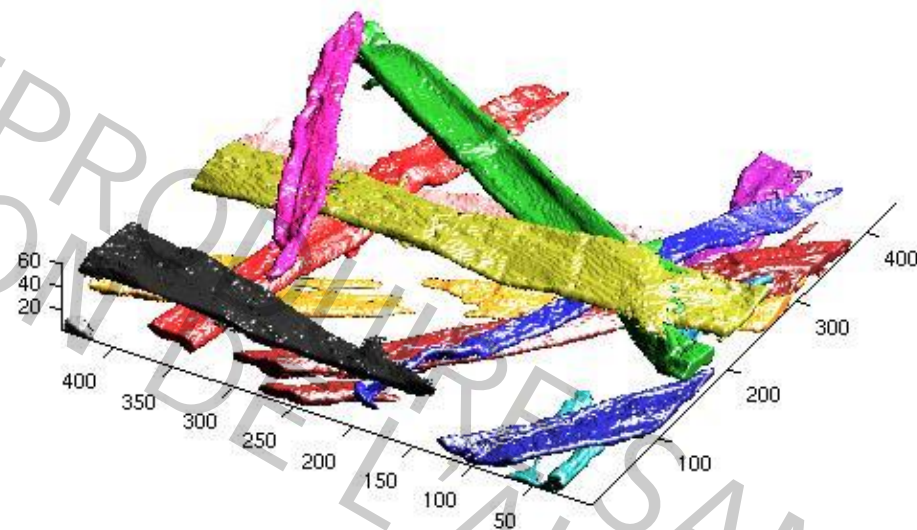
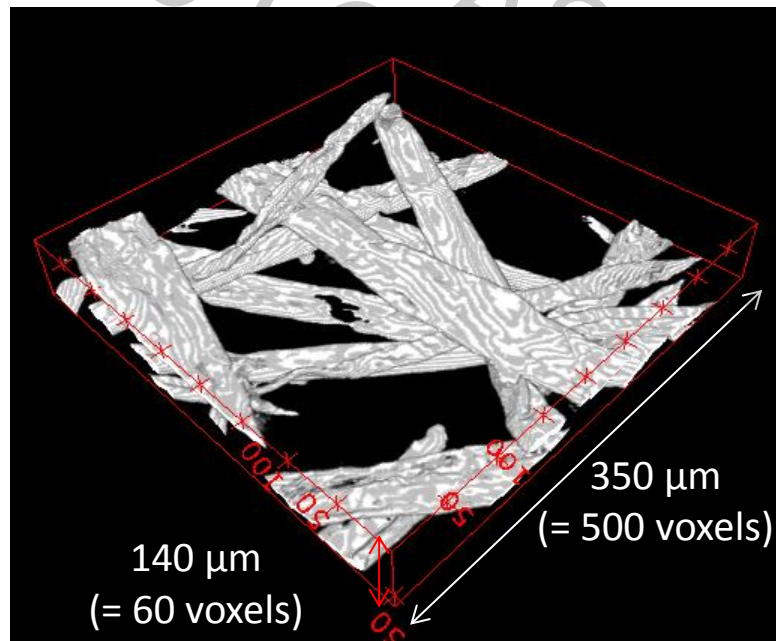


Identification des **fibres tortueuses à sections droites complexes**

→ **30 fibres and 32 contacts fibre-fibre** identifiés

Analyse automatique des images 3D

Résultats – papier modèle (pressage standard)

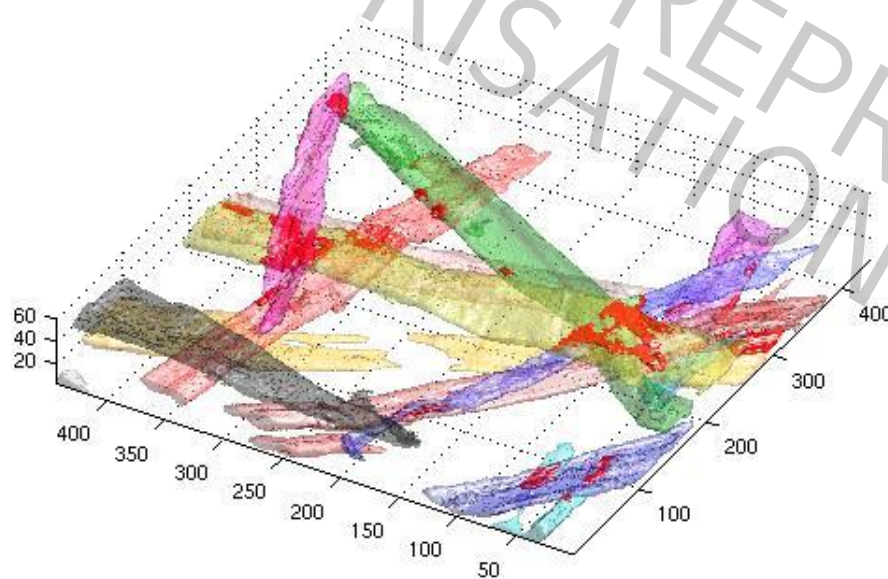


→ 15 fibres et 18 contacts fibre-fibre

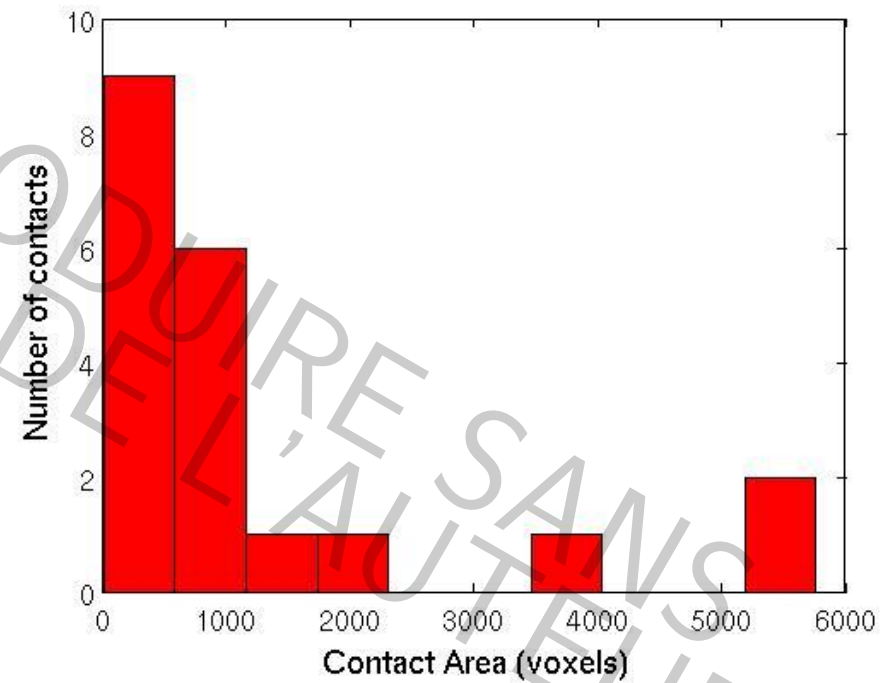
Analyse automatique des images 3D

Résultats – papier modèle (pressage standard)

