



# Caractérisation expérimentale du comportement des rovings

Audrey HIVET  
Laboratoire de mécanique Gabriel Lamé  
Audrey.hivet@univ-orleans.fr



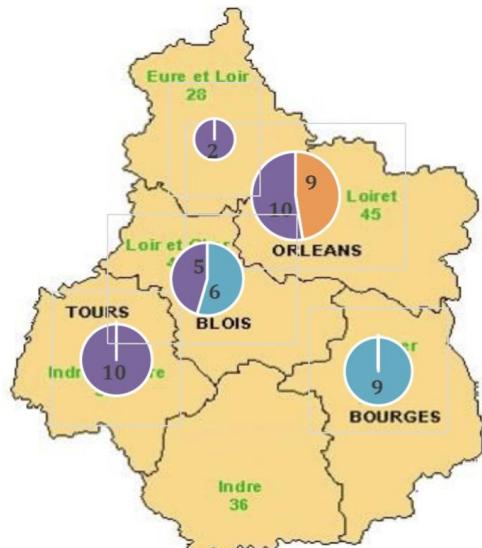
# Présentation du labo

*Un laboratoire de mécanique en région Centre Val de Loire*



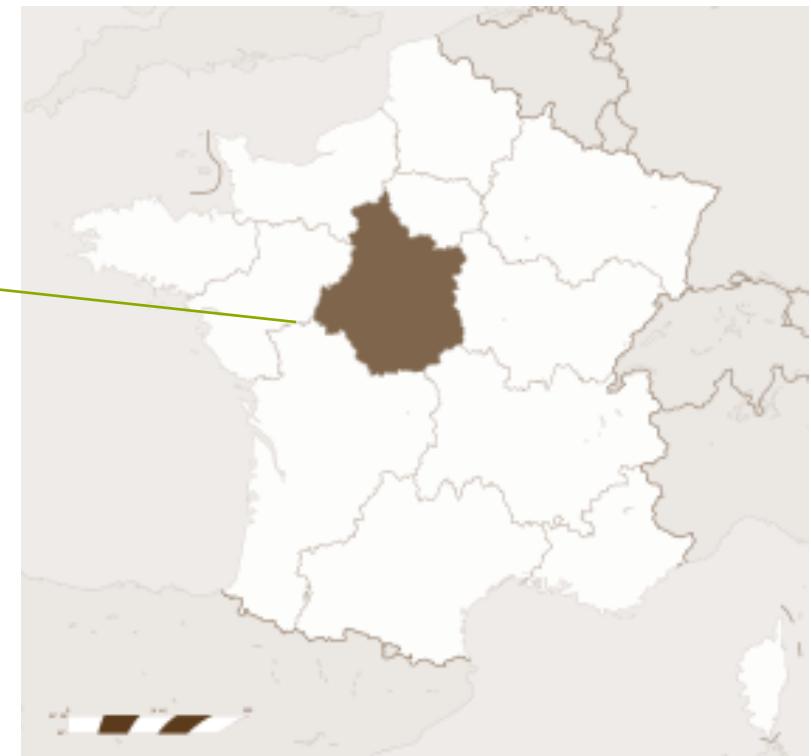
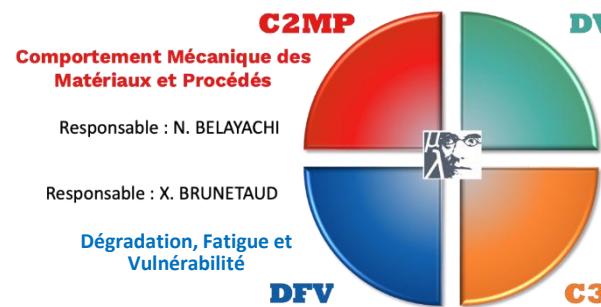
**LaMé**  
Laboratoire de Mécanique  
Gabriel Lamé

- 5 sites



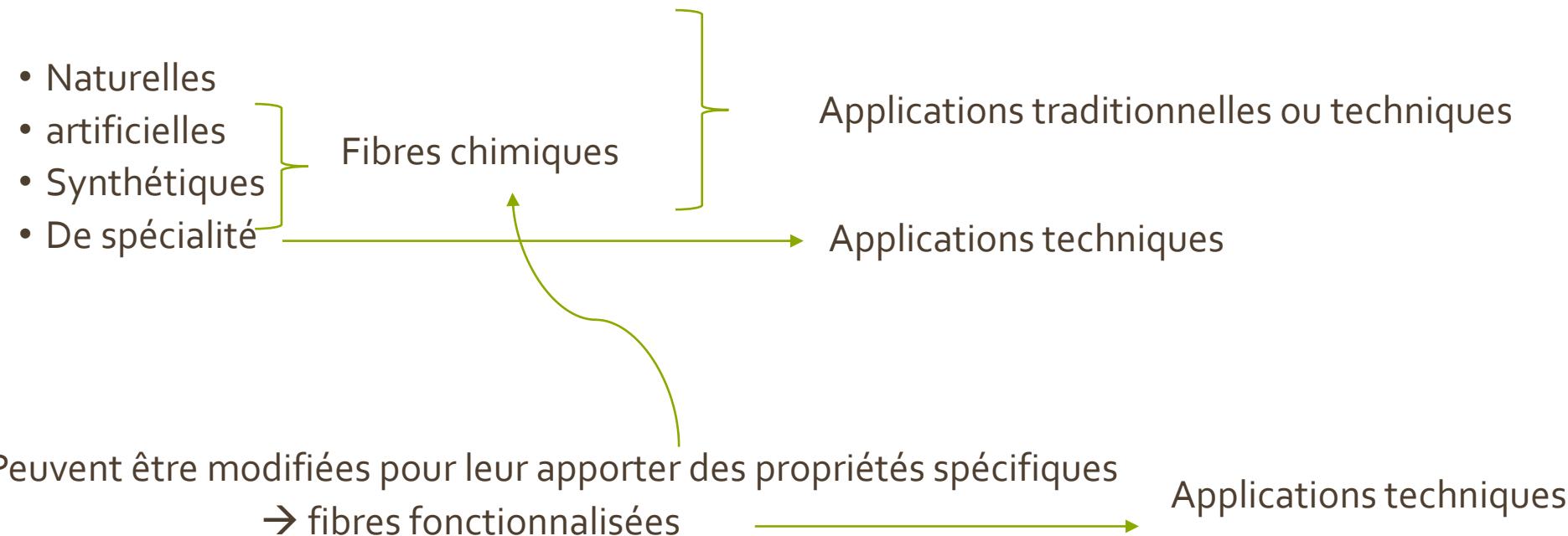
- 4 équipes

4 équipes de recherche



# Fibres : définition

- Norme NF G00-001 (1985)
- Différents types de fibres



# Propriétés mécaniques des fibres : généralité

- **Grand rapport longueur/diamètre**

→ Propriétés mécaniques particulières

→ Moments quadratiques (axe et polaire) :  $\pi D^4/64$ ,  $\pi D^4/32$

→ La rigidité de traction est très grande devant les autres

→ En particulier celle de flexion

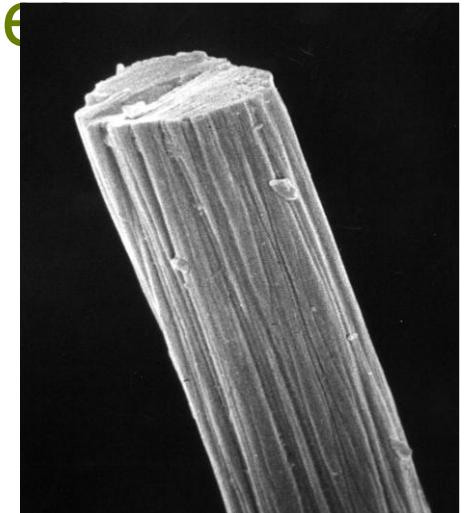
→ **Une fibre est rigide en traction et extrêmement flexible.**

→ Une fibre flambe très facilement.

→ Une fibre n'est rigide que lorsqu'elle est tendue.

→ **La rigidité et la résistance à la traction sont les propriétés**

**fondamentales des fibres** : Module d'Young, Contrainte limite de rupture

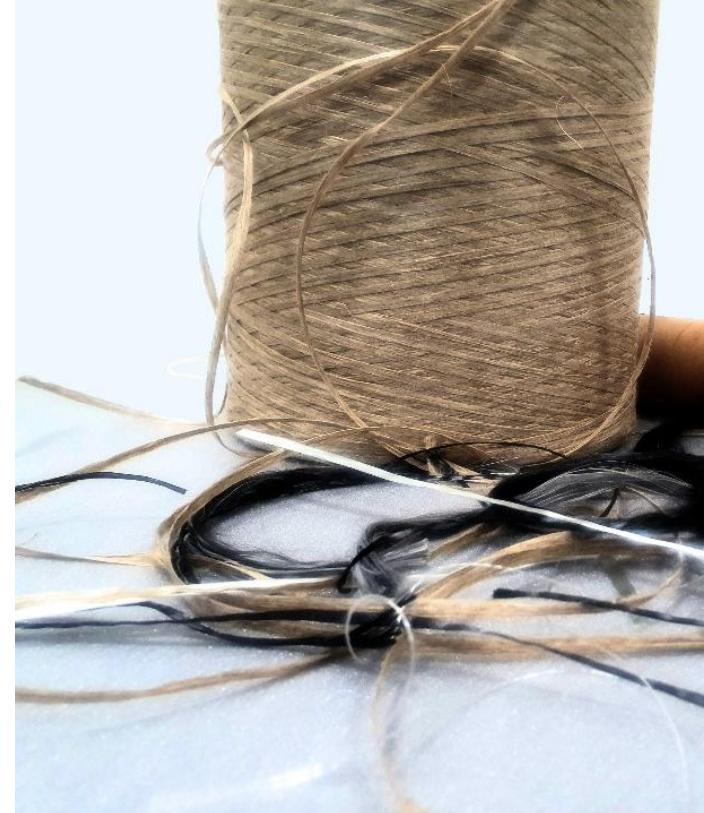


A high strength  
Carbon fibre

with a diameter of  
7µm

made from a PAN  
precursor





# De la fibre au fil

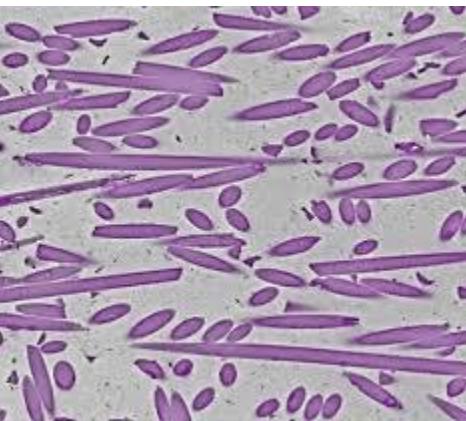
# De la fibre au fil

Les fibres produites peuvent être utilisées sous différentes formes :

➤ **Fibres broyées, coupées courtes ou semi-longues :**

➤ extrusion avec un polymère

➤ Polymères chargés



BMC INJECTION

# De la fibre au fil

Les fibres produites peuvent être utilisées sous différentes formes :

➤ Fibres broyées, coupées courtes ou semi-longues

➤ **Fils, mèches, torons**

- Assemblage de fibres
- Quasi parallèles : rovings ou stratifil (composites) : souvent appelés mèches, obtenues par filage
- Avec torsion (textile) : fils ou torons, obtenus par filature
- Câbles : assemblage de fils avec ou sans torsion.



Figure 1-1: Exemples de constitutions de mèches de renforts tissés [SCA'89]

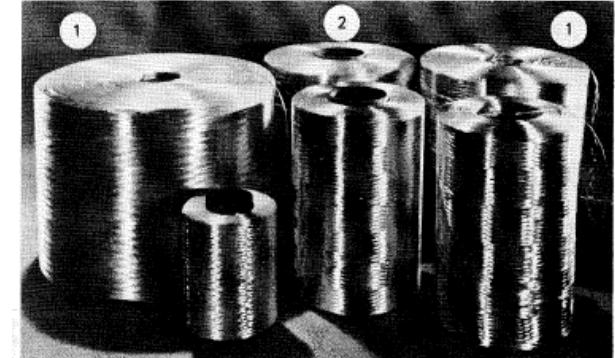
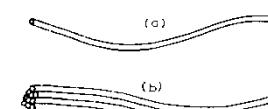


Figure 2.8. Différentes présentations des stratifil : 1. Pelotes – 2. Bobines (sur tubes) (Documentation Vetrotex)



(a)



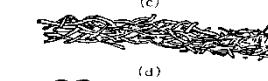
(b)



Carded cotton spun yarn



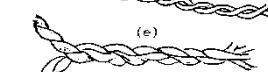
Combed cotton spun yarn



(e)



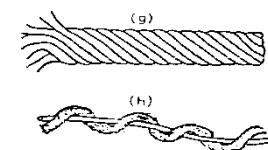
Woolec spun yarn



(g)



Twisted filament yarn



High bulk filament yarn



Stretch filament yarn

# Propriétés mécaniques des mèches

---

- Les mèches de sont pas constituées que de fibres droites, parallèles organisées
  - Organisation ni périodique, ni aléatoire
  - Les mèches sont plus ou moins torsadés
  - Les fibres ne sont pas toutes droites rectilignes
  - La rugosité, la section des fibres peuvent être très différents
  - Les mèches sont ensimés
    - Assurer la cohésion
    - Éviter la dégradation lors du procédé
    - Traitement anti-statique
    - .....

# Ensimage : rôle et impact sur les propriétés

L'ensimage consiste en l'application d'un revêtement chimique :

C'est un constituant **indispensable** pour le procédé de fabrication des mèches mais aussi et surtout pour leur mise en œuvre et pour optimiser les performances des composites (ex : adhésion fibres/matrice)

- Etablir la cohésion entre les fibres ;
- Les protéger de l'abrasion ;
- Eviter l'apparition de charges électrostatiques ;
- Améliorer la mouillabilité et la compatibilité chimique avec la résine afin de faciliter la liaison entre ces deux constituants ;
- ....

**Recettes spécifiques aux fabriquant, adaptées à chaque procédé, utilisation,...**

→ **grand secret autour des formulations qui sont les savoir-faire du fabriquant**

Il fournit également au réseau fibreux une partie de sa **cohésion**

**Une cohésion très variable du réseau de fibres peut être obtenue → Joue un rôle clé dans certains procédés**

# Propriétés mécaniques des mèches

➤ **Mèche : → composée de milliers de fibres → Matériau multi-échelle**

➤ Le comportement est le résultat

➤ Du comportement de la fibre : matériau « homogène », formulation classique

➤ Arrangement de fibres pour former le fil

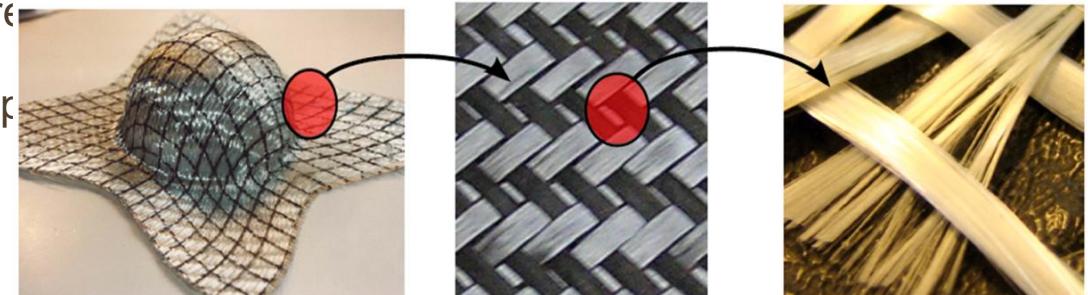
➤ **La mèche est à la fois un matériau et une structure**

→ pas dans le champ de la formulation classique des lois de comportement des matériaux homogènes.

➤ Grandes déformations (réorganisation du réseau de fibres)

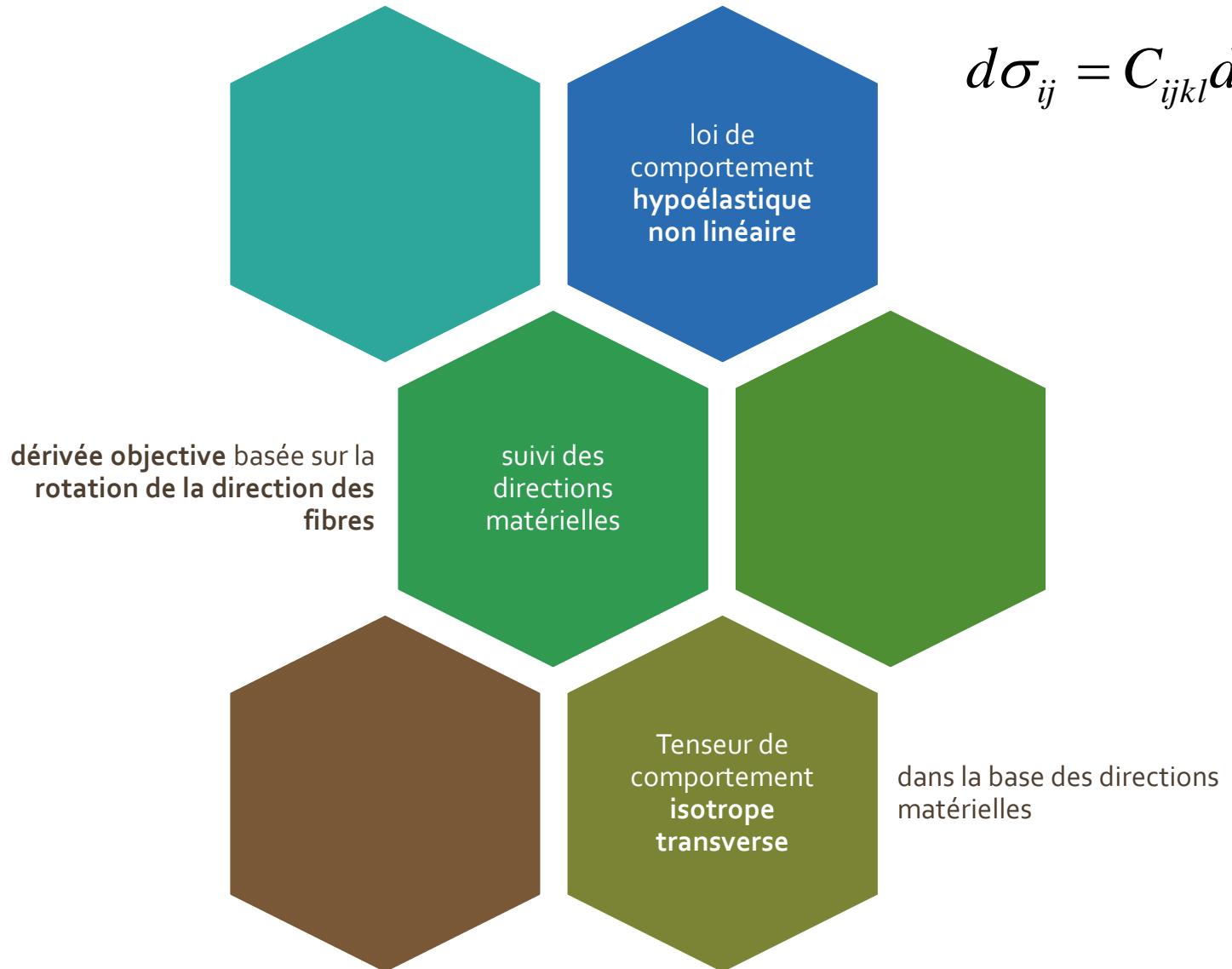
➤ En traction → en fonction des trajectoires des fibres on peut déformer les fibres.

➤ Dans les autres directions, c'est très différents....



➤ **A l'échelle mésoscopique, la mèche est considérée homogène → définition du matériau homogène équivalent**

# Modèle de comportement du matériau homogène équivalent



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

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

*Symétrie*

# Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

Loi de comportement hypoélastique d'un matériau isotrope transverse homogène équivalent:

$$d\sigma_{ij} = C_{ijkl} * d\varepsilon_{kl}$$
$$[C_{fi}] = \begin{bmatrix} C_{1111} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 \\ 0 & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1212} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{2323} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Symétrie}}$$
$$\left\{ \begin{array}{l} C_{1111} \\ C_{2222} = C_{3333} \\ C_{2233} = C_{2323} \\ C_{1212} = C_{1313} \end{array} \right. \begin{array}{l} \xrightarrow{\text{Identifiable par un essai de traction}} \\ \xrightarrow{\text{Identifiable par un essai de compaction/compression}} \\ \xrightarrow{\text{Identifiable par un essai de flexion}} \end{array}$$

Tenseur de comportement isotrope transverse reliant l'incrément de contraintes de Cauchy à l'incrément de déformation dans la base fi (dans la direction des fibres)



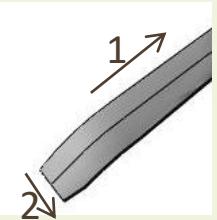
# Caractérisation du comportement en traction



# Comportement des mèches de roving

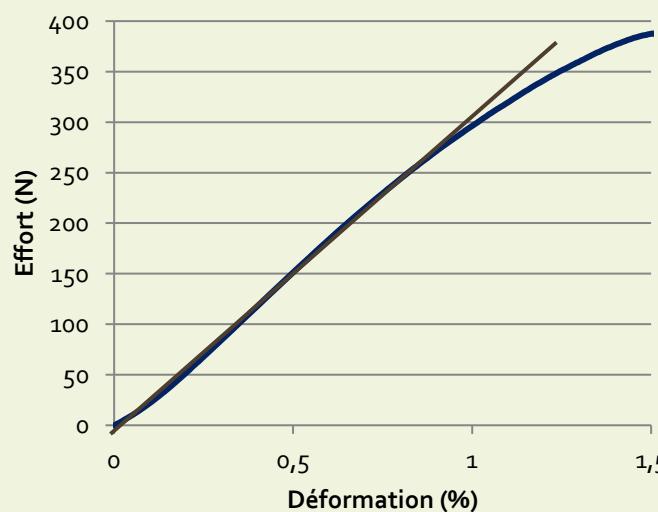
## ROVINGS « NON NATURELS »

1. Déformations longitudinales  
→ déformations ~~transverses~~  
(mesures optiques)



$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0$$

$$C_{1122} = C_{1133} = 0$$



2. Somme des rigidités des fibres quasi linéaire  
→ Déformations en traction → HPP

$$F = K \left( \frac{dl}{l_0} \right)$$

3. Matériau homogène équivalent

→ Contraintes considérées homogènes

$$d\sigma_{11} = \frac{K}{S_m} \cdot d\varepsilon_{11}$$

( $S_m$  = surface de la section transverse de la mèche)

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

*Symétrie*

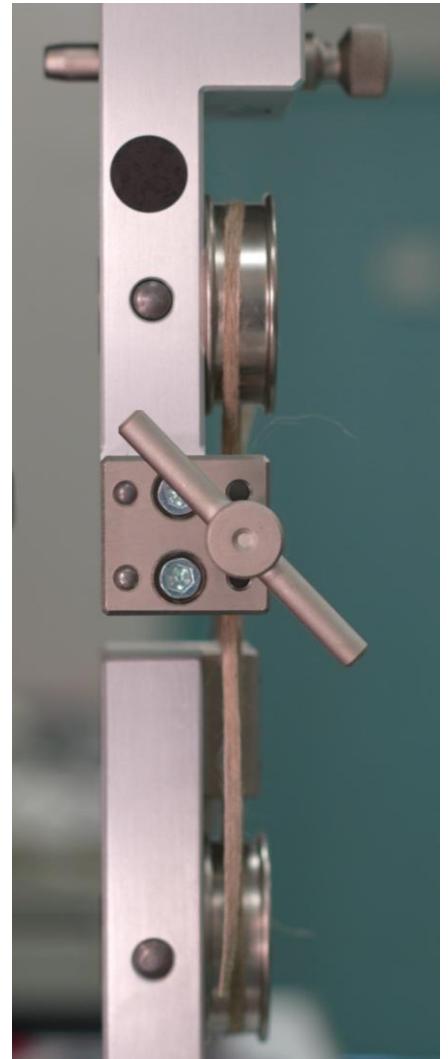
# Essais de traction

Que peut-on en déduire ?

