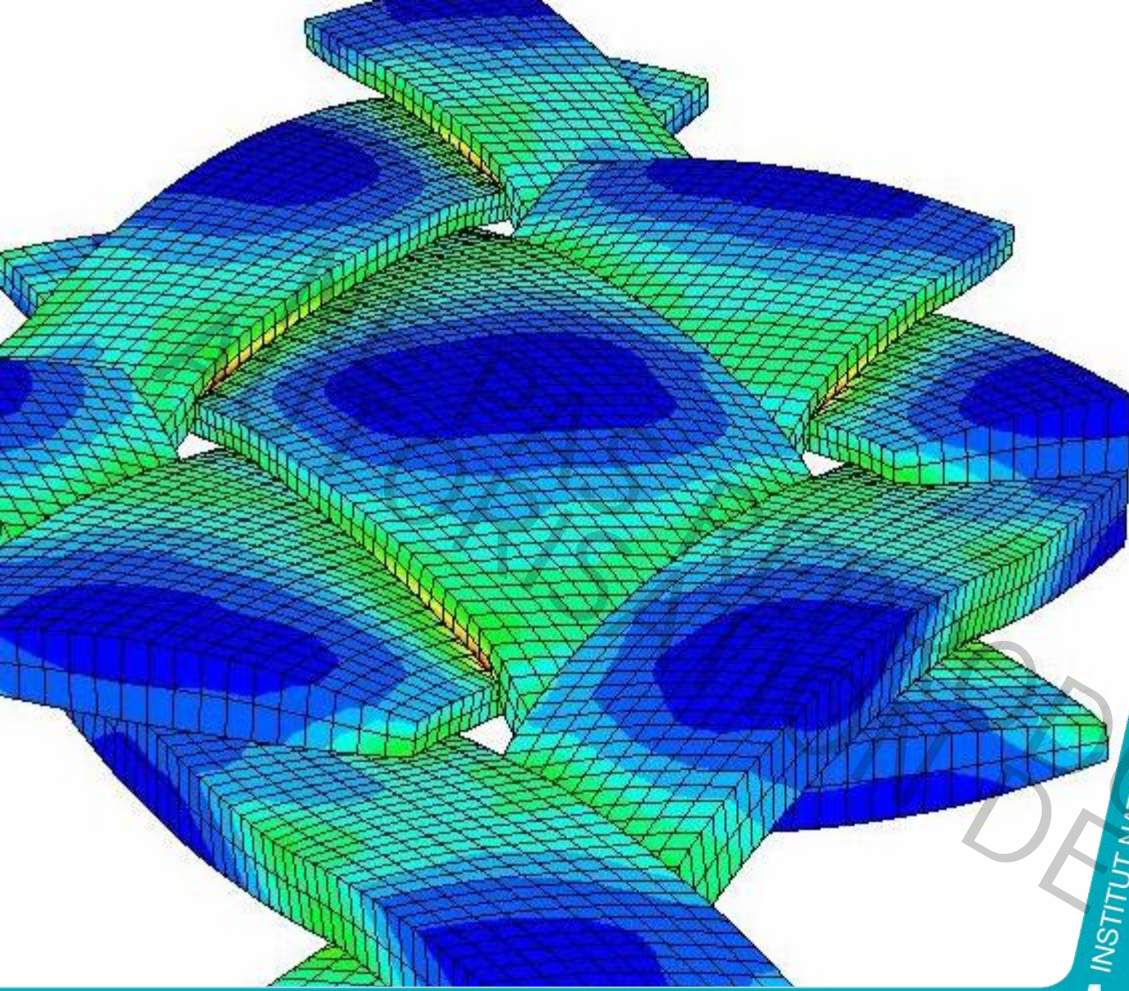




INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON



MECAMAT

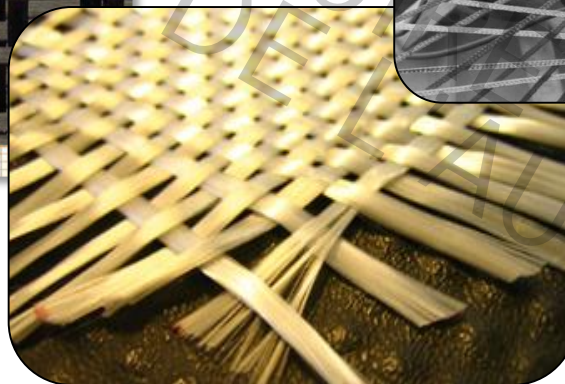
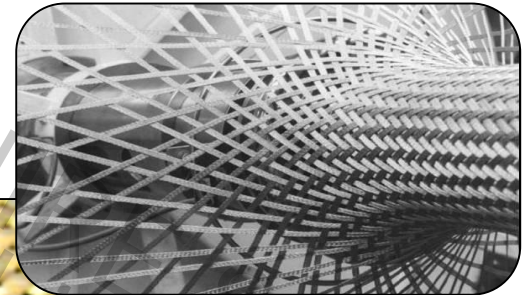
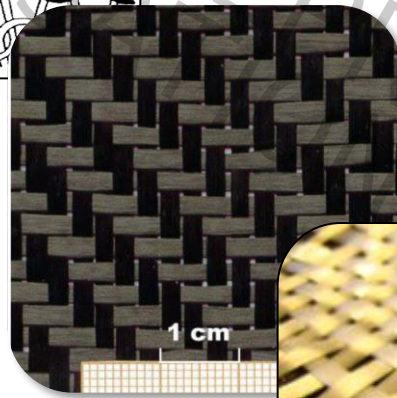
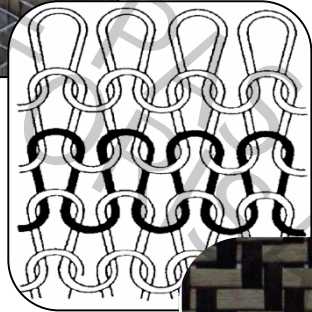
Aussois 2014

Comportement mécanique des renforts tissés

Emmanuelle Vidal-Sallé

FORMATION





Contenu

- Motivations
 - Dans quelles circonstances a-t-on besoin de connaître le comportement mécanique du renfort seul?
 - Quelle modélisation pour quelle finalité
- Comportement mécanique des renforts de fibres continues
 - Ce que l'on peut observer
 - Ce qui peut être attribué aux mèches
 - Ce qui est lié à leurs interactions
- Comportement à l'échelle de la mèche : de l'observation à la modélisation