Distribution des aires des contacts



Ex. : image complète avec les les zones de contact représentées en rouge



→ Grandes surfaces de contact (effet du pressage)

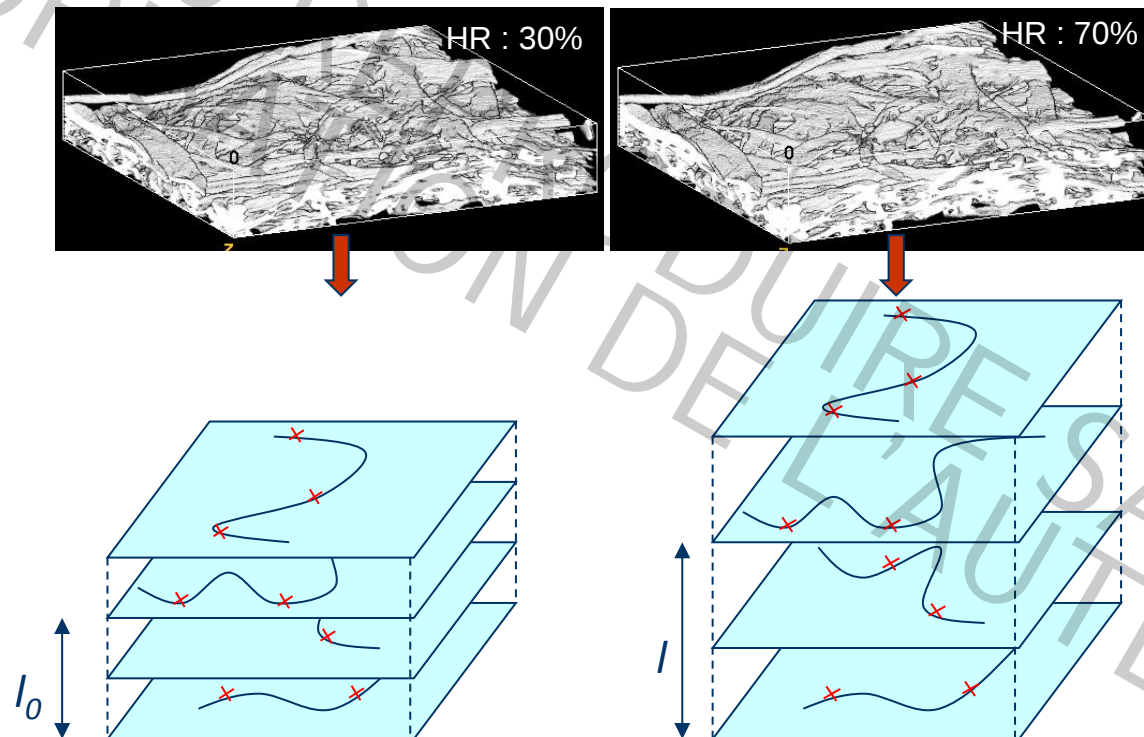
**UTILISATION D'IMAGES 3D POUR L'ANALYSE DES MICROMECHANISMES DE
DEFORMATION : EXEMPLE DE L'HYGROEXPANSION**

Hygroexpansion

Hygroexpansion selon l'épaisseur

Suivi manuel de points matériels de fibres soumis à différentes humidités relatives

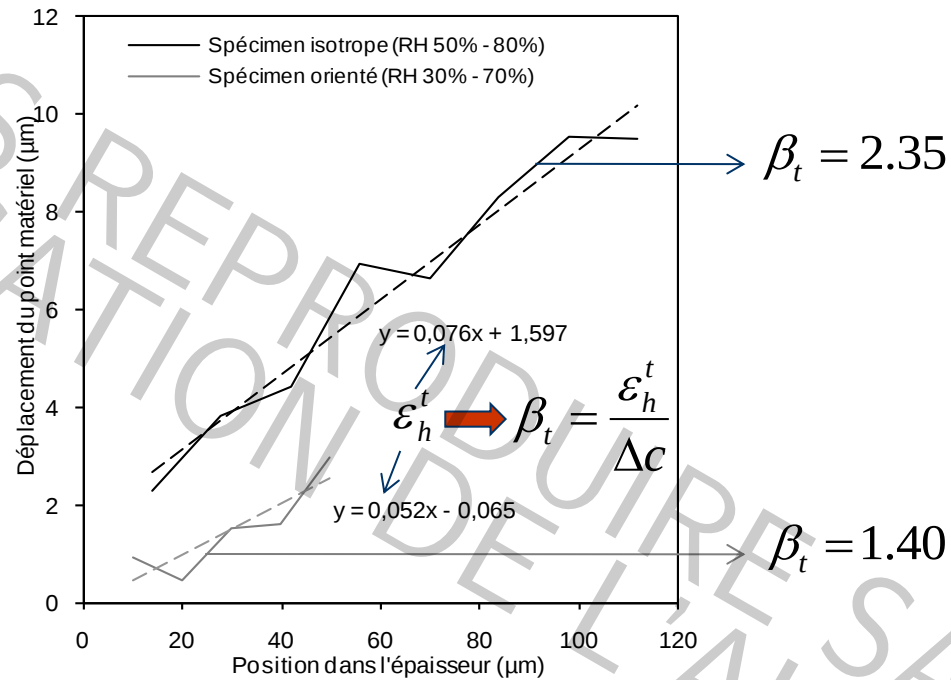
→ HR = 30 → 70 %, HR = 50 → 80 %



→ Estimation des déformations dans l'épaisseur

Hygroexpansion

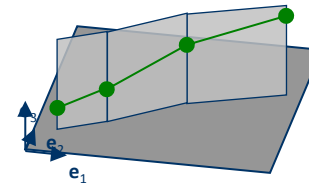
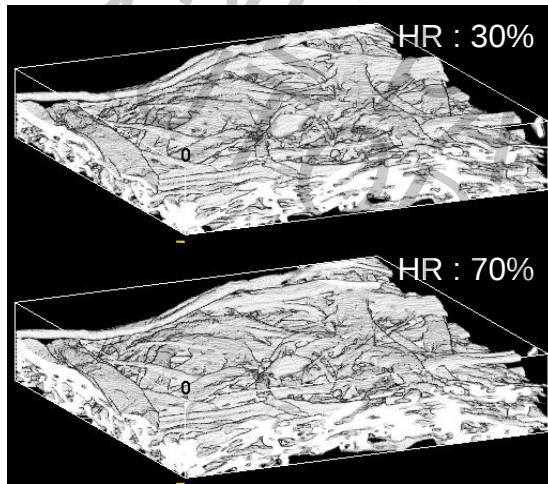
Hygroexpansion selon l'épaisseur