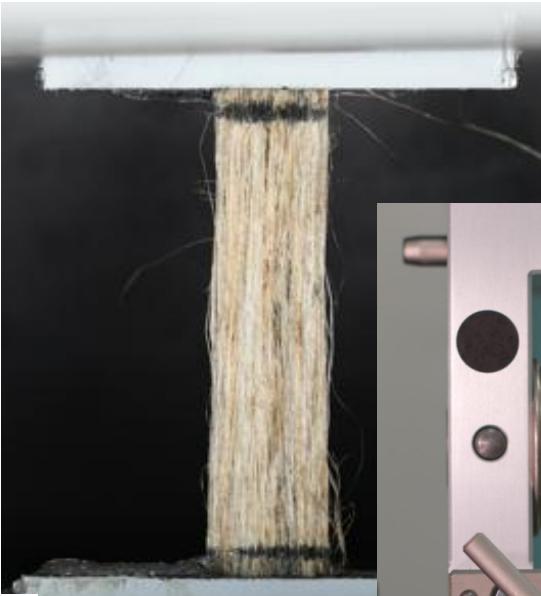
Comment les réaliser?



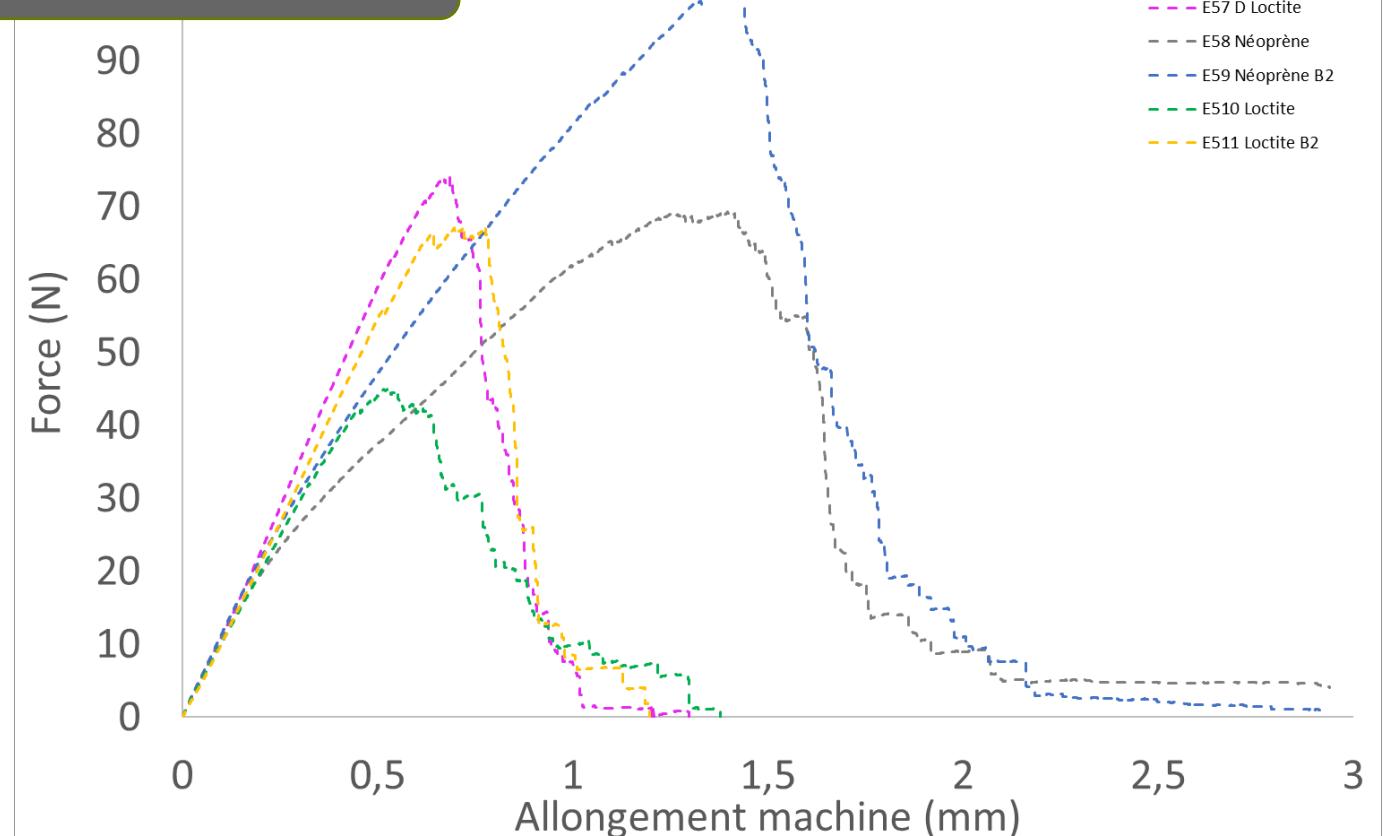
# Essais de traction



# Essais de traction

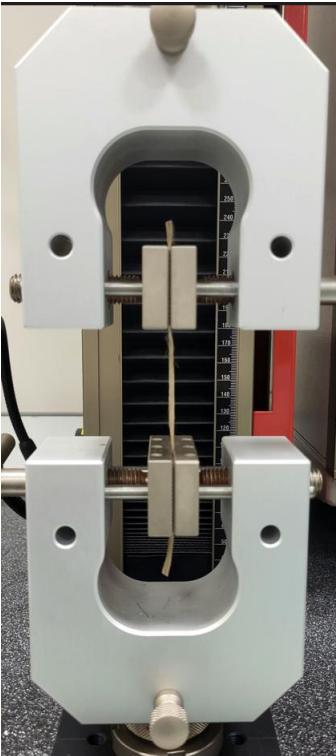
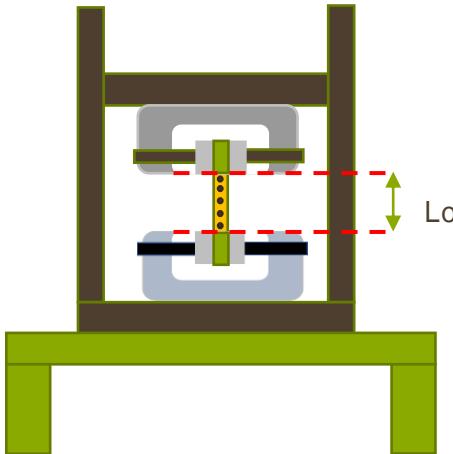


Comment les réaliser?



# Essais de traction

Comment les réaliser?

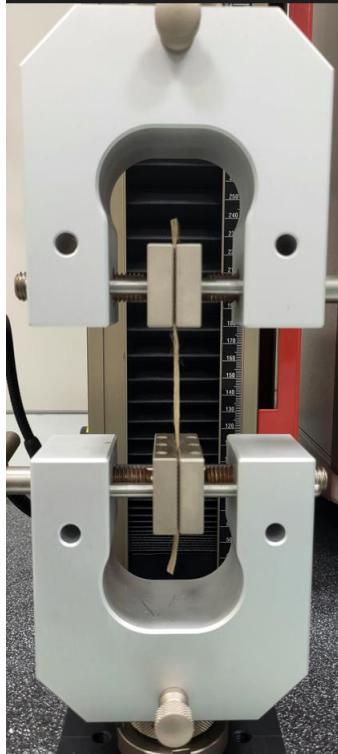
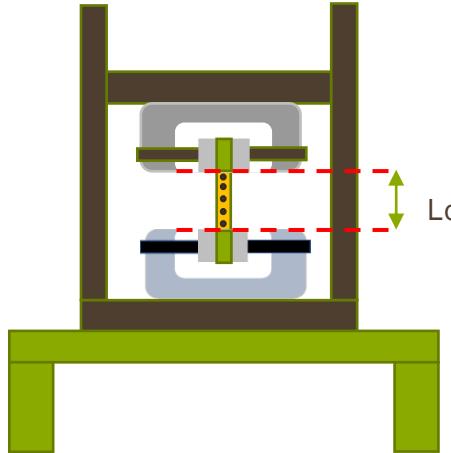


Et la souplesse machine ?

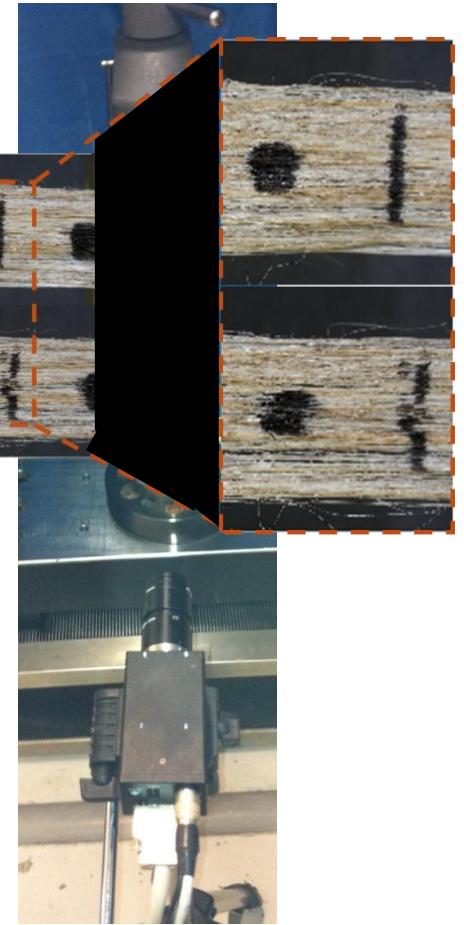
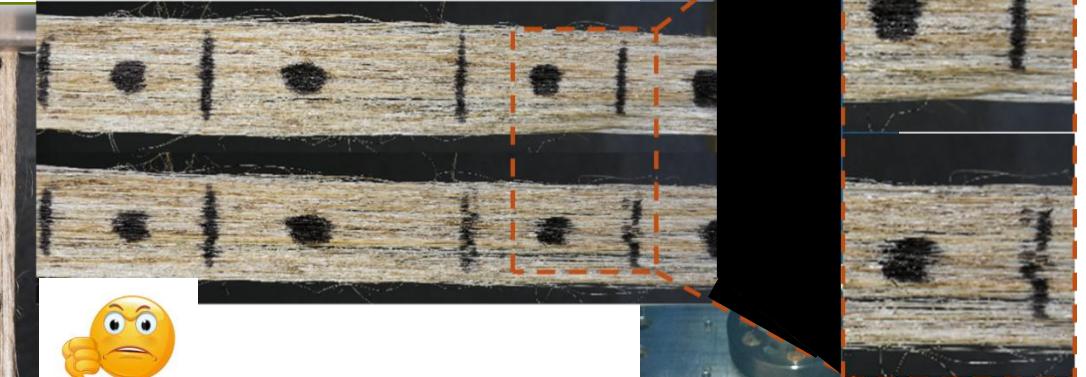
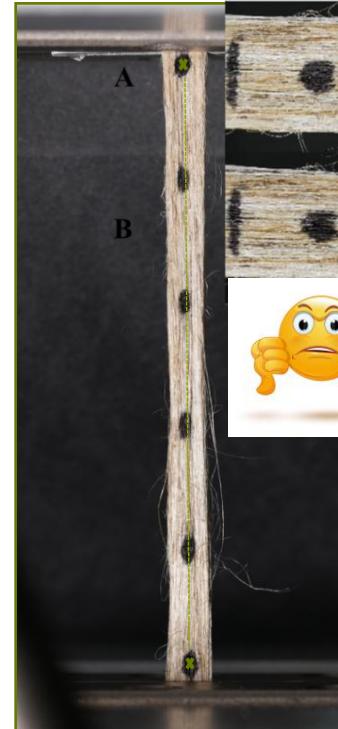


# Essais de traction

Comment les réaliser?



Et la souplesse machine ?



# Essais de traction

Comment les réaliser?

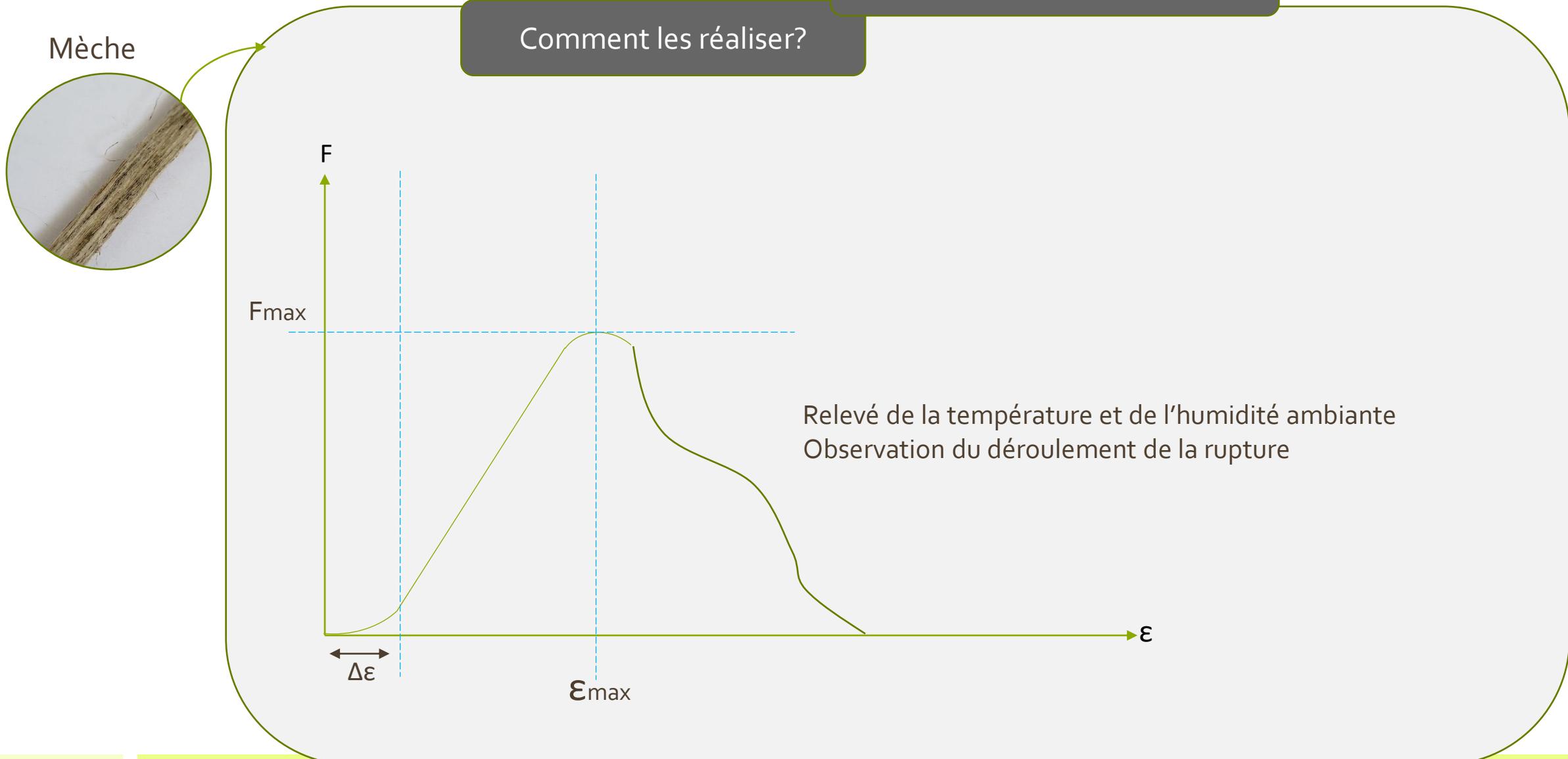
Et la souplesse machine ?



Suivi de la déformation  
à partir des talons en  
aluminium

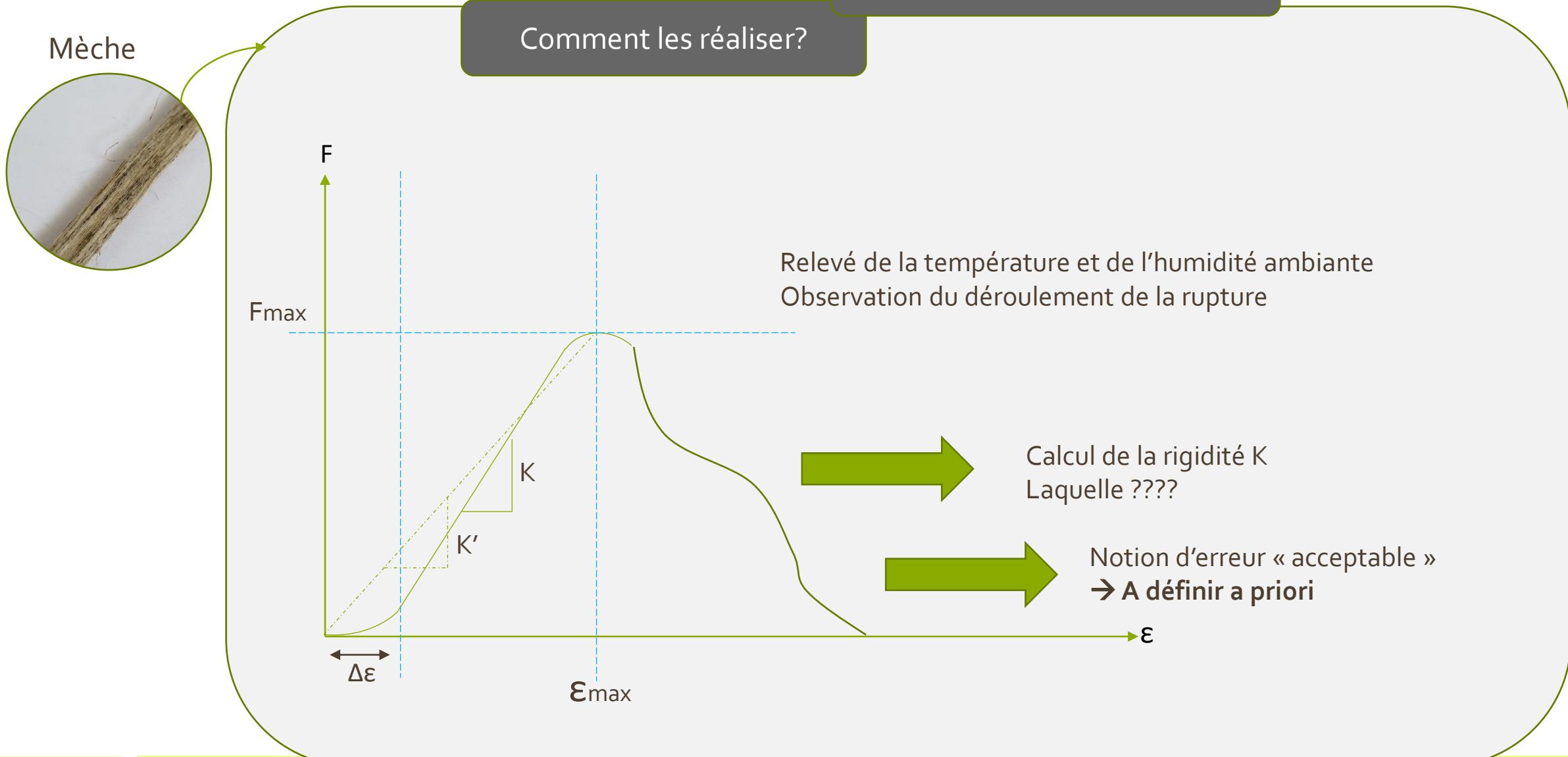
# Essais de traction

Que peut-on en déduire ?



# Essais de traction

Que peut-on en déduire ?