 - Les différentes approches de modélisation
 - Les écueils à éviter
- Identification du comportement et modélisation éléments finis
 - Comment s'y prendre
 - Quelles sont les principales difficultés

Motivations

- Savoir prédire l'apparition de défauts lors de la fabrication d'une structure composite

Echelle microscopique



- Rupture de fibres
- Flambements de fibres

Echelle mésoscopique



- Détissages
- Zones sèches
- Zones sans fibres

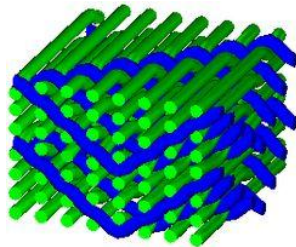
Echelle macroscopique



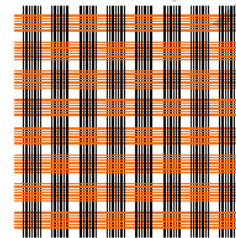
- Apparition de plissements

Motivations

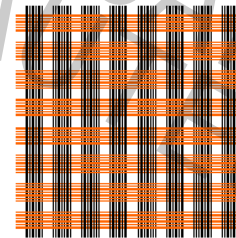
- Qu'est-ce qu'un tissu ?
 - Entrelacement d'au moins deux réseaux de fils caractérisé par
 - Une armure
 - Une densité de renfort
 - Un embuvage
 - Un type de mèche
 - Un type d'ensimage