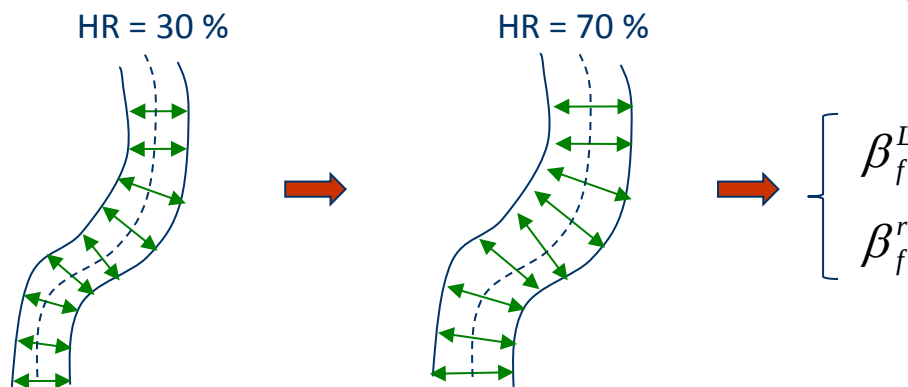
- β_t au moins 10 fois plus grand que β_L
- Forte hygroexpansion dans l'épaisseur de l'échantillon

Hygroexpansion

Hygroexpansion à l'échelle des fibres



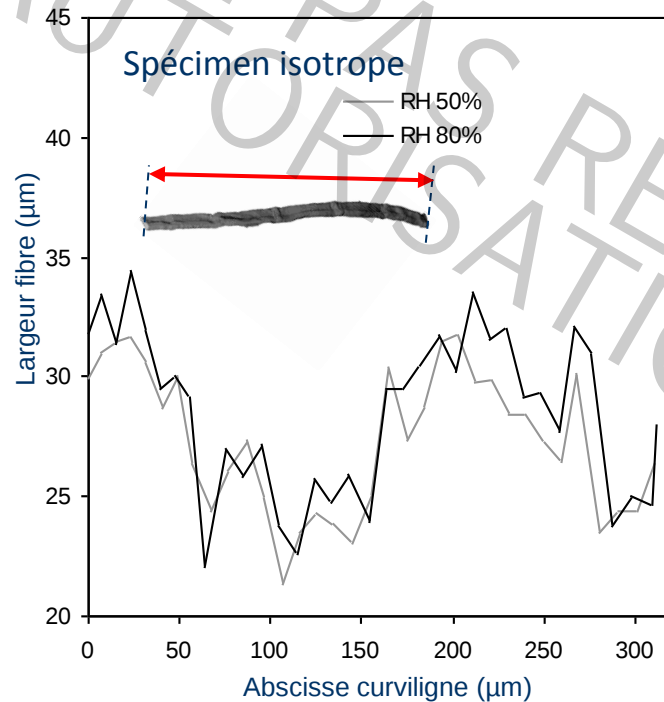
→ Construction des fonctions de distribution des largeurs de fibre



→ Suivi de la largeur de fibres isolées dans le réseau 3D
→ Estimation des coefficients d'hygroexpansion transverse et longitudinal de la fibre dans le réseau fibreux

Hygroexpansion

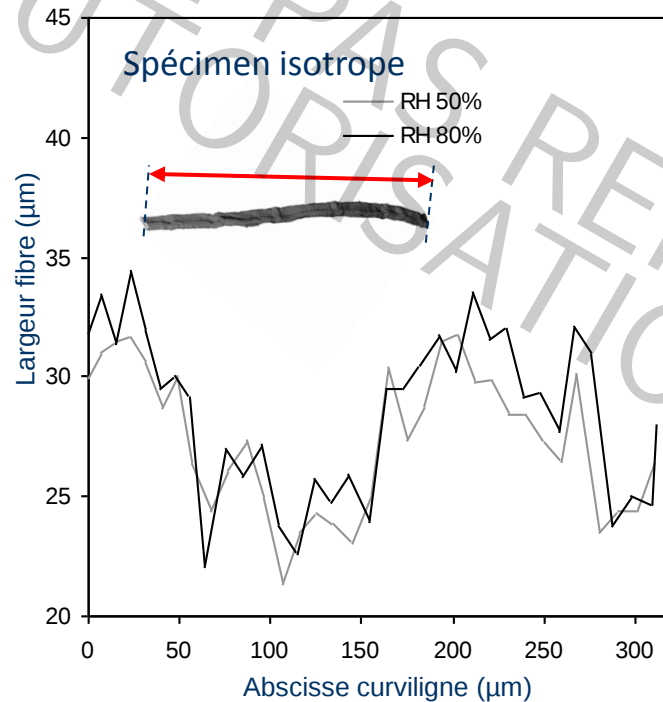
Fibres isolées dans le réseau



- Augmentation de $\langle L \rangle$ avec HR ↗
- Faibles variations de la longueur de la ligne moyenne → β_L^f très faible : entre 0.01 et 0.1

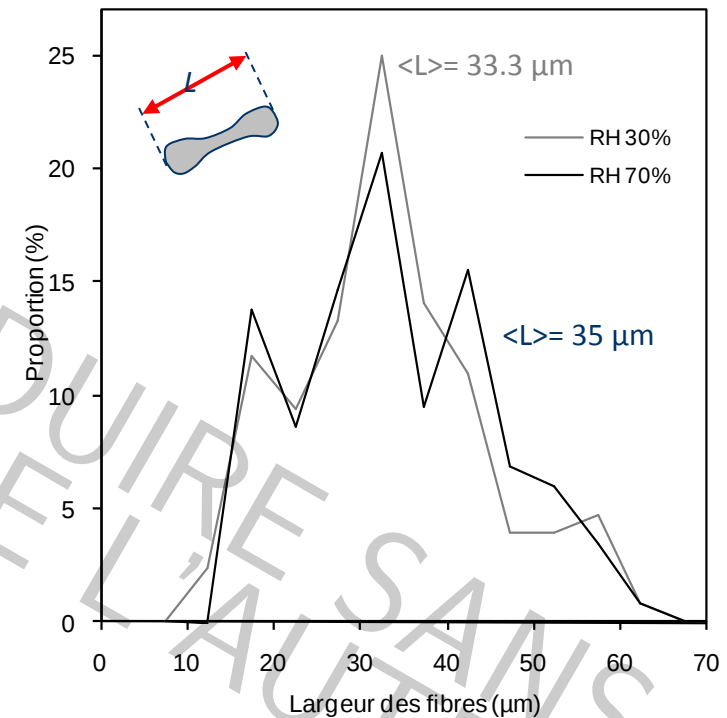
Hygroexpansion

Fibres isolées dans le réseau



- Augmentation de $\langle L \rangle$ avec HR ↗
- Faibles variations de la géométrie de la ligne moyenne → β_L^f très faible : entre 0.01 et 0.1

Distribution de propriétés dans le réseau



- Variation de $\langle L \rangle$ de l'ordre de $1 \mu\text{m}$ pour un saut de 30 – 40 % de HR
- β_r^f varie entre 0.8 et 1.8

Hygroexpansion

→ Comment se transmet l'hygroexpansion des fibres par l'intermédiaire des liaisons au réseau ?