# Essais de traction

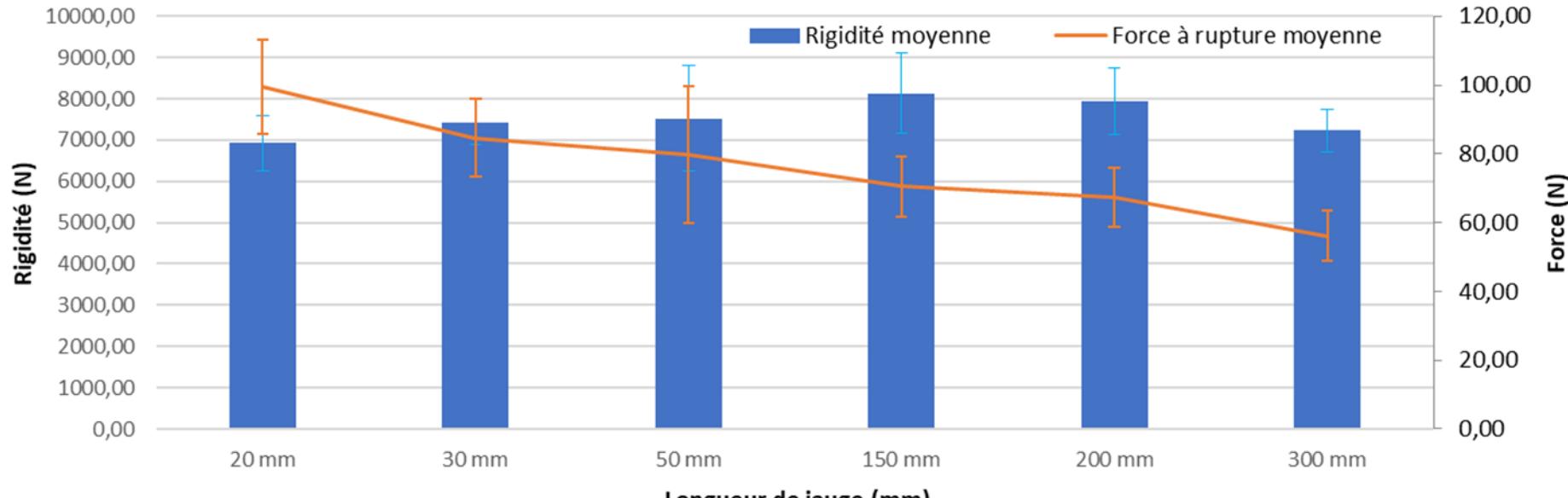
Que peut-on en déduire ?

Mèche



Comment les réaliser?

Comparaison de la rigidité et de la force à rupture en fonction de la longueur de jauge

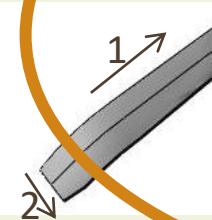


Diminution en moyenne de 44% de l'effort à rupture entre 20 et 300 mm

# Comportement des mèches de roving

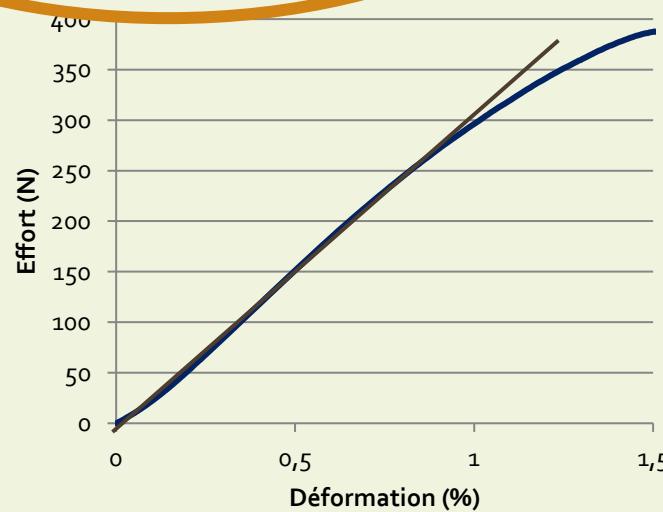
## ROVINGS LIN

1. Déformations longitudinales  
→ déformations ~~transverses~~  
(mesures optiques)



$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0$$

$$C_{1122} = C_{1133} = 0$$



2. Somme des rigidités des fibres quasi linéaire  
→ Déformations en traction → HPP

$$F = K \left( \frac{dl}{l_0} \right)$$

3. Matériau homogène équivalent  
→ Contraintes considérées homogènes

$$d\sigma_{11} = \frac{K}{S_m} \cdot d\varepsilon_{11}$$

( $S_m$  = surface de la section transverse de la mèche)

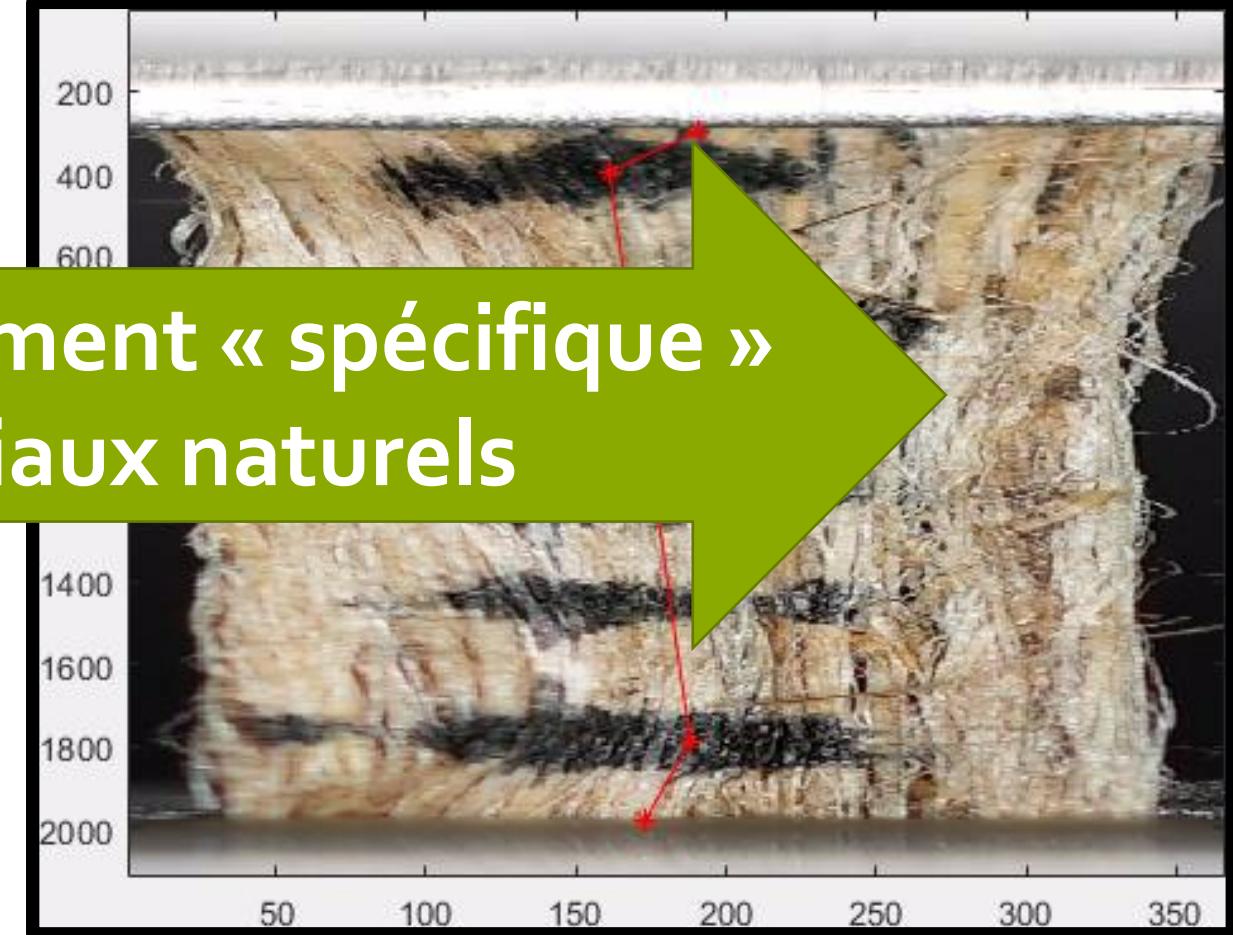
$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & \cancel{C_{1122}} & \cancel{C_{1133}} & 0 & 0 & 0 \\ \cancel{C_{2222}} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{3333} & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{1212} & & & 0 & 0 & 0 \\ C_{2323} & & & & 0 & 0 \\ C_{1313} & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

*Symétrie*

# Essais de traction



Loi de comportement « spécifique »  
aux matériaux naturels

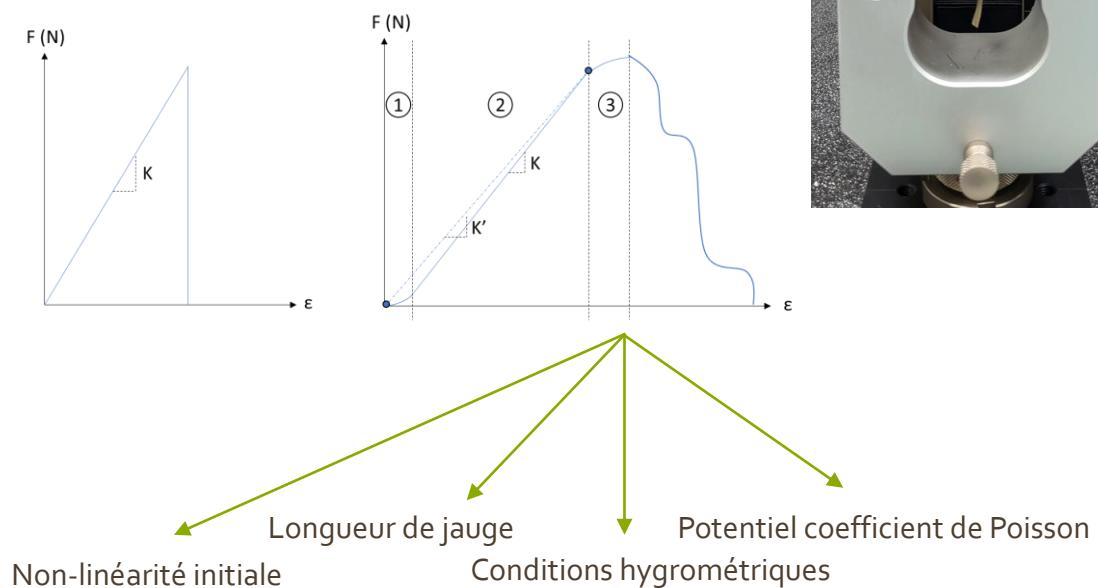


# Bilan Traction

- Influence des conditions aux Bords
- Les méthodes/moyens peuvent varier en fonction du matériau
- Notion de précision souhaitée

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

*Symétrie*





# Caractérisation du comportement en Compression



# Compression/compaction

**Mode de déformation privilégié** (intervient dans la plupart des sollicitations du renfort tissé)

**Influence directe sur la fraction volumique de fibres**

- Changement d'aire dans le plan transverse au fibres
  - ⇒ réorganisation des fibres
  - ⇒ réduction des espaces entre fibres



**Influence sur la perméabilité du renfort**



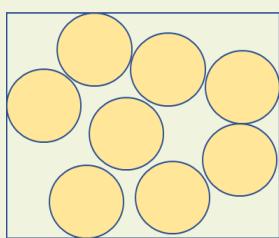
**Caractérisation nécessaire**

# Compression/compaction

1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

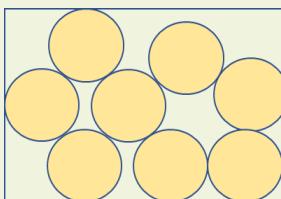
augmentation de la fraction volumique



Etape 1  
Etat initial

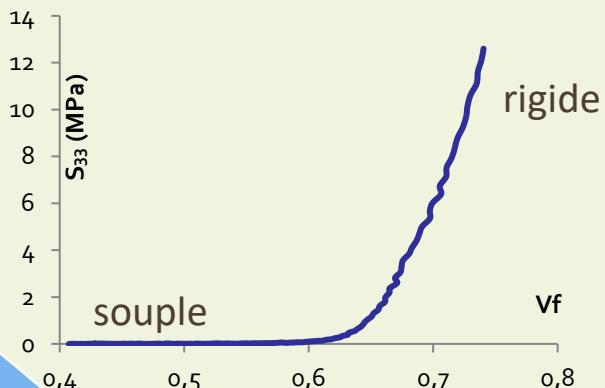
augmentation de la rigidité de compaction

Application du chargement

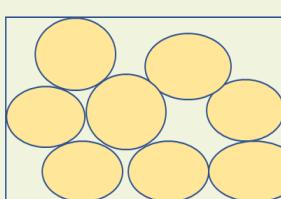


Etape 2  
Densification et réorganisation au sein de la mèche

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes



Application du chargement



Etape 3  
Déformation des fibres au sein de la mèche

3. Pression de compaction uniaxiale =  $f(V_f)$  (Toll 1998, Latil 2011)

$$P = K_c (V_f^\gamma - V_{f_0}^\gamma)$$

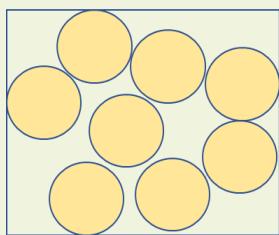
# Compression/compaction

1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

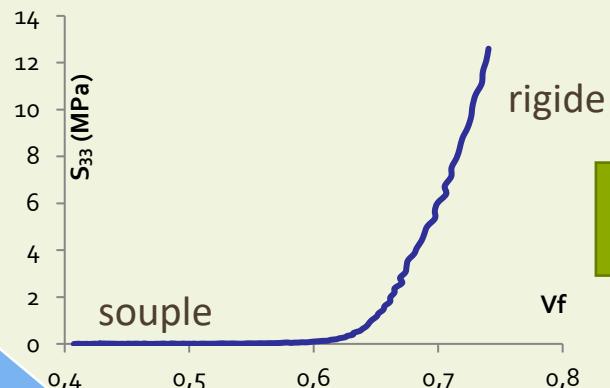
augmentation de la fraction volumique

augmentation de la rigidité de compaction

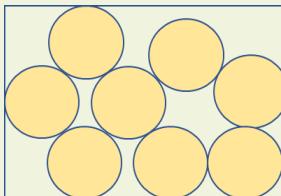


Etape 1  
Etat initial

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes



Application du chargement



Etape 2  
Densification et réorganisation au sein de la mèche

Application du chargement

3. Pression de compaction uniaxiale =  $f(Vf)$  (Toll 1998, Latil 2011)

2 « comportements »

rigide et souple

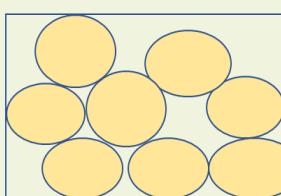
$f_0$

2 méthodes de caractérisation différentes

Compaction

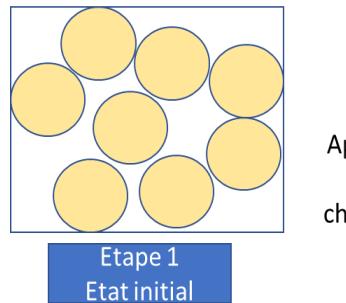
Compression

Application du chargement

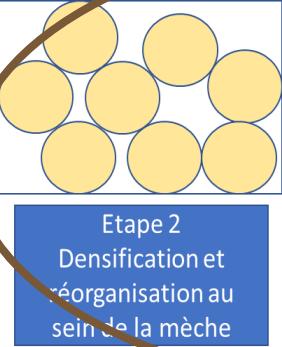


Etape 3  
Déformation des fibres au sein de la mèche

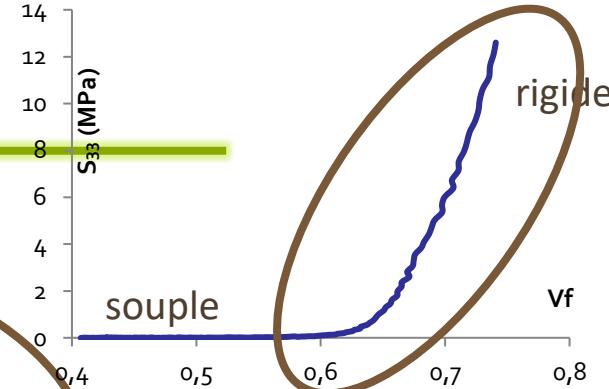
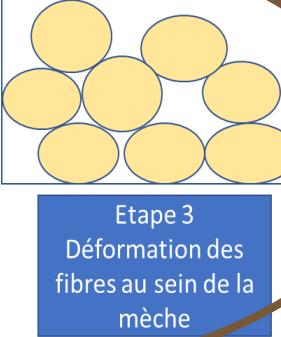
# Essais de compression



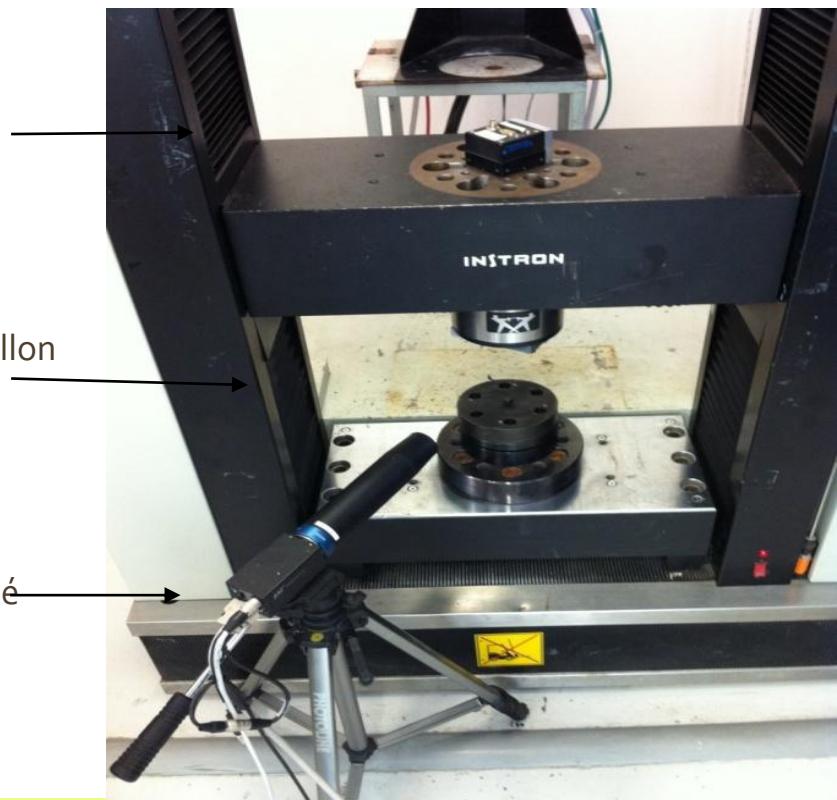
Application  
du  
chargement



Application  
du  
chargement



Caméra en vue de  
dessus



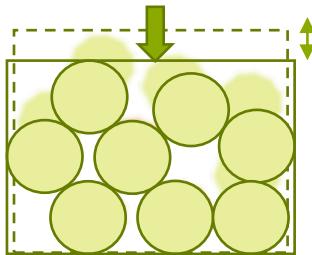
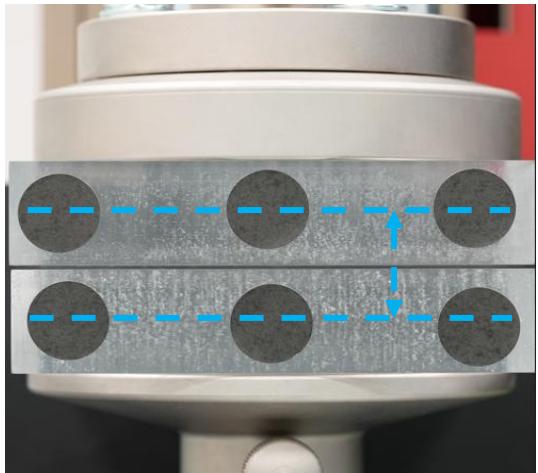
Emplacement de l'échantillon

Caméra en vue de côté

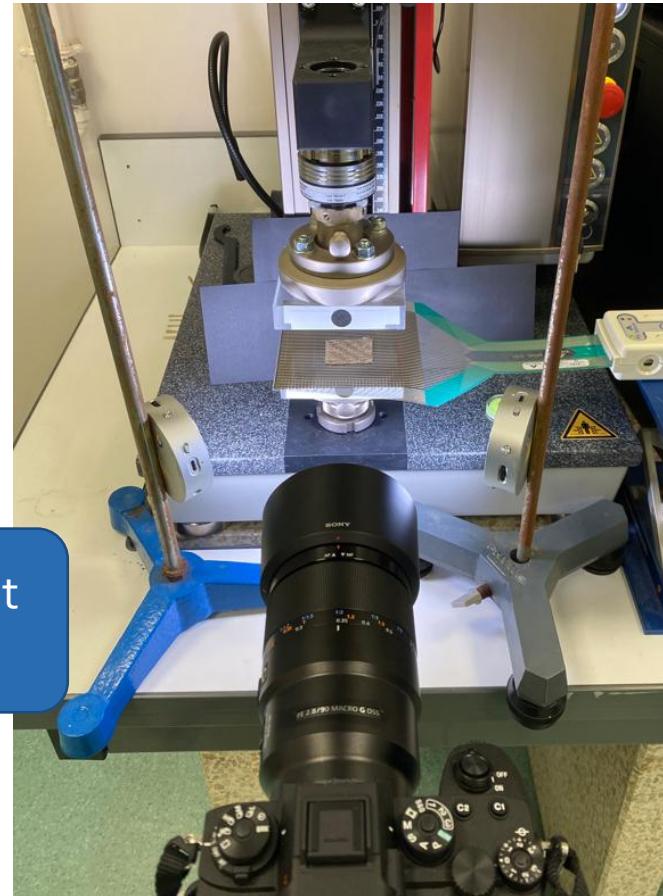
- Besoins :**
- Evolution de la fraction volumique de fibres en fonction de la pression (laquelle ???)  
→ Evolution de l'épaisseur (écrasement)  
→ Evolution de la largeur (étalement)

**MAIS ...**  
... Difficulté à suivre l'écrasement lié à la faible épaisseur initiale

# Essais de compression

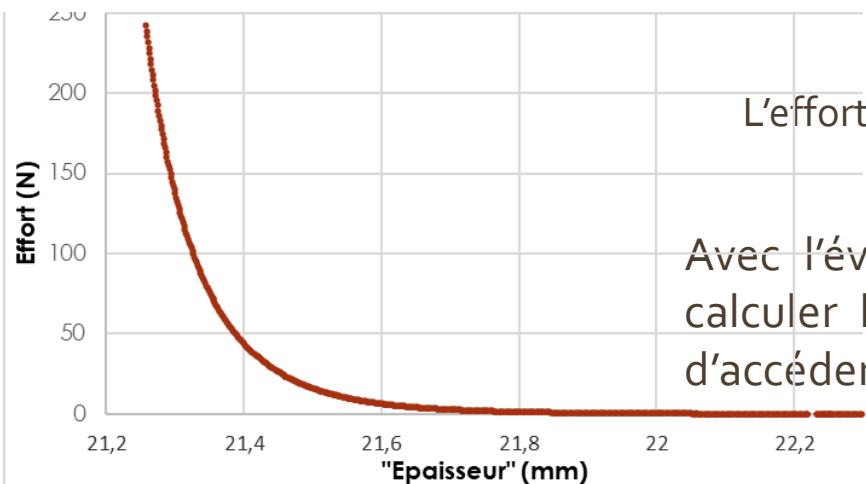
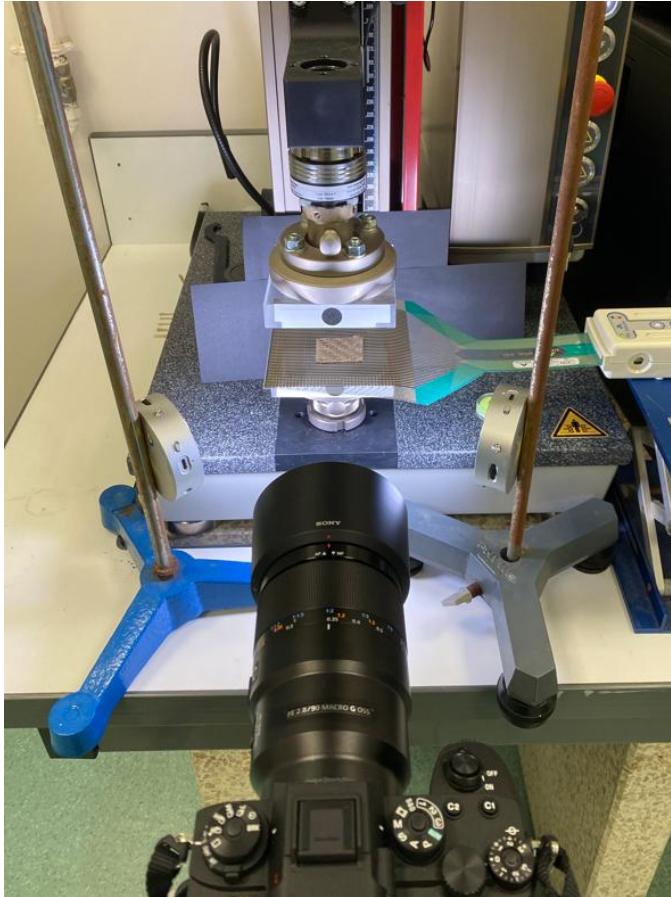


Comment accéder à l'évolution de l'étalement pendant l'essai ?