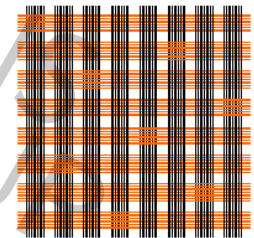
Taffetas



Sergé 2x2

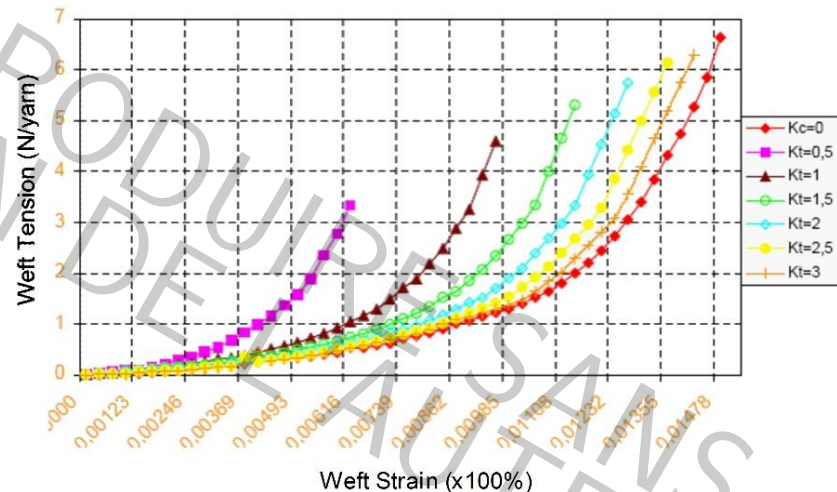
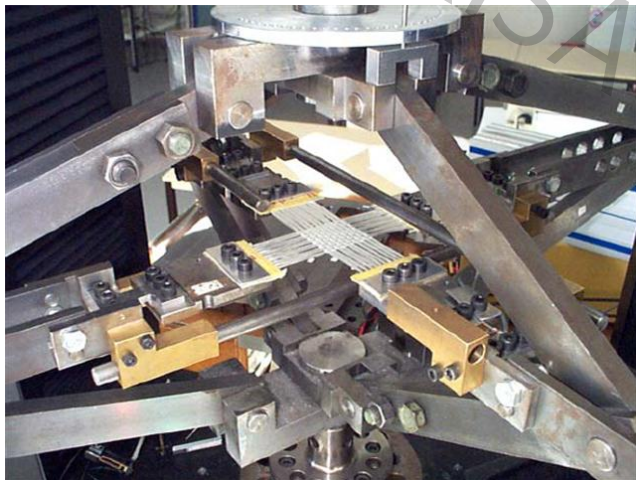


Satin de 8



Comportement mécanique des renforts

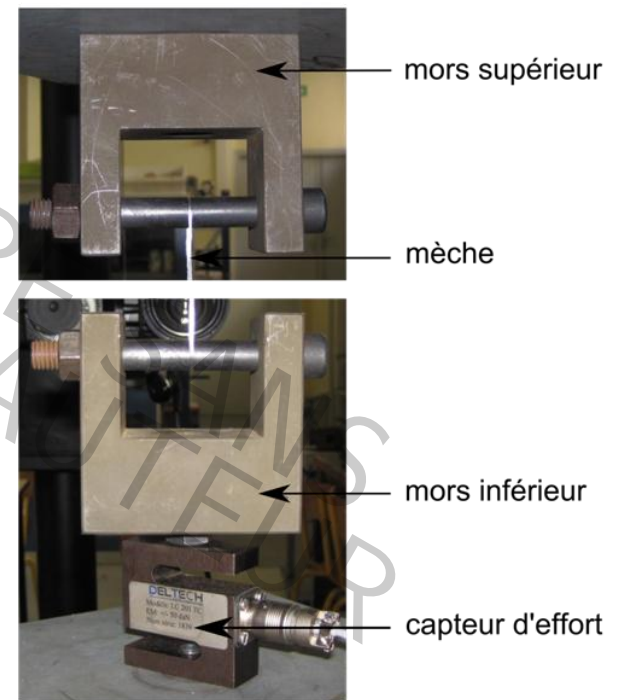
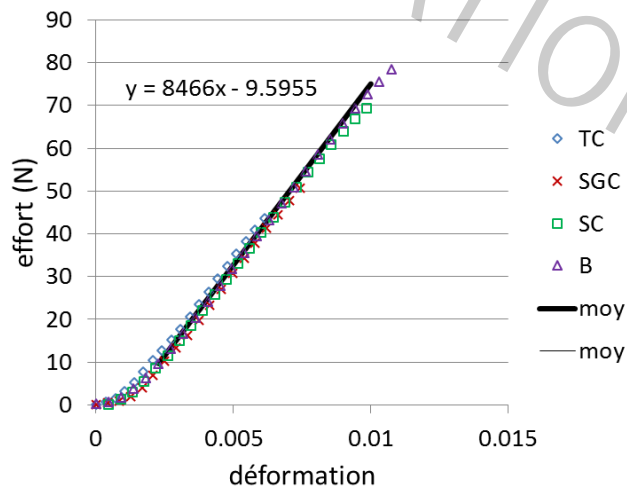
- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - Comportement en tension d'un réseau dépendant de l'état de déformation du second réseau $\Rightarrow$ **essais de traction biaxiale**