Modèle de Uesaka → Lie l'hygroexpansion micro des fibres à l'hygroexpansion macro des papiers

Sens marche : $\beta_{MD} = \beta_f^L + b_1(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Sens travers : $\beta_{CD} = \beta_f^L + b_2(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Epaisseur : $\beta_t = \beta_f^r - b_3(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Hygroexpansion

→ Comment se transmet l'hygroexpansion des fibres par l'intermédiaire des liaisons au réseau ?

Modèle de Uesaka → Lie l'hygroexpansion micro des fibres à l'hygroexpansion macro des papiers

Sens marche : $\beta_{MD} = \beta_f^L + b_1(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Sens travers : $\beta_{CD} = \beta_f^L + b_2(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Epaisseur : $\beta_t = \beta_f^r - b_3(\beta_f^r - \beta_f^L)$

↓
Echelle macro

Hygroexpansion

→ Comment se transmet l'hygroexpansion des fibres par l'intermédiaire des liaisons au réseau ?

Modèle de Uesaka → Lie l'hygroexpansion micro des fibres à l'hygroexpansion macro des papiers

Sens marche : $\beta_{MD} = \beta_f^L + b_1(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Sens travers : $\beta_{CD} = \beta_f^L + b_2(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Epaisseur : $\beta_t = \beta_f^r - b_3(\beta_f^r - \beta_f^L)$

Echelle micro

Hygroexpansion

→ Comment se transmet l'hygroexpansion des fibres par l'intermédiaire des liaisons au réseau ?

Modèle de Uesaka → Lie l'hygroexpansion micro des fibres à l'hygroexpansion macro des papiers

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sens marche : } \beta_{MD} = \beta_f^L + b_1(\beta_f^r - \beta_f^L) \\ \text{Sens travers : } \beta_{CD} = \beta_f^L - b_2(\beta_f^r - \beta_f^L) \\ \text{Epaisseur : } \beta_t = \beta_f^r - b_3(\beta_f^r - \beta_f^L) \end{array} \right\} \Rightarrow b_1, b_2 \text{ et } b_3 \text{ décrivent la capacité des liaisons à transmettre l'hygroexpansion de la fibre au réseau}$$

Hygroexpansion

→ Comment se transmet l'hygroexpansion des fibres par l'intermédiaire des liaisons au réseau ?

Modèle de Uesaka → Lie l'hygroexpansion micro des fibres à l'hygroexpansion macro des papiers

$$\left. \begin{array}{l} \text{Sens marche : } \beta_{MD} = \beta_f^L + b_1(\beta_f^r - \beta_f^L) \\ \text{Sens travers : } \beta_{CD} = \beta_f^L + b_2(\beta_f^r - \beta_f^L) \\ \text{Epaisseur : } \beta_t = \beta_f^r - b_3(\beta_f^r - \beta_f^L) \end{array} \right\} \Rightarrow b_1, b_2 \text{ et } b_3 \text{ décrivent la capacité des liaisons à transmettre l'hygroexpansion de la fibre au réseau}$$

- Dans le plan des papiers

$b_1 \approx 0$ et $b_2 \approx 0,008 \rightarrow$ Valeurs très faibles

→ L'hygroexpansion dans le plan est dominée par l'hygroexpansion longitudinale des fibres !

- Dans l'épaisseur des papiers

$b_3 \approx -0,08 \rightarrow$ négatif car $\beta_t > \beta_f^r$

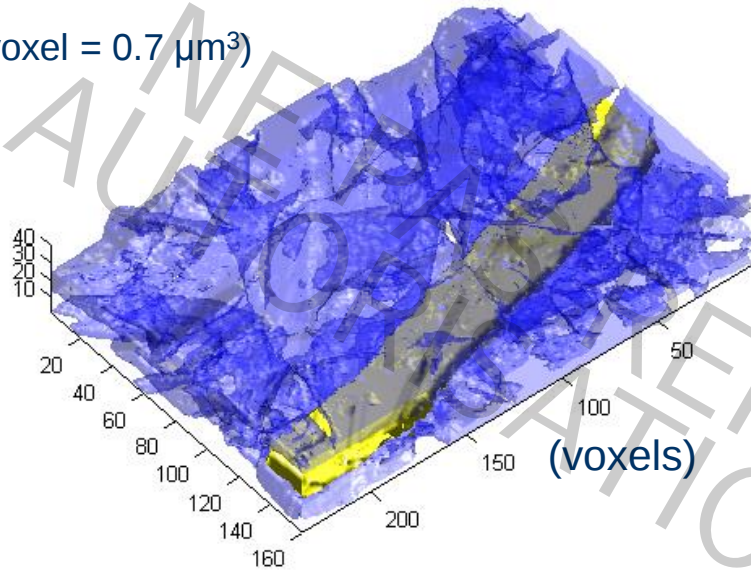
→ L'hygroexpansion dans l'épaisseur n'est pas uniquement due à β_f^r

→ Probablement combiné à des déformations hors plan des fibres

Hygroexpansion

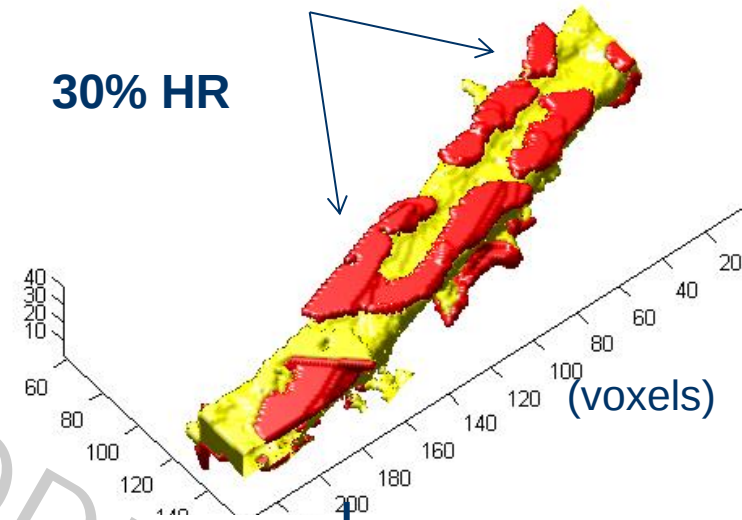
Analyse automatique d'images 3D

(1 voxel = $0.7 \mu\text{m}^3$)