Permet d'obtenir l'évolution moyenne de la section suivant l'épaisseur du roving/tissu en fonction de l'effort

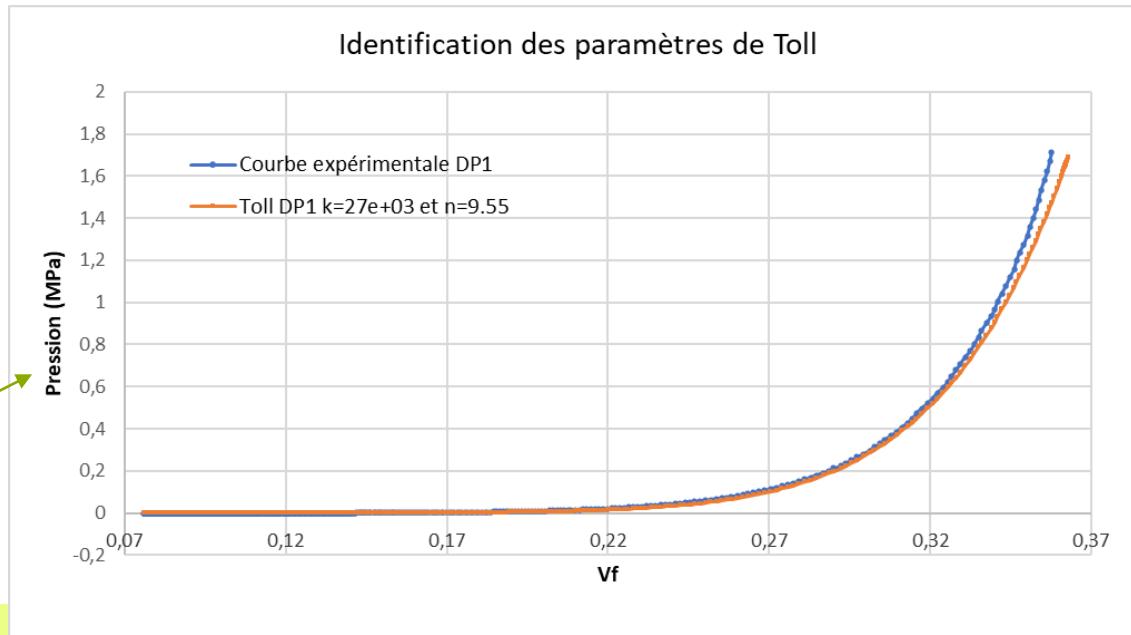
# Essais de compression



L'effort est récupéré par la machine

Avec l'évolution de la section il est possible de calculer la fraction volumique de fibres et donc d'accéder aux coefficients :

$$C_{2222} = C_{3333}$$
$$C_{2233} \quad C_{2323}$$



Pression  
apparente

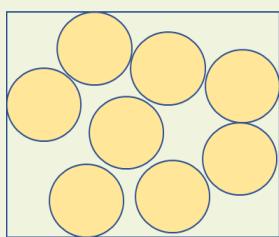
# Compression/compaction

1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

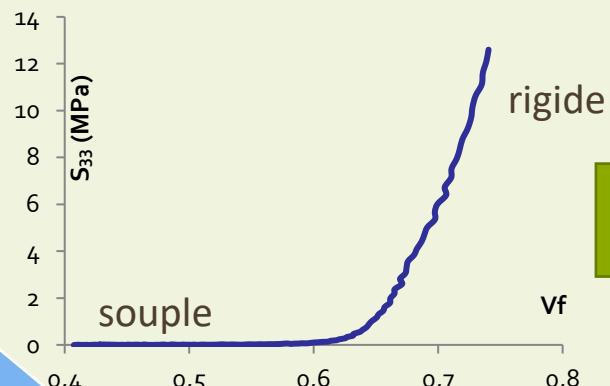
augmentation de la fraction volumique

augmentation de la rigidité de compaction

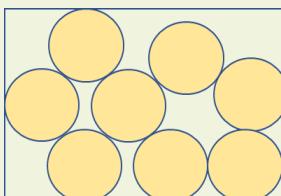


Etape 1  
Etat initial

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes

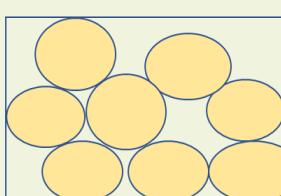


Application du chargement



Etape 2  
Densification et réorganisation au sein de la mèche

Application du chargement



Etape 3  
Déformation des fibres au sein de la mèche

3. Pression de compaction uniaxiale =  $f(V_f)$  (Toll 1998, Latil 2011)

2 « comportements »

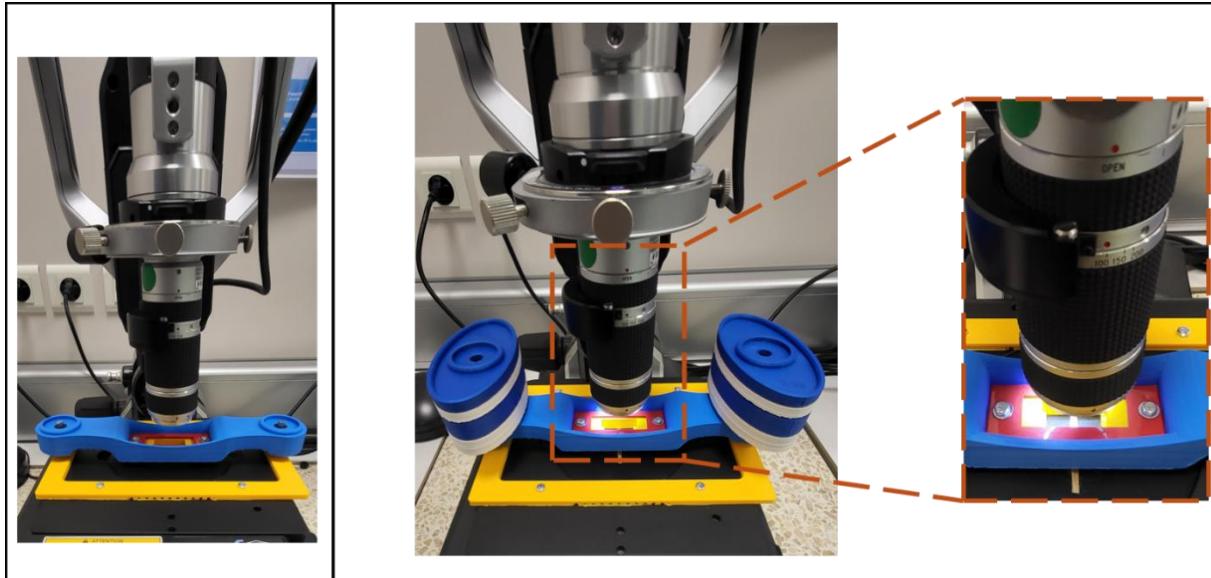
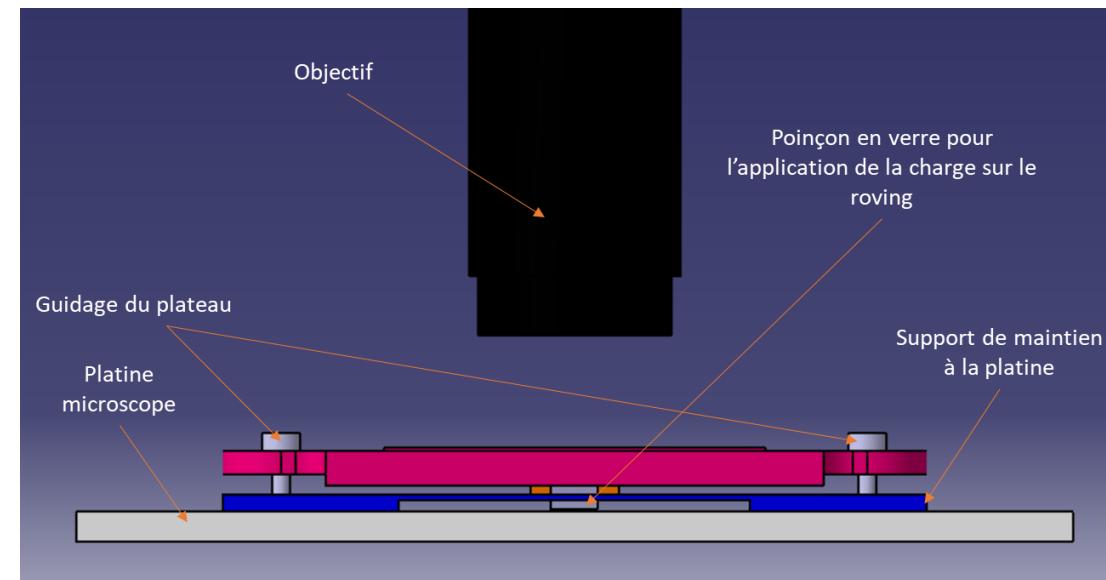
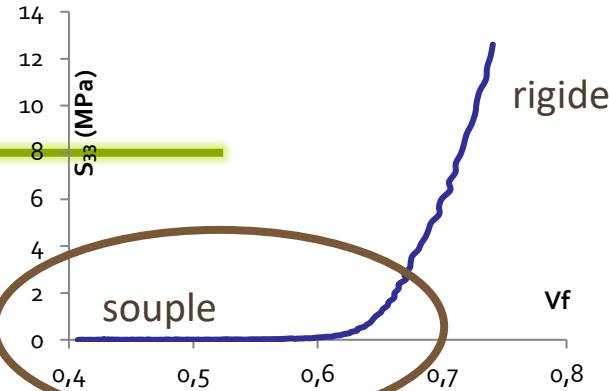
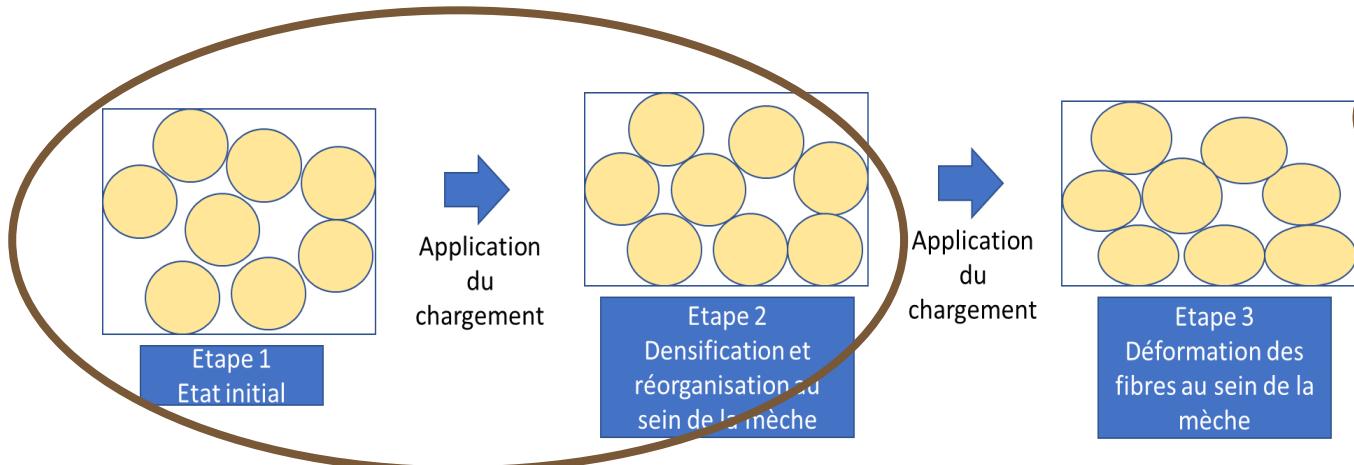
Etat initial : souple  
Etat final : rigide

2 méthodes de caractérisation différentes

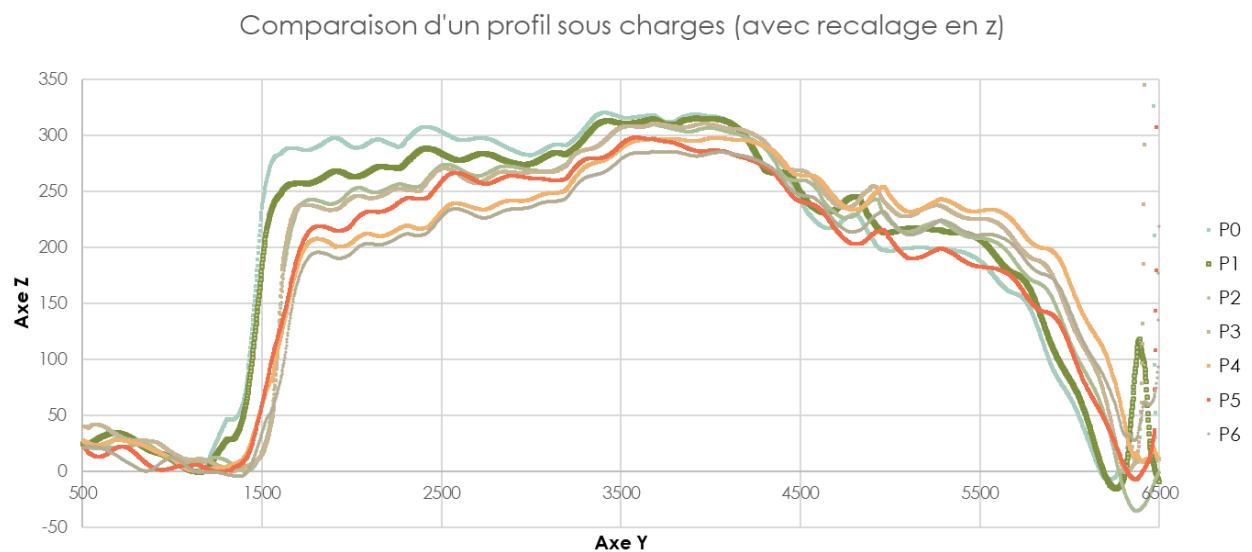
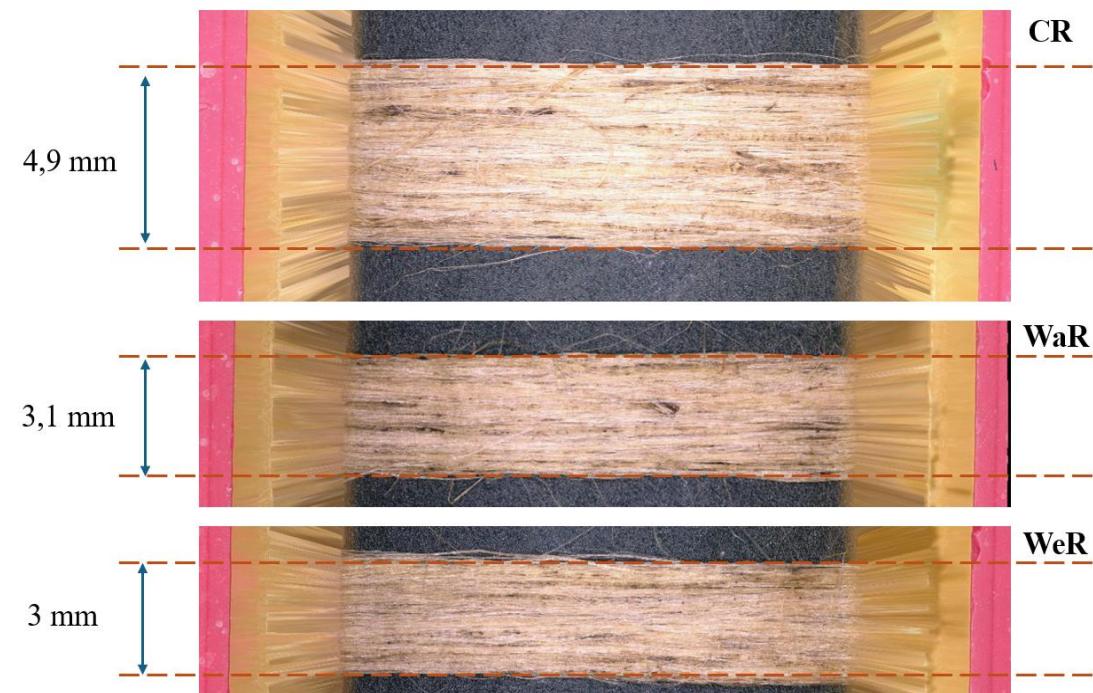
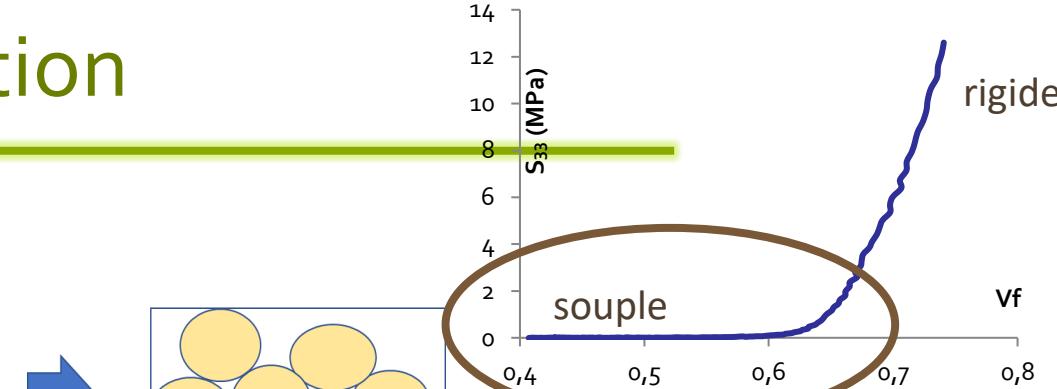
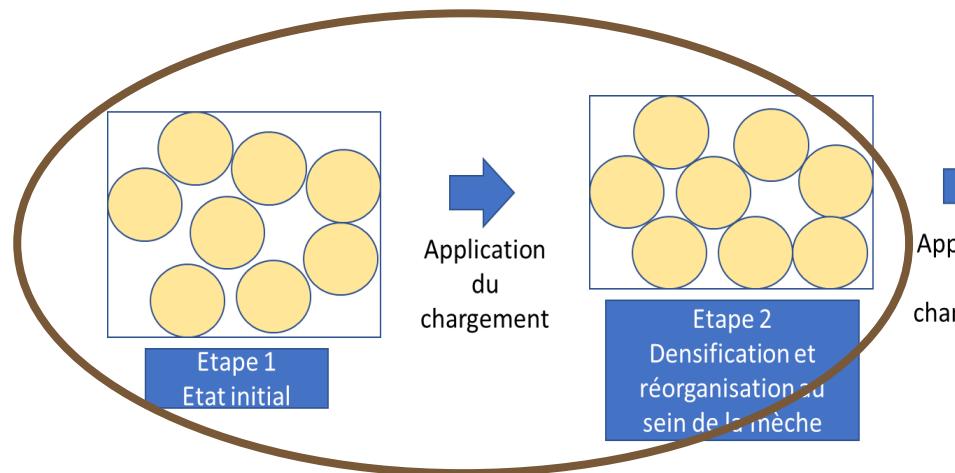
Compaction