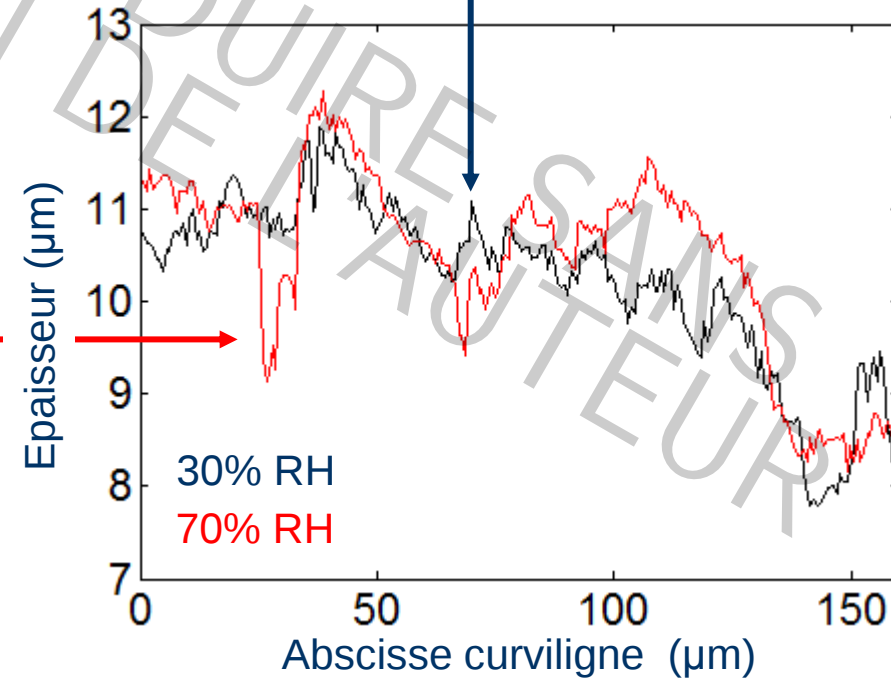
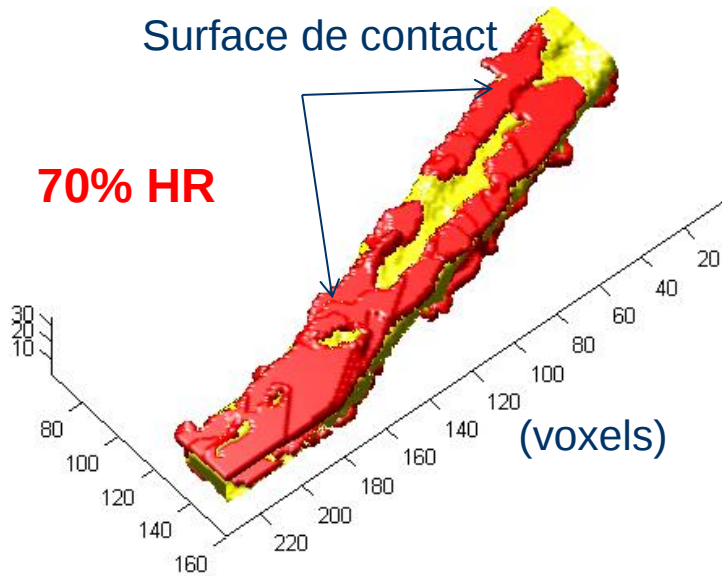
Surfaces de contact

30% HR



Surface de contact

70% HR



**UTILISATION D'IMAGES POUR LA MODELISATION DU COMPORTEMENT
MECANIQUE DES MILIEUX FIBREUX PAR
HOMOGENEISATION DES (MICRO)STRUCTURES DISCRETES**

Modélisation des propriétés élastiques des milieux fibreux

Description microscopique - Hypothèses

- Réseau de fibres de papier : réseau discret

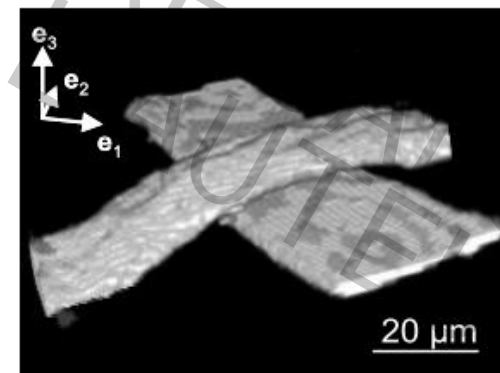
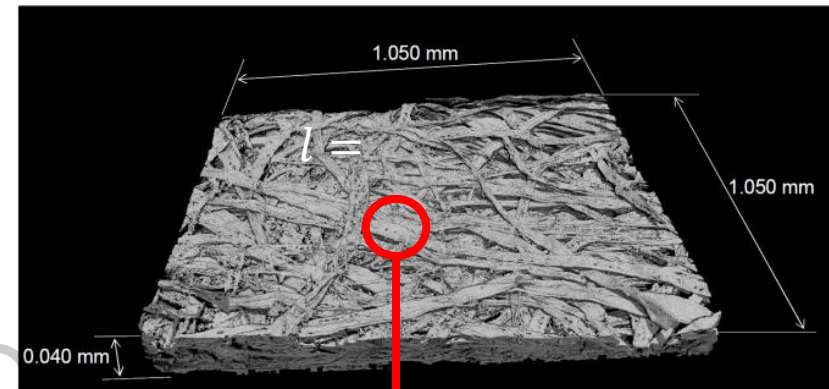
- Dimensions typiques $l \ll L$
 - Paramètre de séparation des échelles