Compression

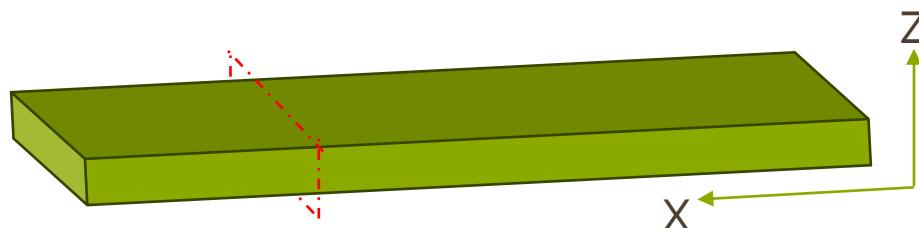
# Essais de compaction



# Essais de compaction

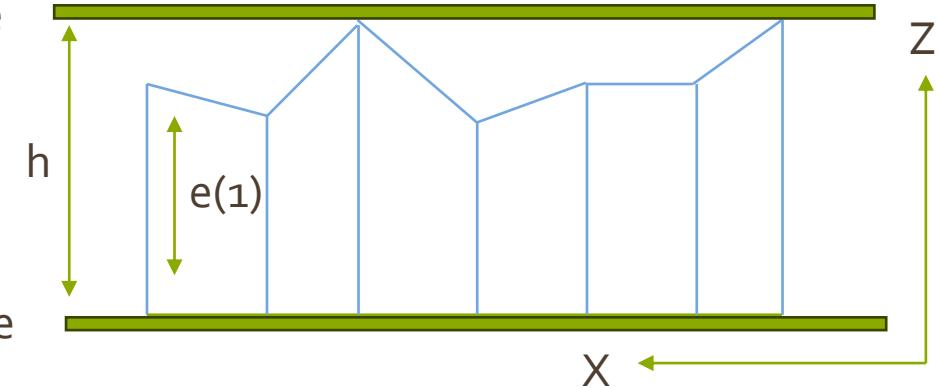


# Essais de compaction



Plaque de verre

Platine du microscope



2 fractions volumiques de fibres accessibles :

$$Vf_s = \frac{n_f * s_f}{S} = \frac{n_f * s_f}{l * e}$$

Comparable à ce qui est calculable en tomographie

$$Vf_{app} = \frac{n_f * s_f}{S_{app}} = \frac{n_f * s_f}{l * h_p}$$

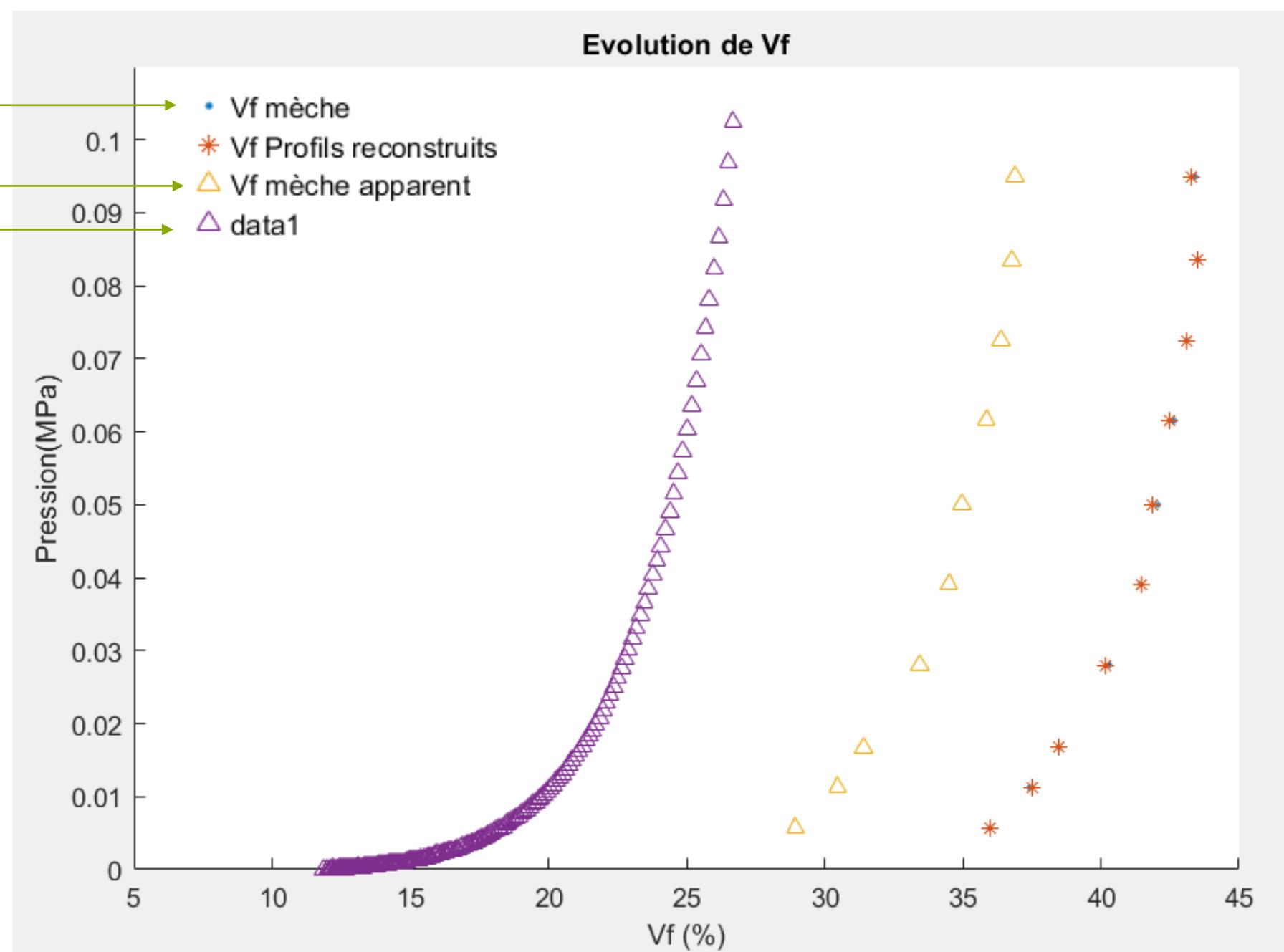
Comparable à ce qui est calculable pour un essai avec la Zwick

Roving testé avec  
la machine de  
traction

$Vf_s$

$Vf_{app}$

### Evolution de Vf



# Bilan Compaction/Compression

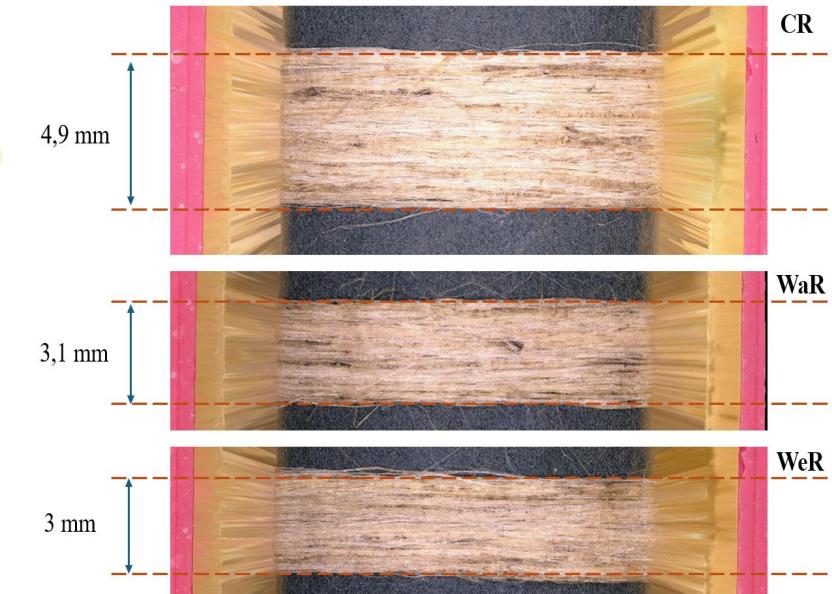
- 2 comportement
  - Très souple
  - A très rigide

→ 2 méthodes de caractérisation différentes

- Notion de surface apparente VS surface réelle → vraie influence sur la qualité du résultat

→ Savoir exactement ce qu'on mesure et pourquoi

→ A nouveau, notion de précision à définir en amont

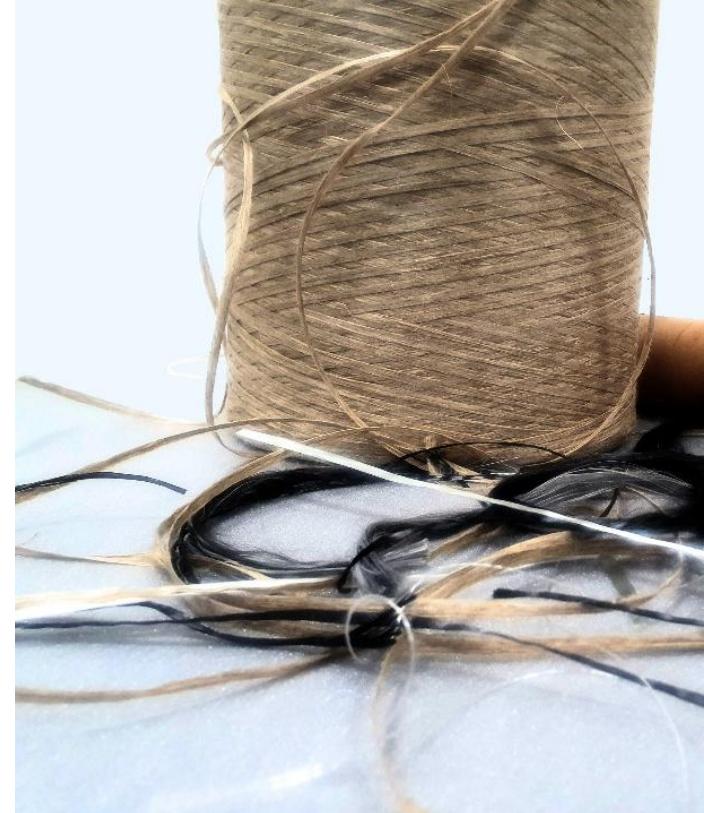


$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{2222} & C_{2233} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1212} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{2323} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{1313} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Symétrie*



Et maintenant,  
parlons de  
Cohésion



## Ensimage : rôle et impact sur les propriétés

L'ensimage consiste en l'application d'un revêtement chimique :

C'est un constituant **indispensable** pour le procédé de fabrication des mèches mais aussi et surtout pour leur mise en œuvre et pour optimiser les performances des composites (ex : adhésion fibres/matrice)

- Etablir la cohésion entre les fibres ;
- Les protéger de l'abrasion ;
- Eviter l'apparition de charges électrostatiques ;
- Améliorer la mouillabilité et la compatibilité chimique avec la résine afin de faciliter la liaison entre ces deux constituants ;
- ....

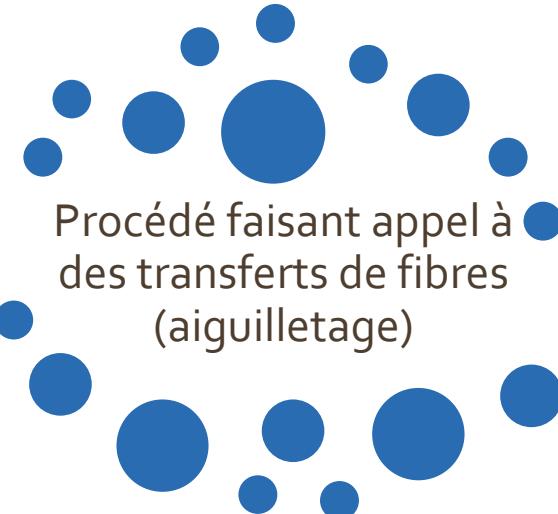
Recettes spécifiques aux fabriquant, adaptées à chaque procédé, utilisation,...

→ grand secret autour des formulations qui sont les savoir-faire du fabriquant

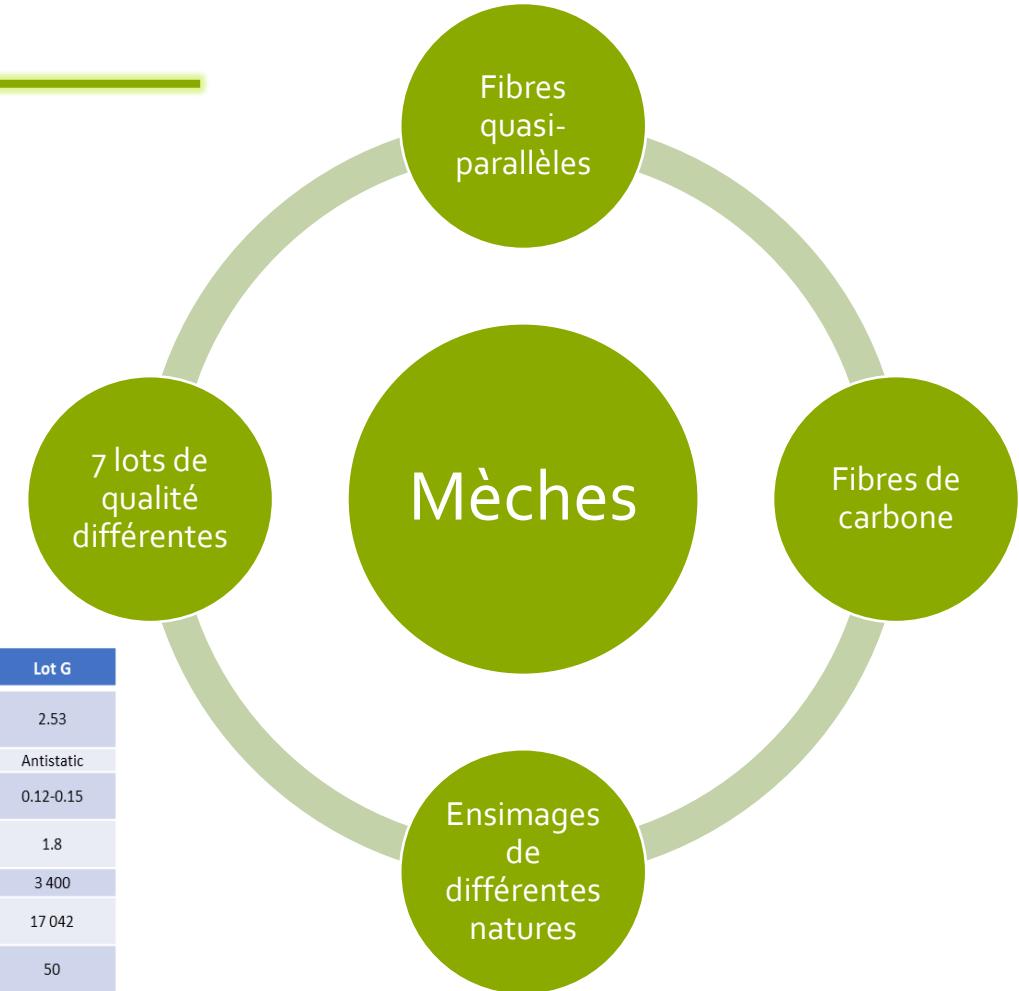
Il fournit également au réseau fibreux une partie de sa **cohésion**

Une cohésion très variable du réseau de fibres peut être obtenue → Joue un rôle clé dans certains procédés

# Contexte



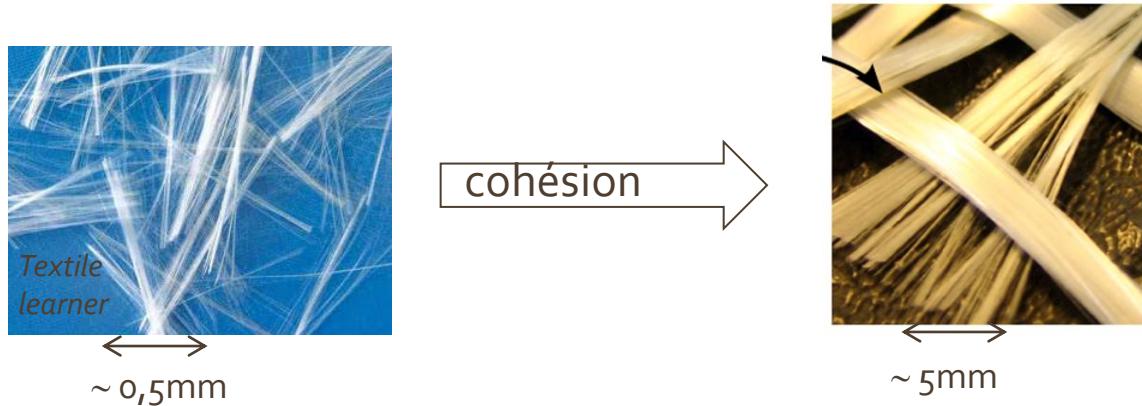
Procédé faisant appel à  
des transferts de fibres  
(aiguilletage)



	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

Caractérisation de la cohésion au sein de mèches de fibres de carbone

# Cohésion ?

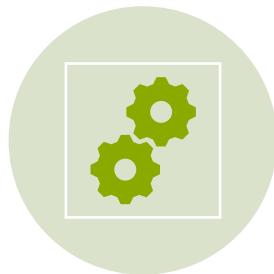


Intuitivement : Capacité des fibres à se mouvoir les unes par rapport aux autres

**MAIS**



DÉFINITION  
PRÉCISE ?



PARAMÈTRES  
INFLUENTS ?



QUANTITÉS  
REPRÉSENTATIVES ?



MESURES ?

# Cohésion ?

## Plusieurs phénomènes en jeu

- Matériaux
- État de surface des fibres
- Ensimage
- Tortuosité

Frottements  
inter-fibres



- Matériaux
- Pression de contact
- Enchevêtrement
- Surface de contact
  - Forme de section
  - Enchevêtrement
  - Longueur de fibres
  - Densité linéaire
  - Etat de surface

Contacts  
Latéraux



Comprendre, analyser,  
quantifier l'impact de ces  
paramètres sur **le procédé**  
de fabrication et donc sur  
**la cohésion**

Anticiper la bonne mise en  
œuvre du procédé sans  
campagne d'ajustement  
des paramètres

Essais qui impliquent la cohésion

# Cohésion ?

---

## Constat :

Essais à l'échelle micro  
longs et difficiles à  
mettre en œuvre



Stratégie applicable dans  
un contexte industriel  
(contrôle de réception)

# Cohésion ?

## Constat :

Essais à l'échelle micro  
longs et difficiles à  
mettre en œuvre

Réseau fibreux =  
intermédiaire entre 1  
fibre et matériau  
homogène équivalent  
→ cohésion

Stratégie applicable dans  
un contexte industriel  
(contrôle de réception)

# Cohésion ?

## Constat :

Essais à l'échelle micro  
longs et difficiles à  
mettre en œuvre

Réseau fibreux =  
intermédiaire entre 1  
fibre et matériau  
homogène équivalent  
→ cohésion

Réponse à certains  
chargements  
fortement  
influencée par la  
cohésion

Stratégie applicable dans  
un contexte industriel  
(contrôle de réception)

# Cohésion ?

## Constat :

Essais à l'échelle micro  
longs et difficiles à  
mettre en œuvre

Réseau fibreux =  
intermédiaire entre 1  
fibre et matériau  
homogène équivalent  
→ cohésion

Réponse à certains  
chargements  
fortement  
influencée par la  
cohésion

Essais à l'échelle  
mésoscopique

Stratégie applicable dans  
un contexte industriel  
(contrôle de réception)

# Cohésion ?

3 comportements identifiés comme sensibles à l'organisation des fibres et leurs interactions :

## Frottement mèche/mèche

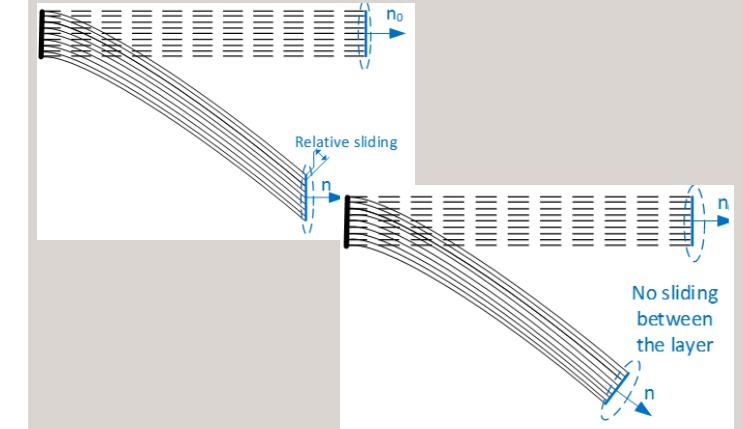
- Résistance au glissement des fibres
- Composant important de la cohésion
- Lié à plusieurs paramètres : surface de contact, rugosité, forme de section, entrelacement

## Cisaillement plan

- Rupture de la mèche en cisaillement
    - Directement lié à l'interaction entre les composants
- directement lié à la cohésion

## Flexion de mèche

- Directement liée à la cohésion entre les éléments constitutifs



# Cohésion ?

3 comportements identifiés comme sensibles à l'organisation des fibres et leurs interactions :

## Frottement mèche/mèche

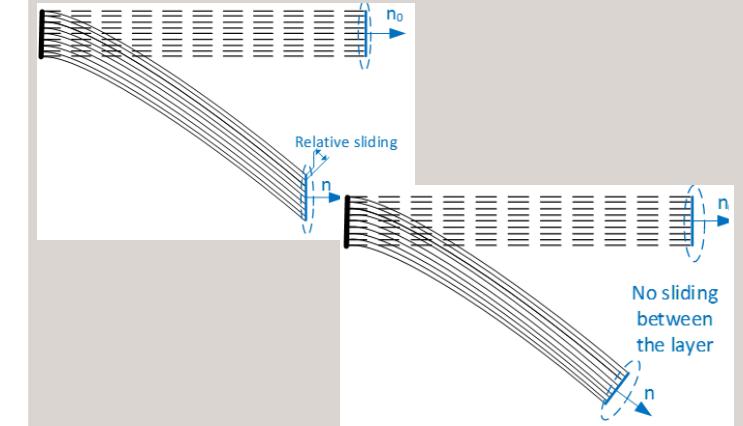
- Résistance au glissement des fibres
- Composant important de la cohésion
- Lié à plusieurs paramètres : surface de contact, rugosité, forme de section, entrelacement