$$\varepsilon = \frac{l}{L} \ll 1$$

- Réseaux 3D de fibres à orientation plane 2D

- **Fibres** = barres rigides

- **Liaisons** = zones déformables élastiques



Modélisation des propriétés élastiques des milieux fibreux

Description microscopique – Hypothèses

- Réseau de fibres de papier : réseau discret

- **Liaisons** = zones déformables élastiques

- Force de réaction

$$\vec{f}_b = k \frac{\bar{b}^2 d_{\max}^2}{|\sin \theta_b|} \Delta \vec{u}_b$$

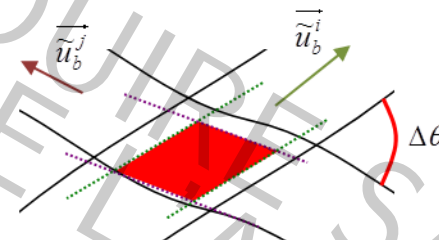
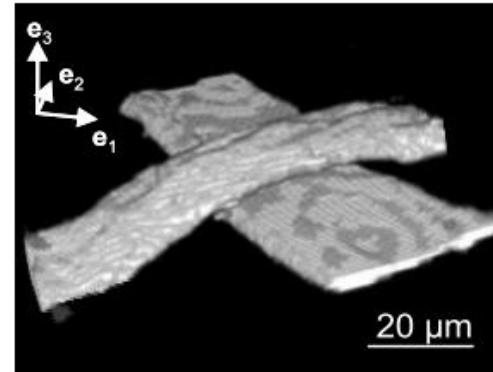
- Moment de réaction

$$M_b = k \frac{\pi \bar{b}^2 d_{\max}^4}{4 |\sin \theta_b|^2} \Delta \theta_b$$

- Equations d'équilibre adimensionnelles d'une fibre b

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{b \in \mathcal{B}_i} \vec{f}_b^* = \vec{0} \\ \mathcal{M} \sum_{b \in \mathcal{B}_i} M_b^* \vec{e}_3 = \sum_{b \in \mathcal{B}_i} s_i^b \vec{f}_b^* \times \vec{p}_i \end{array} \right. \quad \text{avec}$$

$$\mathcal{M} = \frac{\pi d_{\max}^2 \Delta \theta_c}{4 |\sin \theta_c|^2 l \Delta \vec{u}_c}$$



Modélisation des propriétés élastiques des milieux fibreux

Tenseur des contraintes macroscopique équivalent - cas $\mathcal{M} = O(\varepsilon^2)$

$$\tilde{\sigma} = \boxed{k} \frac{n\bar{z}}{2} \bar{b}^2 d_{\max}^2 \frac{1}{B} \sum_{b \in \mathcal{B}} \frac{1}{|\sin \theta_b|} \boxed{\vec{G}_i \vec{G}_j} \otimes \boxed{\Delta \tilde{u}_b^{(1)}} \longrightarrow \Delta \tilde{u}_b^{(1)} = f \left(\boxed{\delta \tilde{u}_i^{(1)}; \delta \theta_i^{(0)}} \right)$$

Déplacement relatifs à l'ordre 1

Champs inconnus

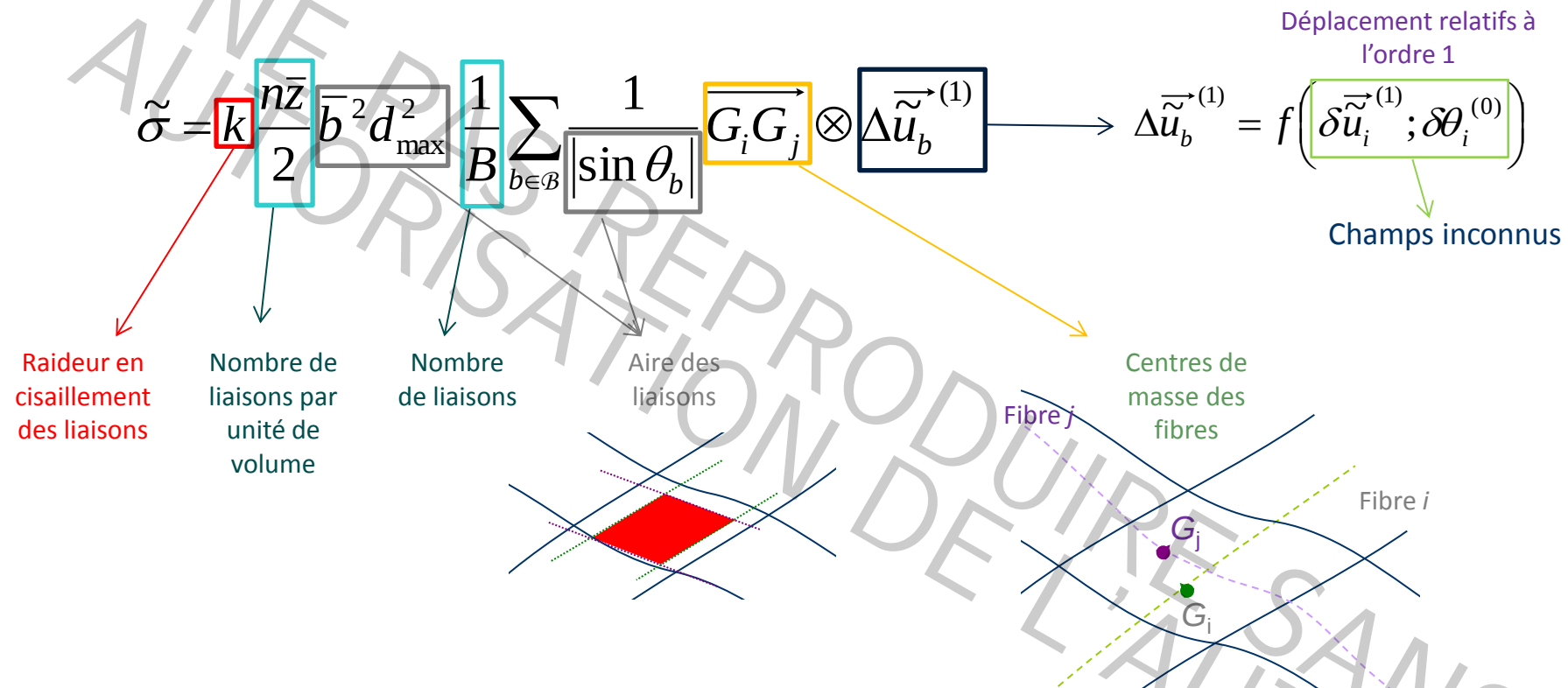
Raideur en cisaillement des liaisons

Centres de masse des fibres

- Champs inconnus, solutions de l'auto-équilibre du VER
- Rôle explicite de la microstructure sur les propriétés macroscopiques
- Accès au tenseur de rigidité élastique $\tilde{\sigma} = \tilde{\mathbb{C}} : \tilde{\varepsilon}$