## Cisaillement plan

- Rupture de la mèche en cisaillement
    - Directement lié à l'interaction entre les composants
- directement lié à la cohésion

## Flexion de mèche

- Directement liée à la cohésion entre les éléments constitutifs



+ lien avec la processabilité : évaluée de 0 à 5

# Cohésion ?

3 comportements identifiés comme sensibles à l'organisation des fibres et leurs interactions :

## Frottement mèche/mèche

- Résistance au glissement des fibres
- Composant important de la cohésion
- Lié à plusieurs paramètres : surface de contact, rugosité, forme de section, entrelacement

## Cisaillement plan

- Rupture de la mèche en cisaillement / rigidité de cisaillement
- Directement lié à l'interaction entre les composants  
→ directement lié à la cohésion

## Flexion de mèche

- Directement liée à la cohésion entre les éléments constitutifs

# Frottement mèche/mèche

## Protocole

### Paramètres

5essais par lots

5 cycles/essai

50kPa

5mm/s

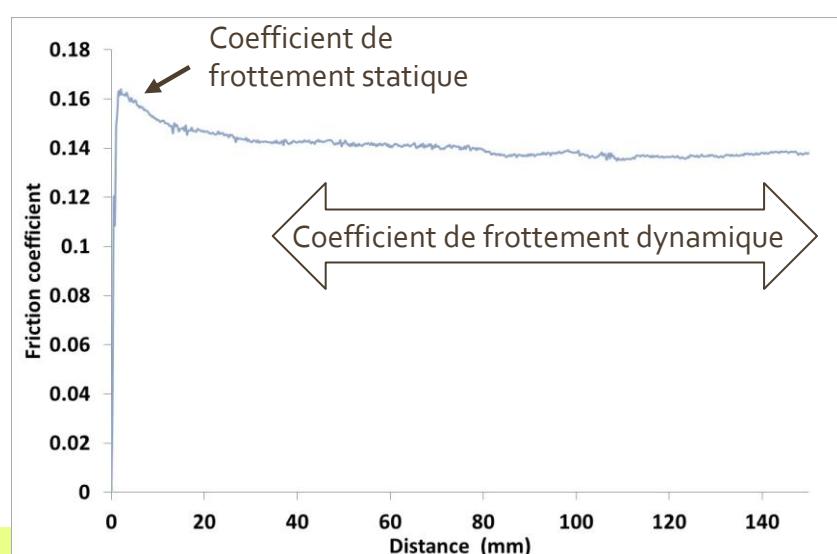
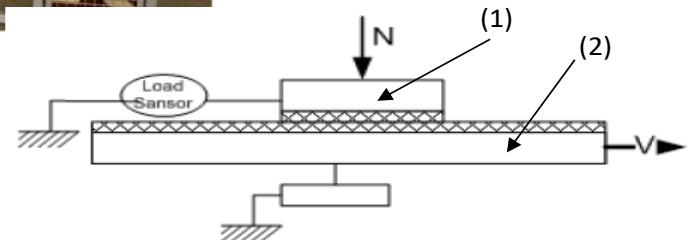
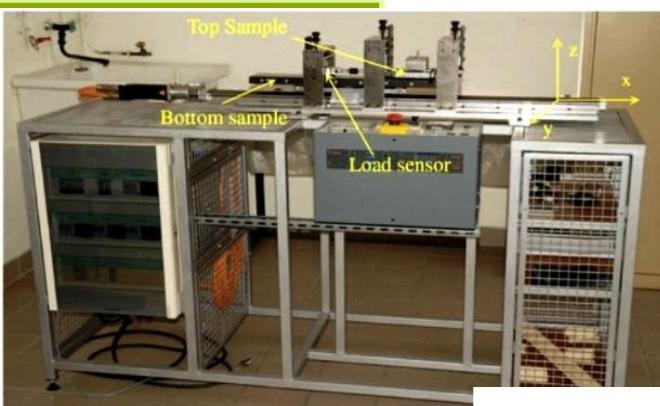
### Mesure de l'effort tangentiel

→ coefficient de frottement avec une loi de Coulomb

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

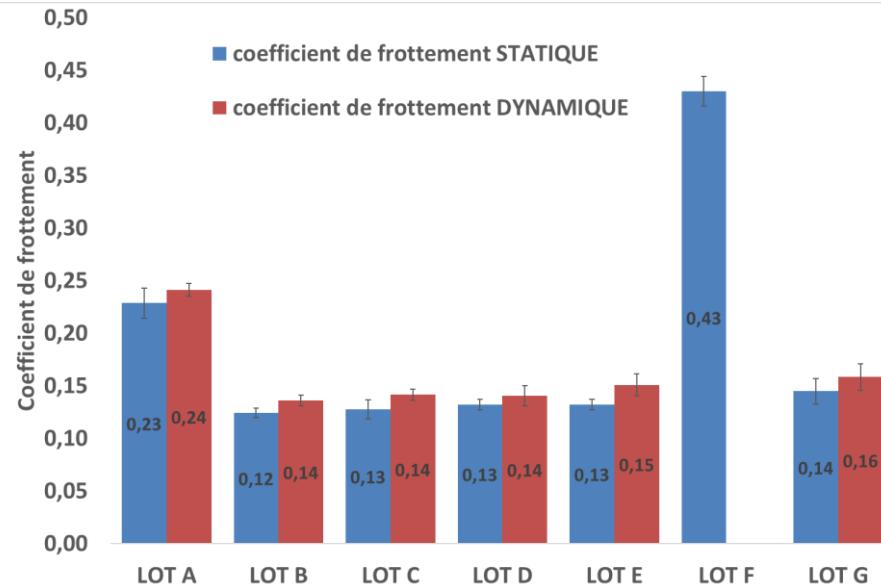
### Course type

Mesure des coefficients de frottement statique et dynamique pour chaque lot



# Frottement mèche/mèche

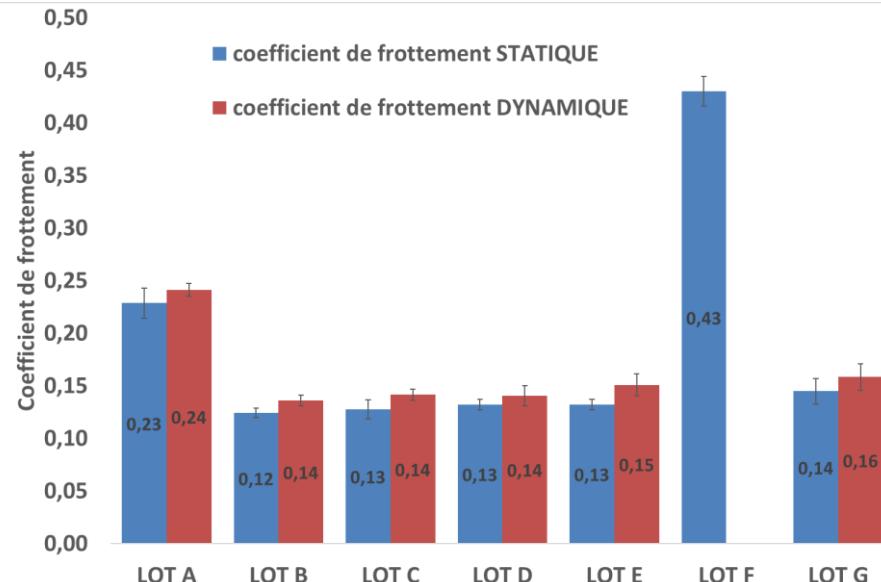
## Résultats



Différences entre des groupes de lots :  
 $F > A > (B, C, D, E, G)$

# Frottement mèche/mèche

## Résultats



Différences entre des groupes de lots :

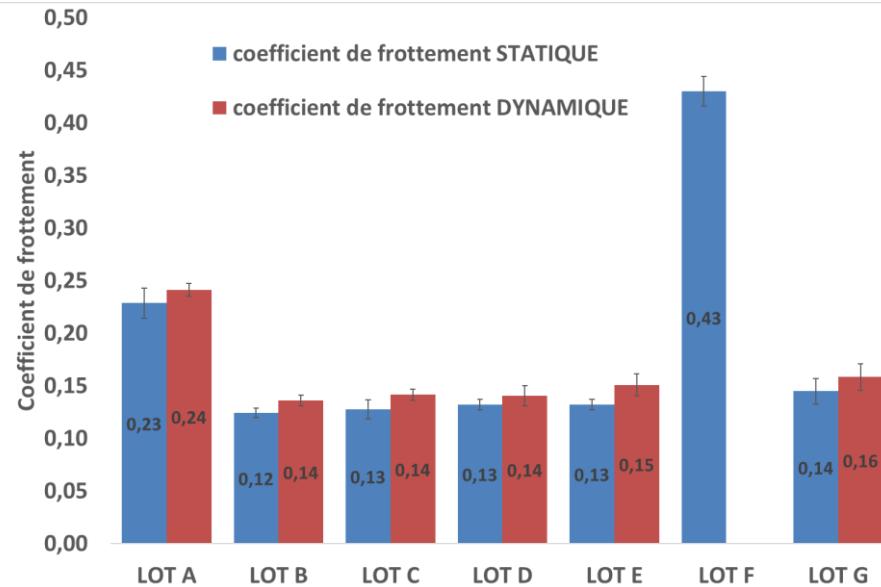
F > A > (B, C, D, E, G)

Lien avec les caractéristiques ?

	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

# Frottement mèche/mèche

## Résultats



Différences entre des groupes de lots :

$F > A > (B, C, D, E, G)$

Lien avec les caractéristiques ?

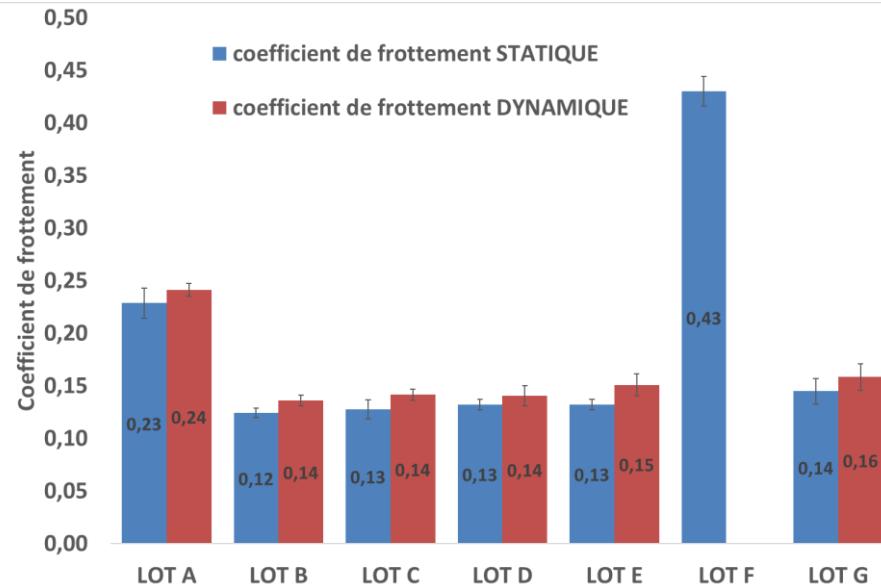
	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

Lots B, C, D, E, G : même type d'ensimage avec des taux différents (faibles)

- Écarts des coefficients de frottement non significatifs (de l'ordre de la dispersion)  
→ Pour des faibles taux d'ensimage, peu ou pas d'impact sur le coefficient de frottement

# Frottement mèche/mèche

## Résultats



Différences entre des groupes de lots :

$F > A > (B, C, D, E, G)$

Lien avec les caractéristiques ?

	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

Lots B, C, D, E, G : même type d'ensimage avec des taux différents (faibles)

- Écarts des coefficients de frottement non significatifs (de l'ordre de la dispersion)
- Pour des faibles taux d'ensimage, peu ou pas d'impact sur le coefficient de frottement

Lots A et F : type d'ensimage différent des autres lots

- Coefficients de frottement nettement différents des autres lots (65% et 113%)

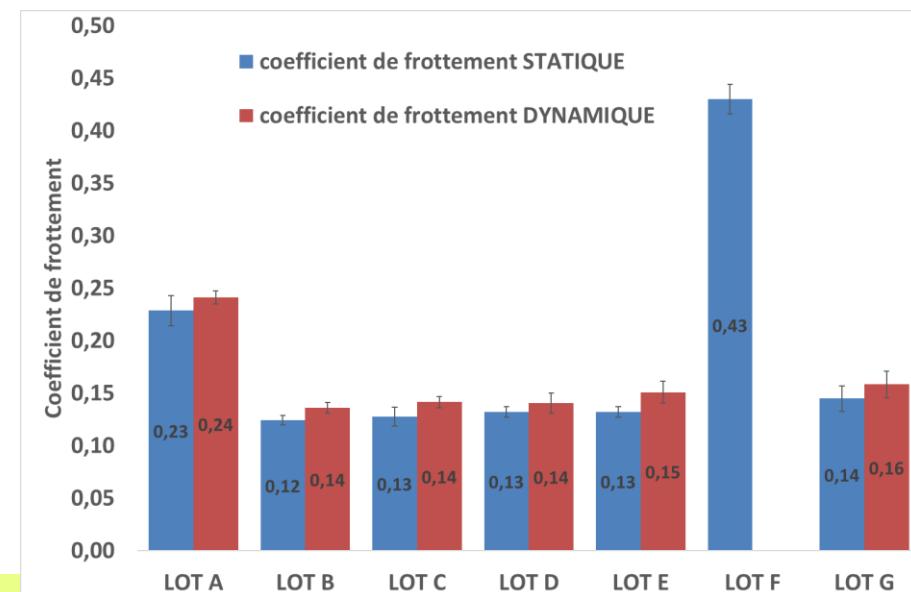
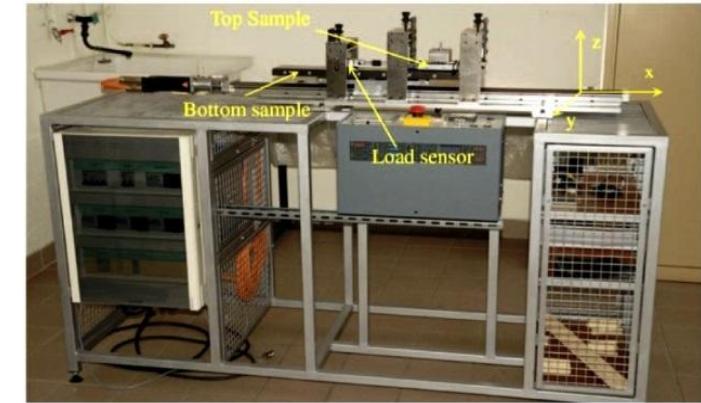
# Frottement mèche/mèche

## Conclusion



L'essai de frottement semble être un bon candidat pour discriminer le type d'ensimage

Ne permet pas de discriminer les variations de taux d'ensimage ou la qualité du roving



# Cohésion ?

3 comportements identifiés comme sensibles à l'organisation des fibres et leurs interactions :

Frottement  
mèche/mèche

Cisaillement plan

- Rupture de la mèche en cisaillement / rigidité de cisaillement
- Directement lié à l'interaction entre les composants  
→ directement lié à la cohésion

Flexion de mèche

- Directement liée à la cohésion entre les éléments constitutifs

# Cisaillement plan

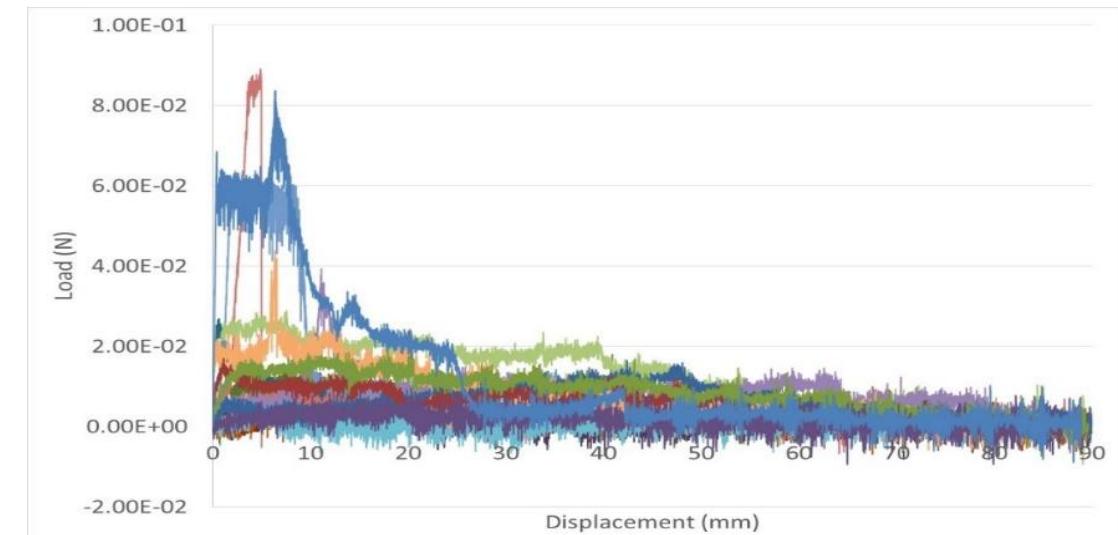
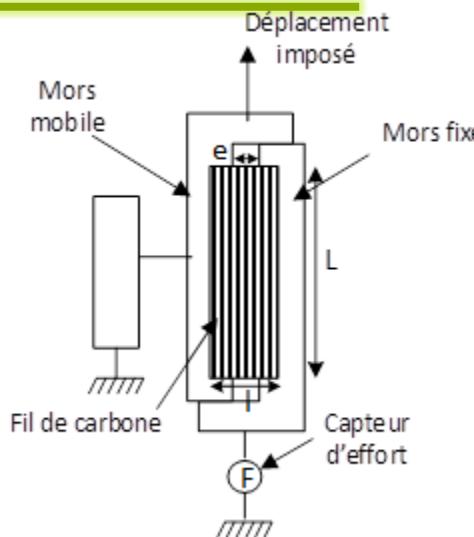
## Protocole

Cisaillement plan dans la direction longitudinale de la mèche  
20 essais par mèches

Mesure de l'effort de cisaillement en fonction du déplacement

Calcul de la contrainte au sens du matériau homogène équivalent

$$\tau = \frac{F_{cis}^t}{h * L_t}$$



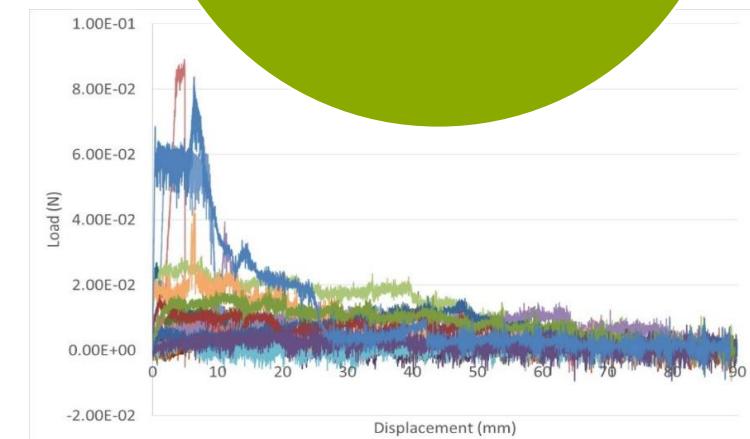
# Cisaillement plan

## Résultats

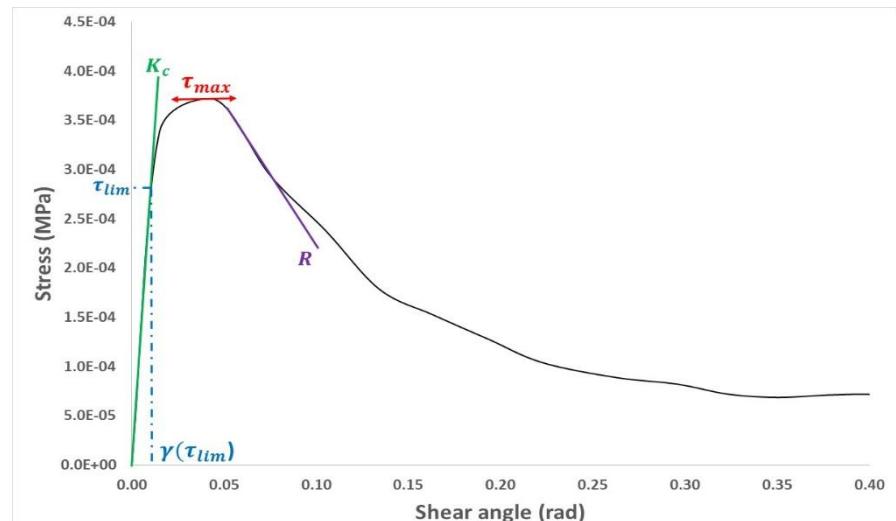
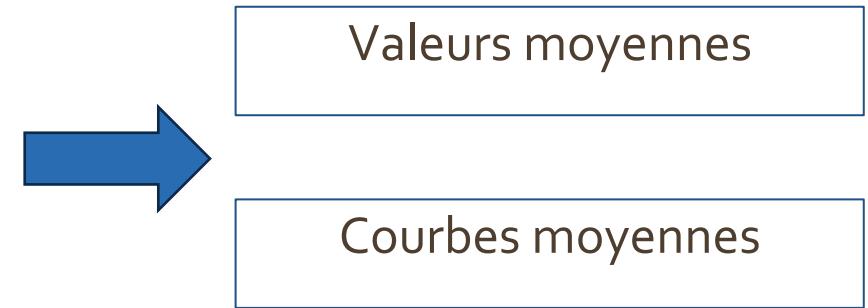
Séparation de la mèche au niveau de la zone la moins cohésive