Modélisation des propriétés élastiques des milieux fibreux

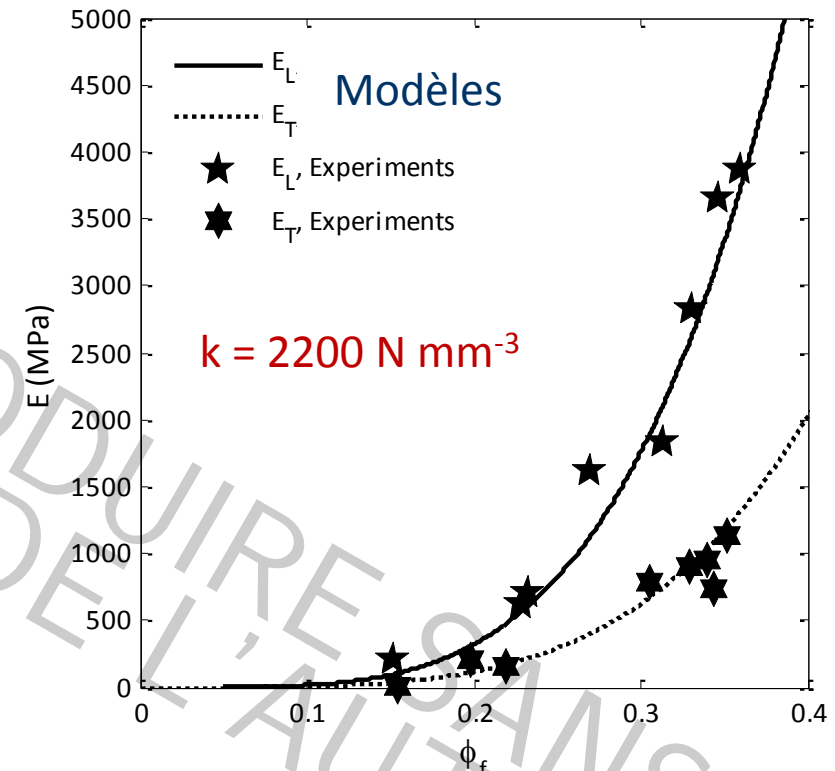
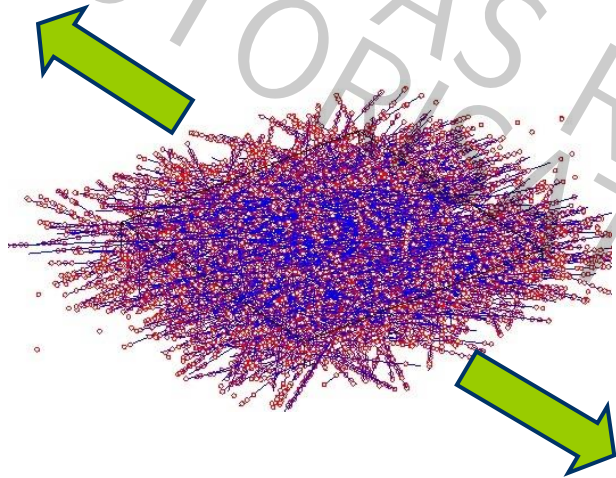
Tenseur des contraintes macroscopique équivalent - cas $\mathcal{M} = O(\varepsilon^2)$



- Champs inconnus, solutions de l'auto-équilibre du VER
- Rôle explicite de la microstructure sur les propriétés macroscopiques

Modélisation des propriétés élastiques des milieux fibreux

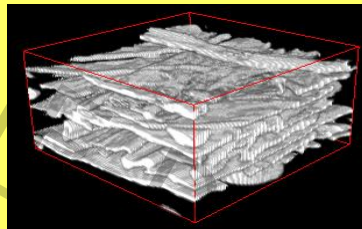
Comparaison modèle – expériences (papiers orientés)



→ Une raideur de liaison de 2200 N mm^{-3} permet d'obtenir des prédictions de modèles très proches des données expérimentales

→ Valide les paramètres de la microstructure à prendre en compte pour décrire le comportement mécanique macroscopique

Conclusion

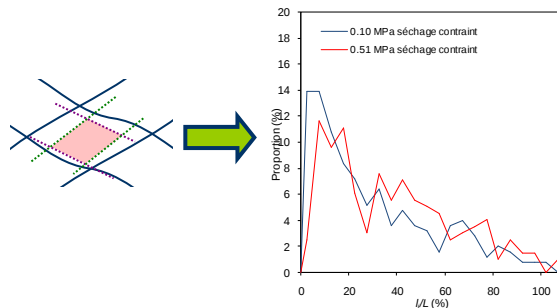


Analyse d'images 3D

- 😊 Accès à un grand nombre de descripteurs des fibres et des liaisons dans le réseau
- 😊 Minimise le nombre de dispositifs d'études

Descripteurs

- Sur des **éléments individuels** dans le réseau
- Quantification des propriétés **impactant les propriétés élastiques macro**

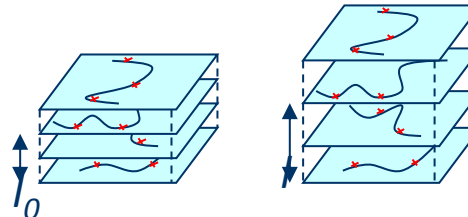


Influence des conditions d'élaboration

- Les fibres sont sous forme de **rubans** contenus **dans le plan du papier**
- Nombre **très important** de contacts par fibre
- Les **aires des liaisons partielles**

Influence de l'humidité relative

- **Nouvelles approches** de l'étude de l'hygroexpansion
 - dans l'épaisseur
 - sur les fibres



Validation ou alimentation de modèles

Nombre de contacts

- Tube model bien **adapté**
- Prise en compte **du vrillage des fibres**

Hygroexpansion

- Mise en évidence des **liens entre** propriétés hygroscopiques anisotropes des fibres et les propriétés macro
- Mise en évidence **du rôle majeur de l'hygroexpansion longitudinale** des fibres sur l'hygroexpansion macro

Elasticité

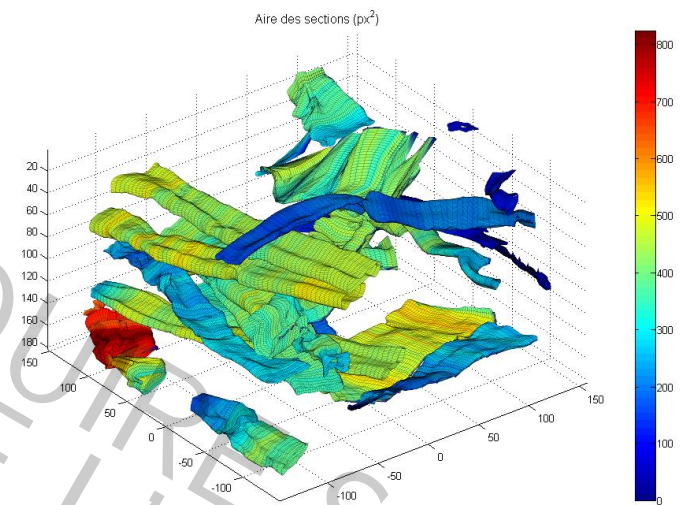
- Importance de la microstructure et des paramètres élastiques des liaisons

Perspectives

Analyse d'images tridimensionnelles de milieux fibreux complexes

Caractériser

- la géométrie des sections droites des fibres
- la courbure des lignes moyennes des fibres
- l'orientation des contacts/liaisons fibre-fibre...

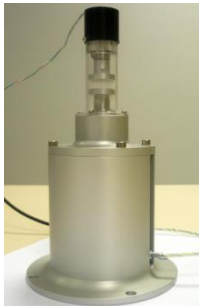


Aire des sections droites des
fibres le long de leur ligne
moyenne

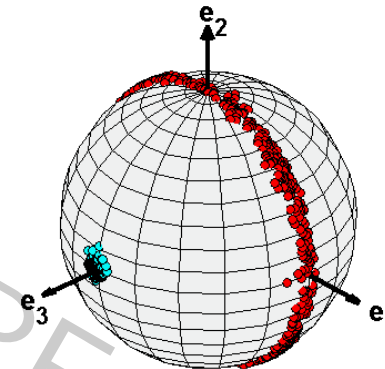
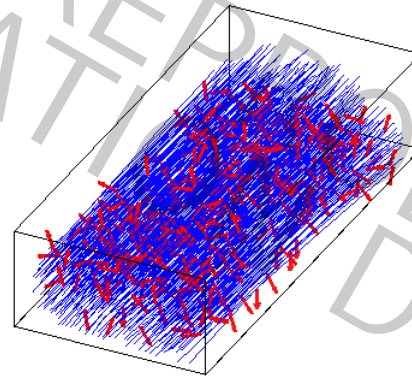
Perspectives

Analyse d'images tridimensionnelles de milieux fibreux complexes

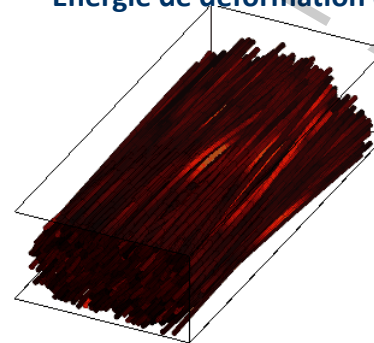
Mise en place d'une chaîne de traitement
d'images 3D pour mesures de
microstructures et de champs
cinématiques



Nombre de contacts: 361



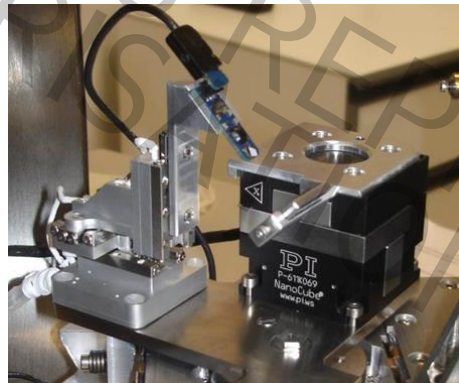
Energie de déformation élastique



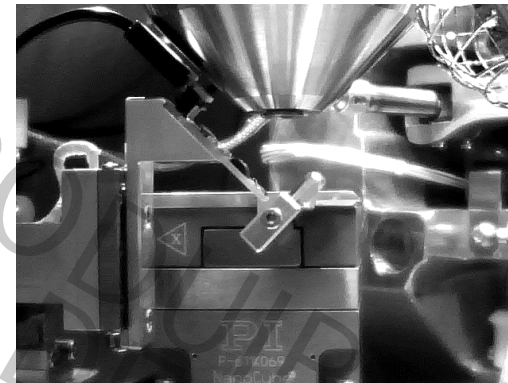
Perspectives

Essais micromécaniques sur fibres et liaisons

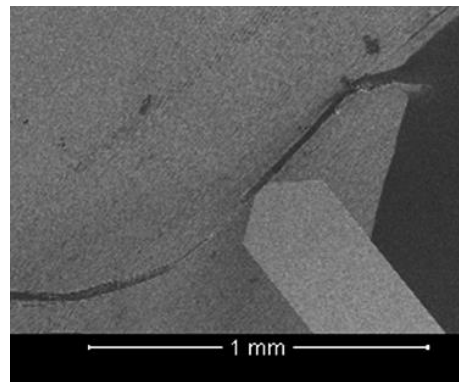
Mise en place d'outils de microrobotique pour essais micromécaniques (compression, flexion) avec observations des surfaces des fibres et in situ et environnement contrôlé



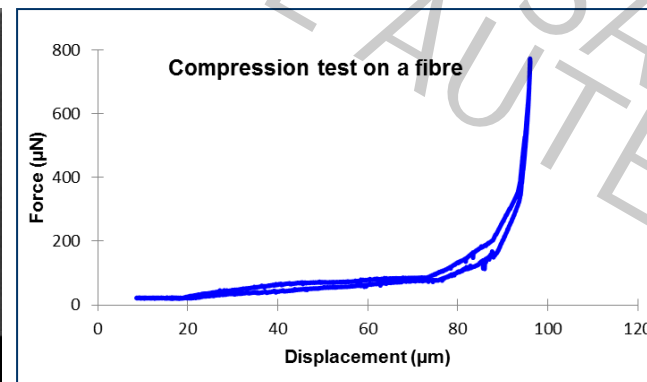
Système de microrobotique



Système de microbotique à l'intérieur d'une chambre ESEM



Essai de compression en ESEM



Force – Déplacement d'une fibre blanchie de résineux

Remerciements

- **European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)** : projet de longue durée MA-127 « Heterogeneous fibrous materials »
- **ANR : projet ANAFIB 09-JCJC-0030**
- **Région Rhône-Alpes** (cluster Macodev) : bourse de doctorat de Cyril Marulier
- **Grenoble INP** : bonus qualité recherche « Outils de microscopie et de microrobotique... »
- Programme européen **WoodWisdom-Net PowerBonds**

- Jean-Francis Bloch LGP2
- Raphaël Passas LGP2
- Brigitte Manship LGP2
- Bertine Khélifi LGP2
- Magalie Péralba LGP2
- Stéphane Dufreney LGP2
- Maxime Terrien LGP2
- Mohammed Aichi LGP2
- Christian Geindreau 3SR lab
- Pascal Charrier 3SR lab
- Denis Caillerie 3SR lab
- Steven Le Corre Univ. Nantes
- Thomas Joffre Univ. Uppsala
- Per Isaksson Univ. Uppsala
- Elodie Boller ESRF
- Paul Tafforeau ESRF
- Olivier Guiraud Novitom