Distribution non homogène de l'ensimage



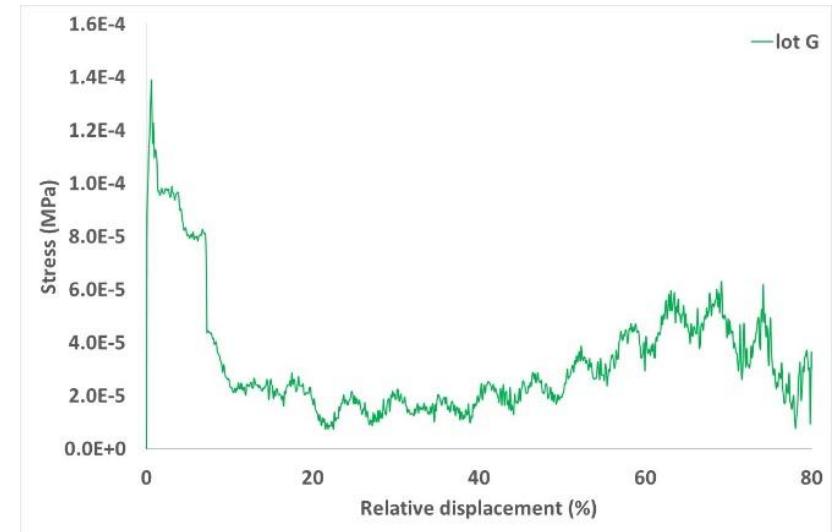
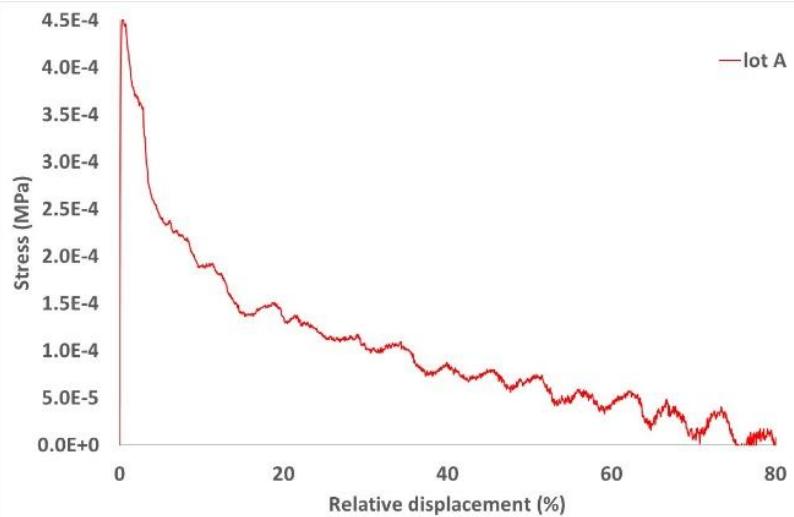
Fortes dispersions de la cohésion



# Cisaillement plan

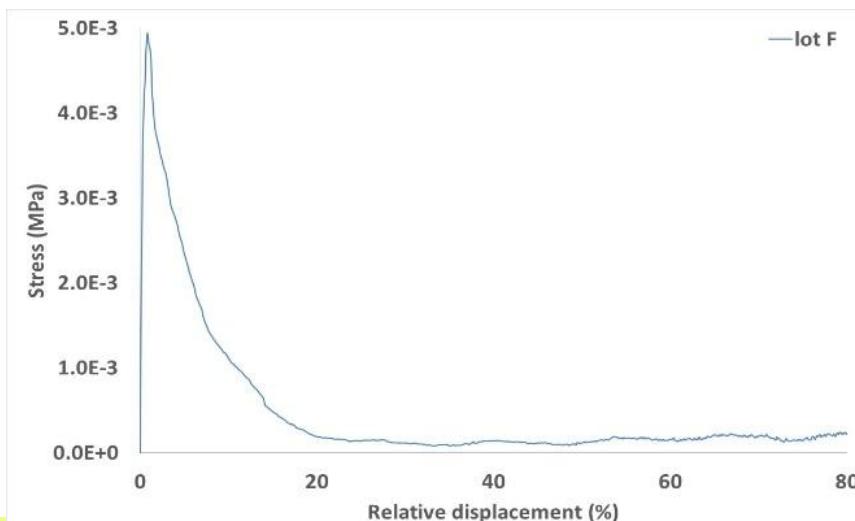
## Résultats : courbes moyennes

2 groupes de courbes :



**Montée en charge : brutale**  
**Contrainte maximale : pic**  
**Décharge : rapide**

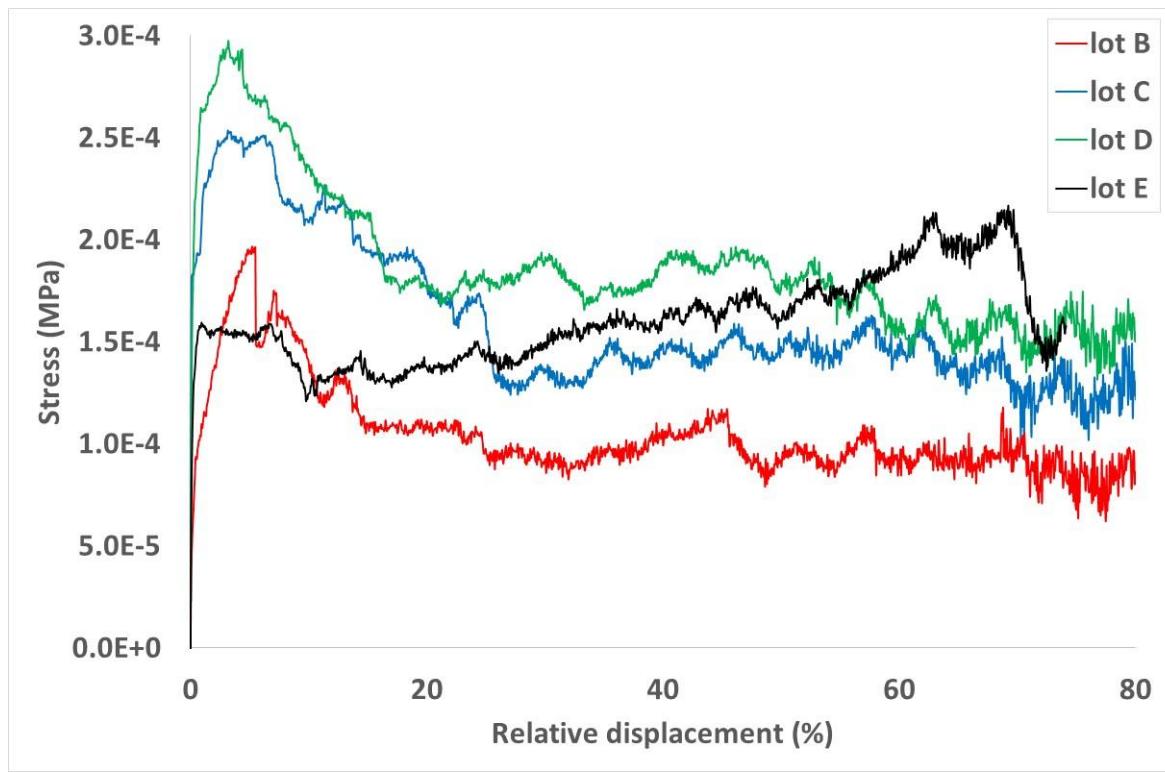
→ Chute soudaine de cohésion



# Cisaillement plan

Résultats : courbes moyennes

2 groupes de courbes :

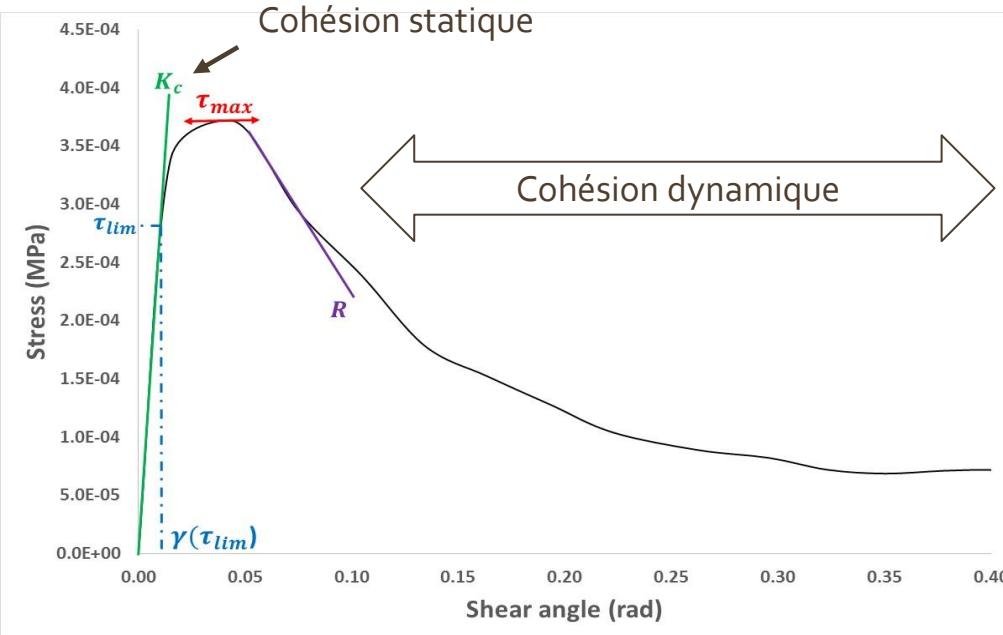


Montée en charge : moyenne à lente  
Contrainte maximale : plateau  
Décharge : lente

→ Décohésion progressive

# Cisaillement plan

## Résultats : courbes moyennes

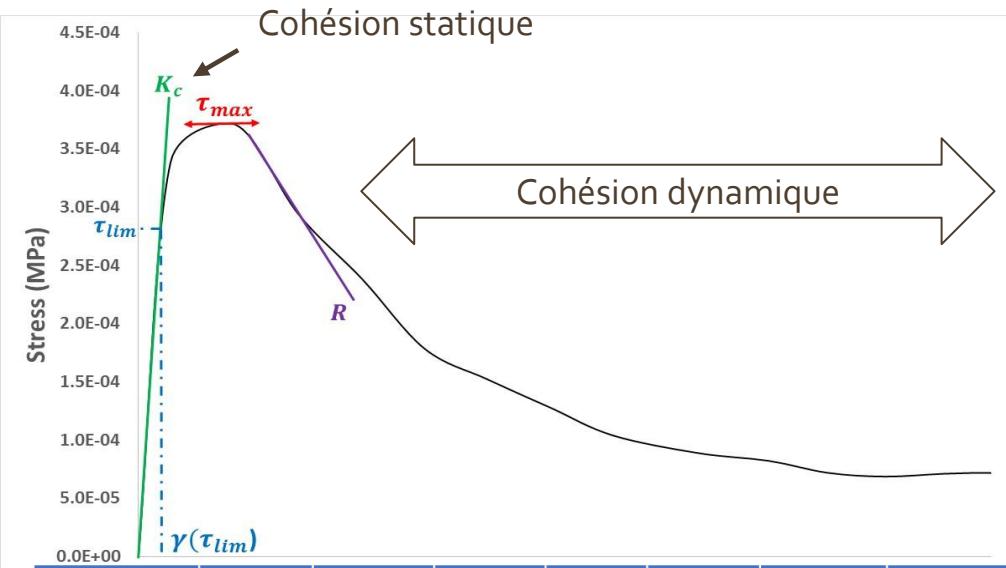


Impactée par la nature des fibres

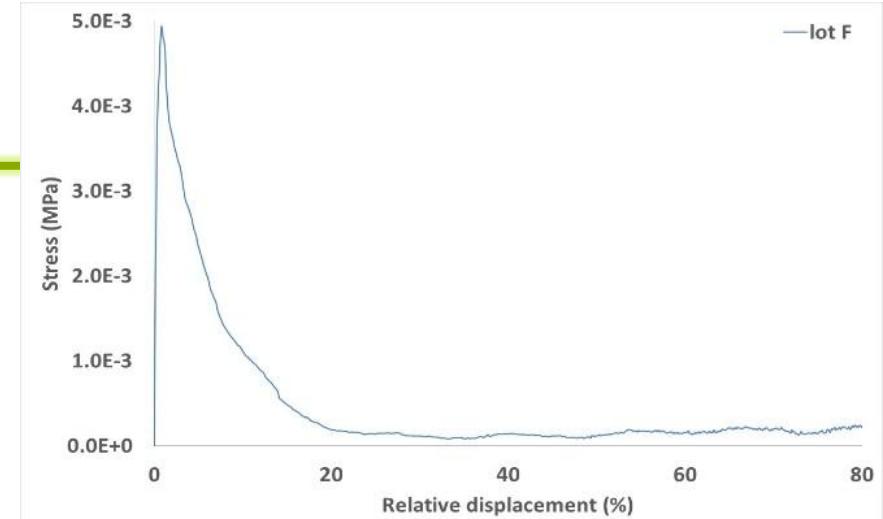
- Lisses et faiblement entrelacées (F et G)  
→ faible cohésion résiduelle
- Rugueuses et plus entrelacées : cohésion résiduelle plus élevée

# Cisaillement plan

## Résultats : courbes moyennes

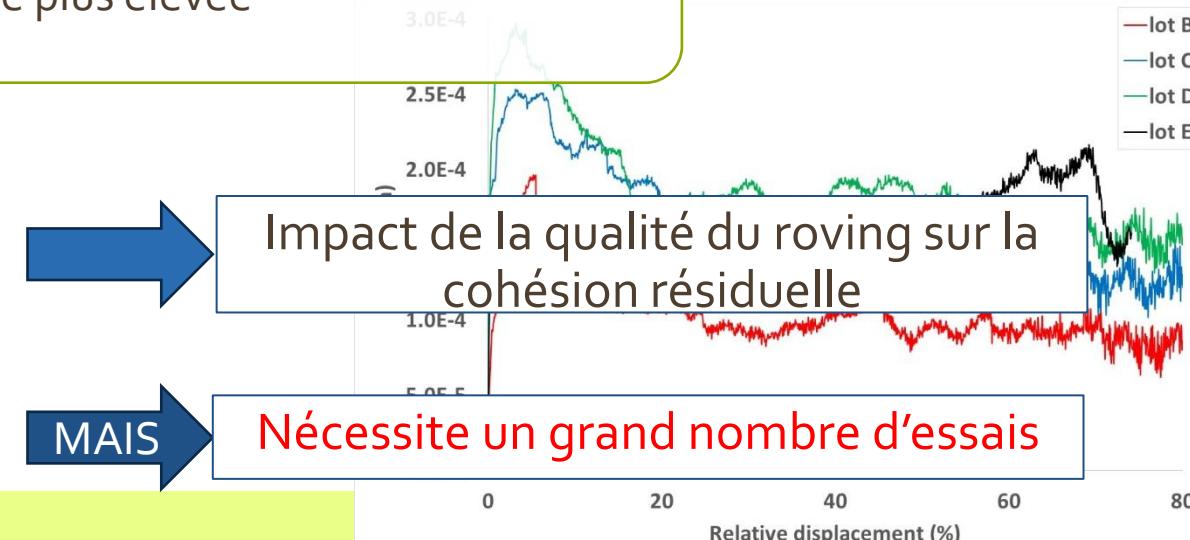


	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5



### Impactée par la nature des fibres

- Lisses et faiblement entrelacées (F et G)  
→ faible cohésion résiduelle
- Rugueuses et plus entrelacées : cohésion résiduelle plus élevée



MAIS  
Nécessite un grand nombre d'essais

# Cisaillement plan

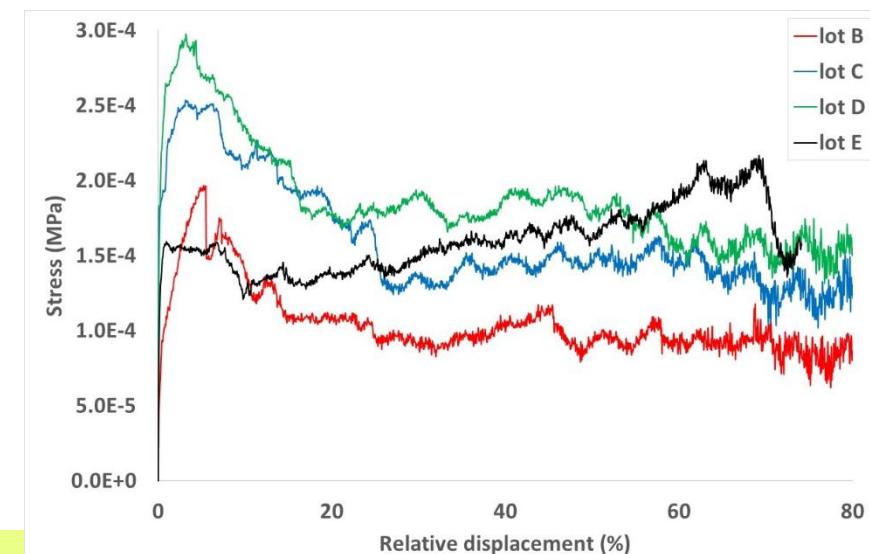
## Conclusion



L'essai de cisaillement plan semble être un bon candidat pour discriminer la qualité du roving

Permet de mettre en évidence un comportement global

Forte variabilité →  
Nécessite un grand nombre d'essais



# Cohésion ?

3 comportements identifiés comme sensibles à l'organisation des fibres et leurs interactions :

## Frottement mèche/mèche

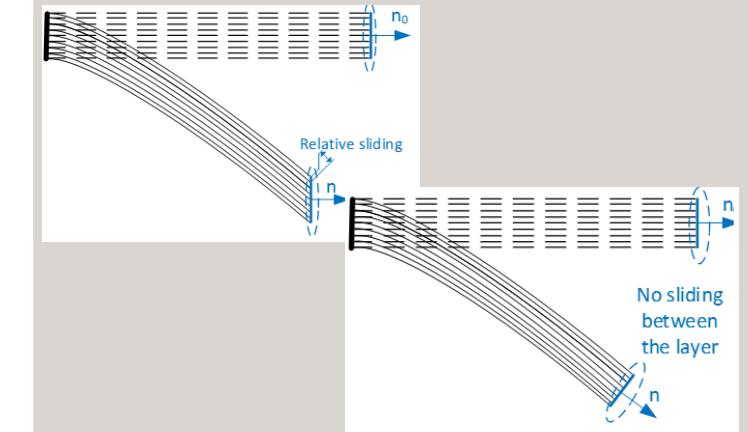
- Résistance au glissement des fibres
- Composant important de la cohésion
- Lié à plusieurs paramètres : surface de contact, rugosité, forme de section, entrelacement

## Cisaillement plan

- Rupture de la mèche en cisaillement / rigidité de cisaillement
- Directement lié à l'interaction entre les composants  
→ directement lié à la cohésion

## Flexion de mèche

- Directement liée à la cohésion entre les éléments constitutifs

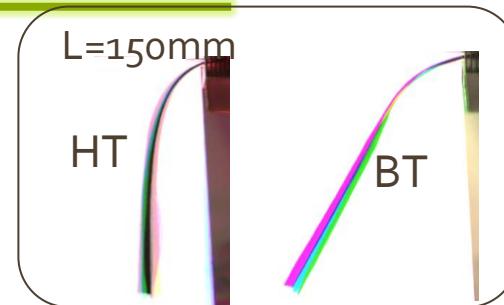


# Flexion

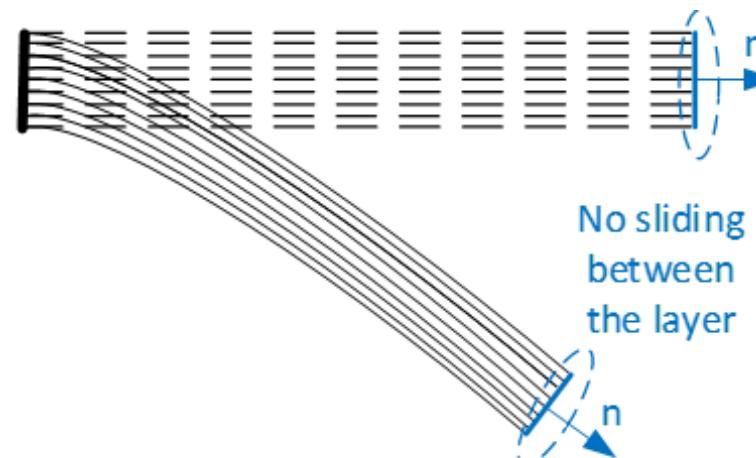
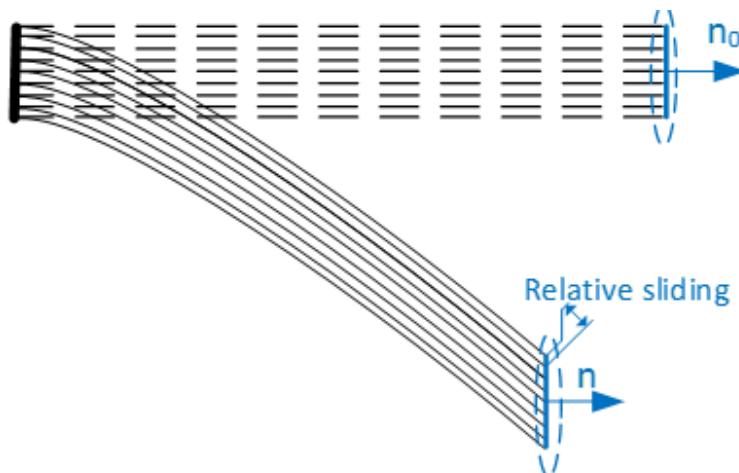
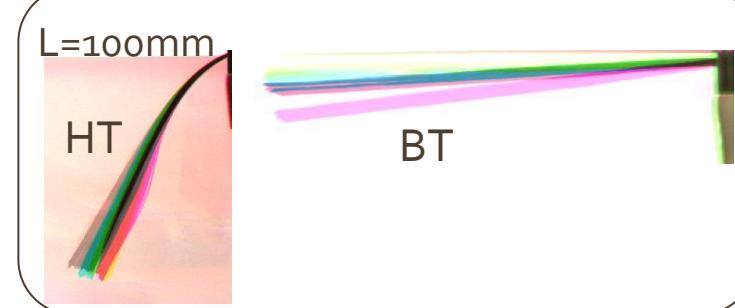
Résulte de 2 paramètres

Flexion des constituants

Cohésion entre les constituants



Répétabilité → cohérence globale entre les échantillons d'un même lot



No sliding between the layer

# Flexion

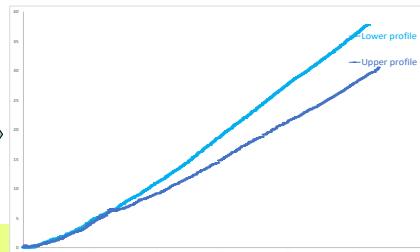
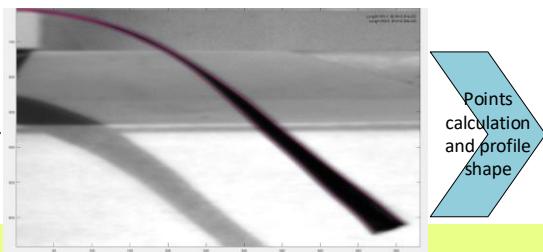
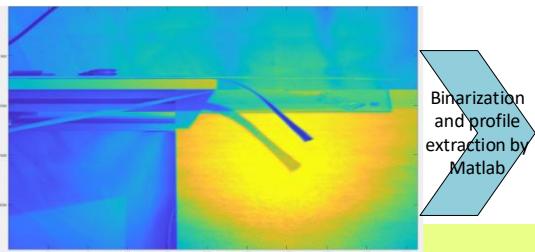
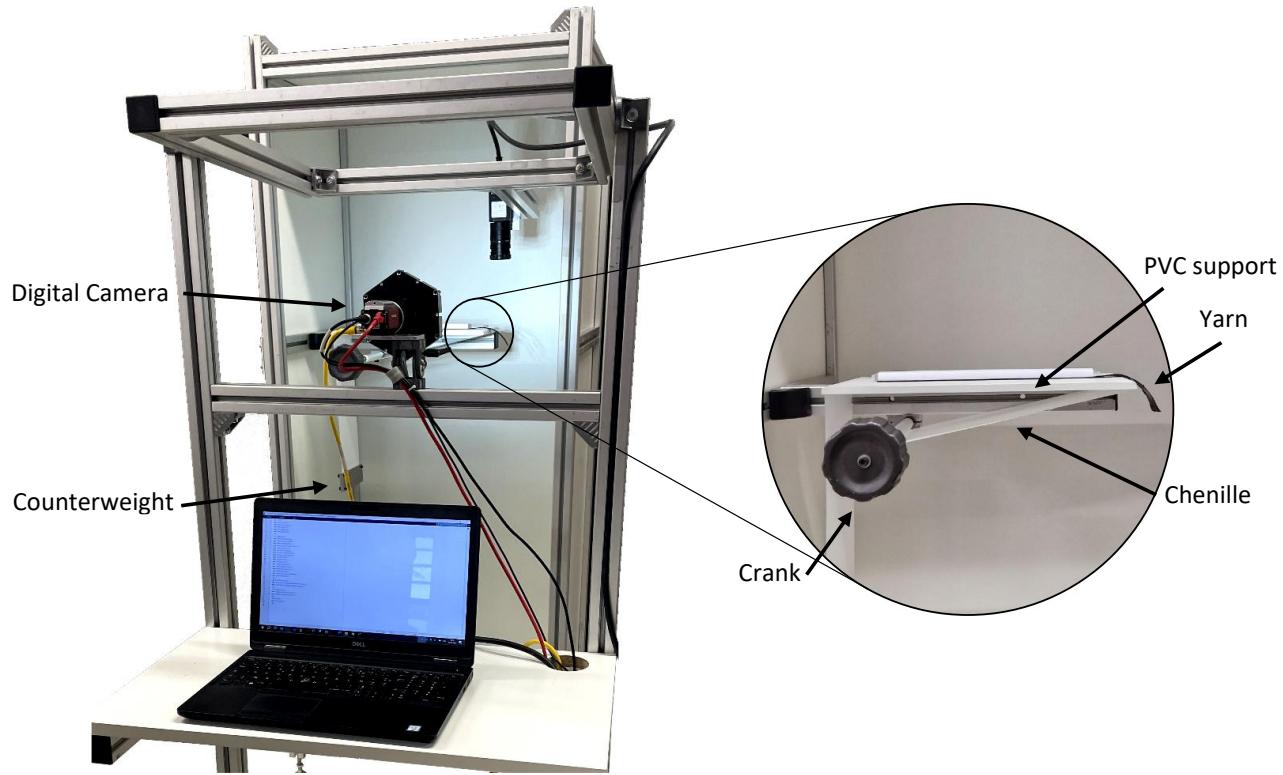
## Protocole

Flexion sous poids propre

Mesures optiques → détection de profils

10 essais par type de lot

5 longueurs de surplomb analysés  
(70mm, 90mm, 100mm, 120mm, 150mm)  
→ traitement d'images par Matlab



Extraction du profil supérieur

# Flexion

## Résultats

Résultats similaires pour chaque lot :

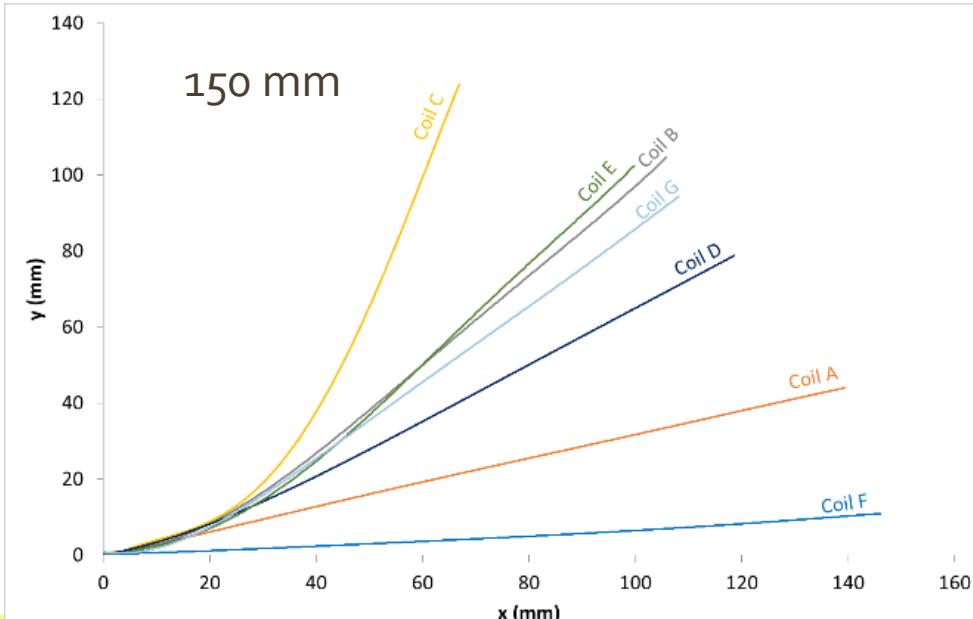
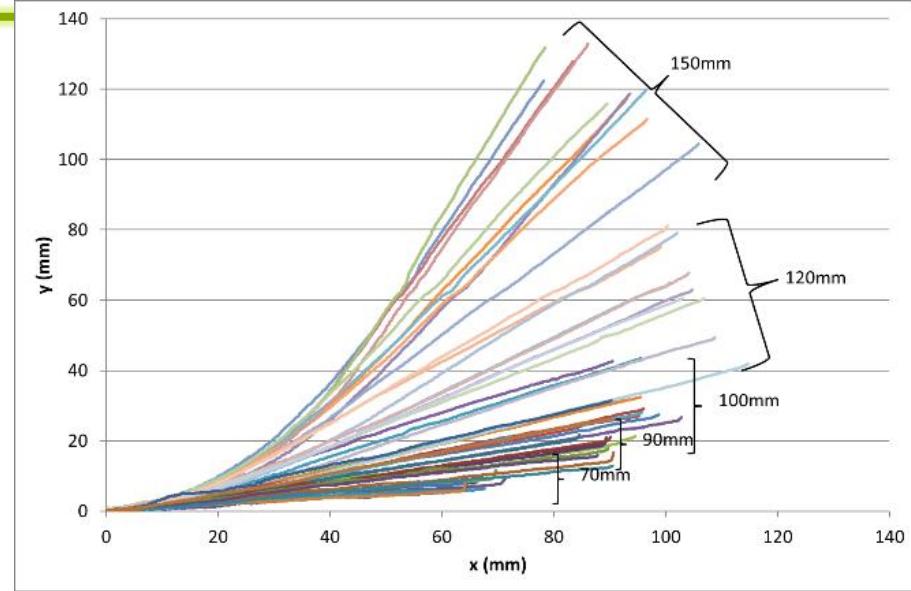
- Forte variabilité du comportement en flexion pour chaque lot
- Une explication : forte hétérogénéité de la répartition de l'ensimage le long de chaque mèche

→ Nombreux essais nécessaires

→ Comportement moyen → courbes moyennes

- Profils de flexion très différents, même pour des mèches de constitutions similaires
- MAIS, profils de flexion dépendent aussi de la géométrie de la section et du matériau → on ne peut comparer que les mèches de **même section** (forme et dimensions) et de **même densité** !

Ici : lots A, B, C, D, E



# Flexion

## Résultats

### Variations significatives des profils

→ cet essai permet de bien discriminer les lots avec des taux d'ensimage proches

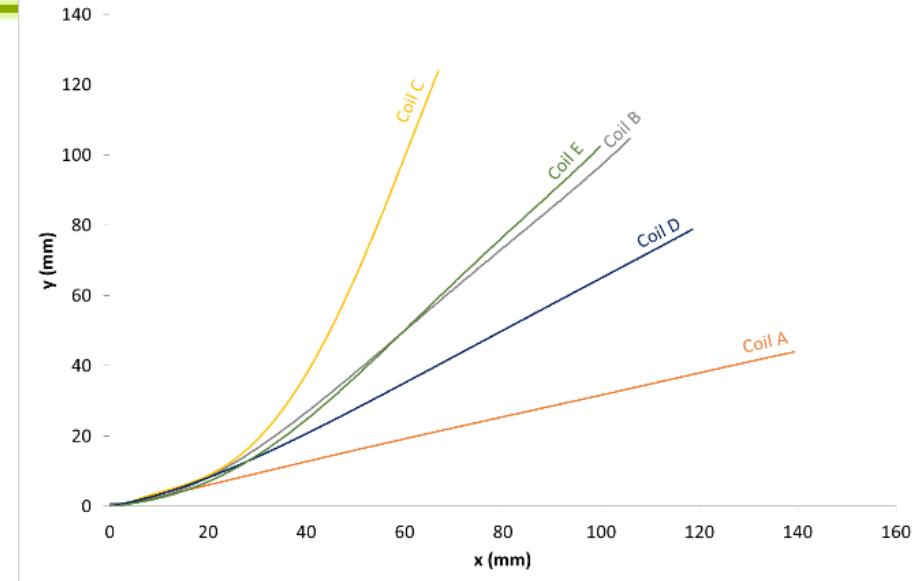
+ lien avec la processabilité

?

Au-delà de la processabilité, on pourrait remonter à un ordre de grandeur du taux d'ensimage à partir du cpt en flexion ?

Flexion = bon candidat pour faire apparaître la différence de cohésion entre différentes mèches

→ ? Mais si les mèches sont de structures différentes ???

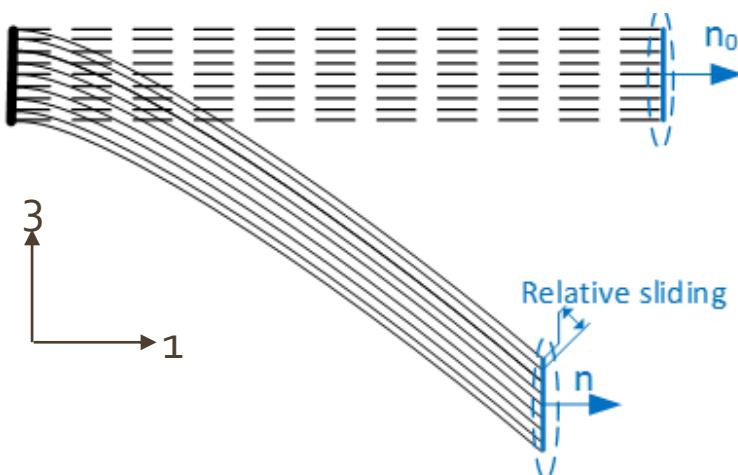


A>D>B≈E>C

	Lot A	Lot B	Lot C	Lot D	Lot E	Lot F	Lot G
Titre ( $g.m^{-1}$ )	2.86	2.98	3.04	2.99	2.67	0.60	2.53
Type d'ensimage	Epoxy 1	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Antistatic	Epoxy 2	Antistatic
Taux d'ensimage (%)	0.46	0.10	0.10	0.25	0.10	0.15	0.12-0.15
Densité ( $X 10^{-9} t.mm^{-3}$ )	1.82	1.82	1.82	1.81	1.82	1.78	1.8
Effort à rupture (N)	3 090	2 975	3 280	3 135	3 280	> 2 700	3 400
Module d'Young (MPa)	45 200	37 602	42 635	42 226	37 506	36 991	17 042
Nombre de fibres $X 10^3$	50	50	50	50	50	12	50
Largeur de section (mm)	8.0	10.0	9.0	9.0	9.0	3.5	19.0
Hauteur de section (mm)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0
Qualité	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Industrielle	Aéronautique	Intermédiaire
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

# Flexion

## Comparaison de mèches de structures différentes



Définition d'une rigidité de flexion équivalente

intrinsèque à la structure fibreuse

Indépendante des dimensions de la mèche

Rappel : stratégie doit être rapidement implémentable dans un contexte industriel

→ Approche basée sur la mécanique des milieux homogènes → mèche = matériau homogène équivalent → capacité à fléchir directement liée à G13

# Flexion

## Comparaison de mèches de structures différentes

1<sup>ere</sup> approche simplifiée

Simulation du comportement de la mèche en flexion sous poids propre



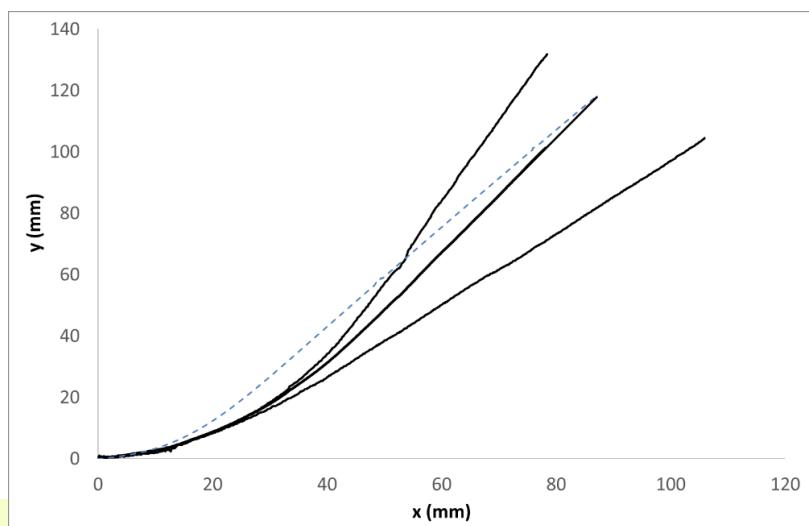
Experimental profile



Numerical profile

Identification inverse du module de cisaillement qui reproduit « au mieux » la forme du profil de flexion

Difficultés à reproduire la courbure

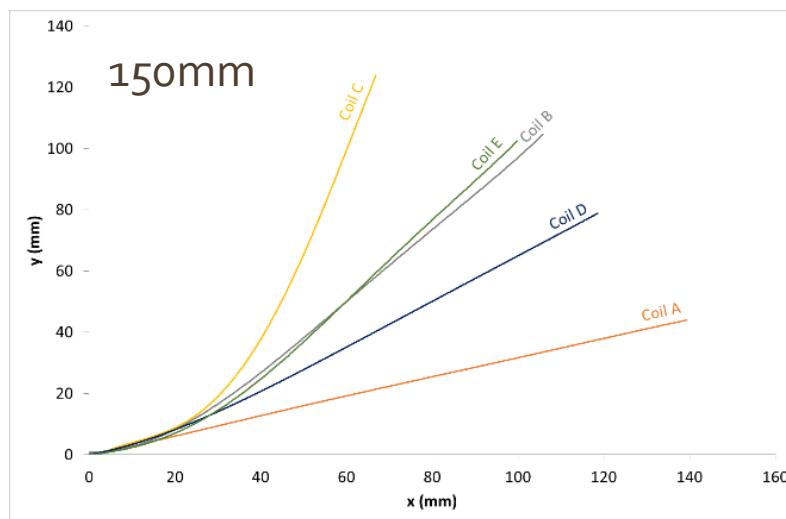
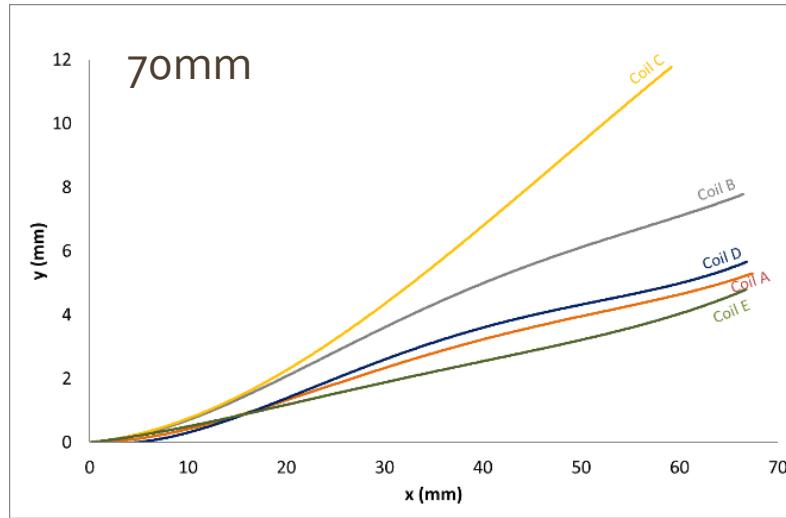


Lot	A	B	C	D	E	F	G
$G_{13} (.10^{-2} MPa)$	6,325	2,475	1,65	3,85	2,75	12,375	1,375
Processabilité	0	5	5	3	5	2	5

F>>A>D>E≈B>C≈G

# Flexion

## Conclusion



Bon candidat pour discriminer les différences de cohésion de mèches de même nature

+ Différences locales de cohésion

Pour les longueurs élevées, lien avec la processabilité

Fait apparaître, comme le cisaillement :

- une **cohésion statique** : faible glissement longitudinal des fibres les unes/aux autres
- une **cohésion dynamique** : glissement longitudinal possible

Développement d'une stratégie pour différencier les lots de natures différentes → à développer, améliorer

# Bilan cohésion

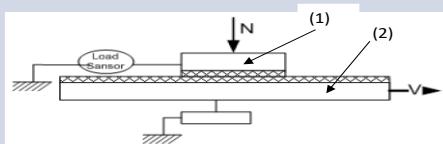
3 essais pour analyser la cohésion d'un réseau fibreux

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

*Symétrie*

## Frottement mèche/mèche

- Permet de discriminer le type d'ensimage
- pas suffisant pour caractériser la cohésion



## Cisaillement plan

- Bon candidat
- Long et difficile à mettre en œuvre
- Forte dispersion des résultats
- Quantités mécaniques facilement obtenues
- Permet de capter un comportement **global**



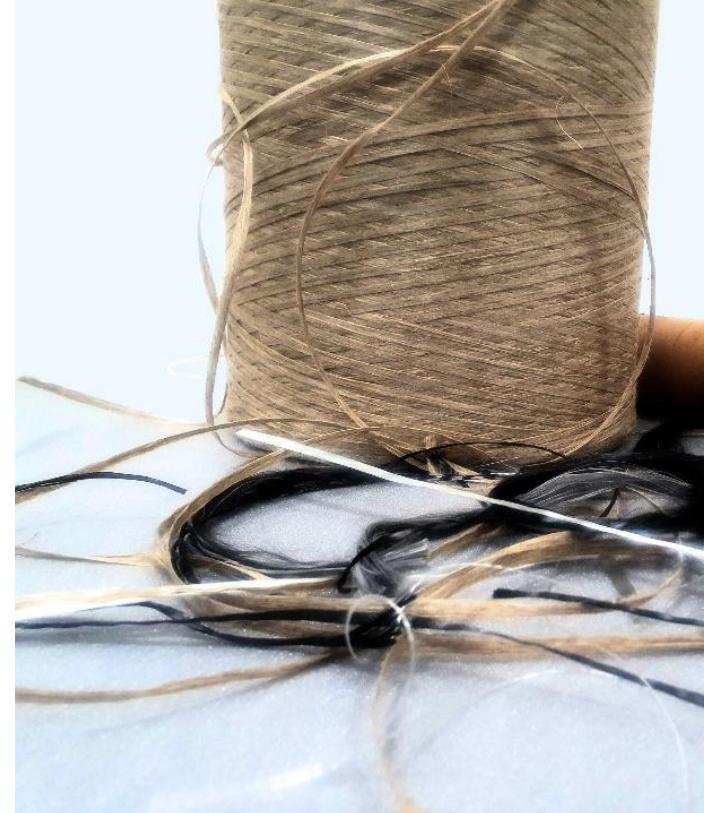
## Flexion de mèche

- Très bon candidat
- Simple à réaliser
- Moins dispersé que le cisaillement
- Sensible aux différences de cohésion
- Quantité intrinsèque plus difficile à obtenir : nécessite d'implémenter des lois de comportement plus précises
- Permet de capter un comportement **local**





# Conclusion Générale



# Conclusion

- Le chemin est encore long pour capter et comprendre l'ensemble des phénomènes
- Caractériser le comportement de mèches de fibres nécessite de nombreuses précautions
  - Condition aux bords
  - Condition d'essais
  - Précision souhaitée → Objectif ?

Que cherche-t-on ?

Quel(s) essai(s)

Quel(s) indicateur(s)

Comportement moyen ?

Comportement /Phénomène local ?

Etc.





MERCI DE  
VOTRE  
ATTENTION