[Buet-Gautier K., Boisse P. – *Experimental Analysis and Modeling of Biaxial Mechanical Behavior of Woven Composite Reinforcements* – Experimental Mechanics 41-3 (2001) 260–269]

Comportement mécanique des renforts

- Essais de traction
 - La courbe de traction simple sur le fil est complexe à réaliser
 - Est assez différente entre les fils (retordus ou non)

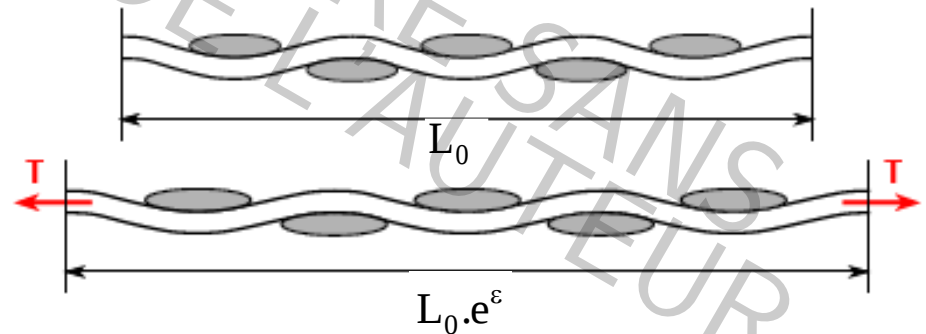
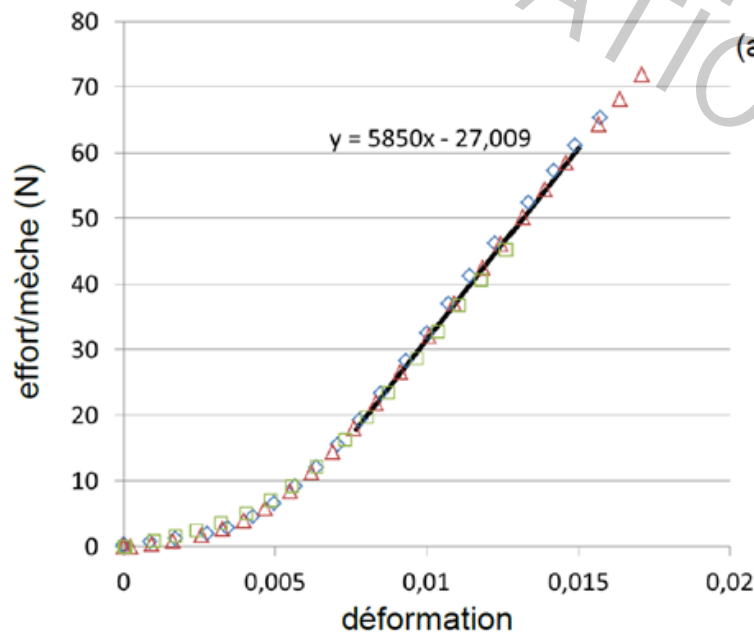


Comportement mécanique des renforts



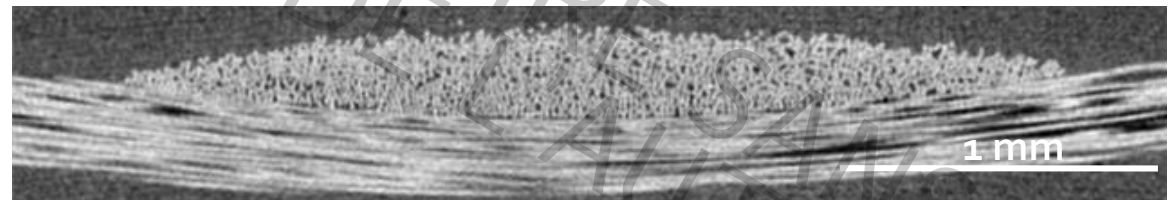
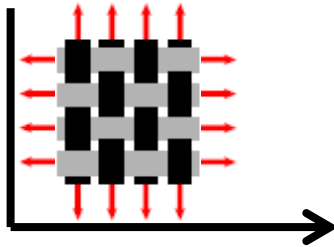
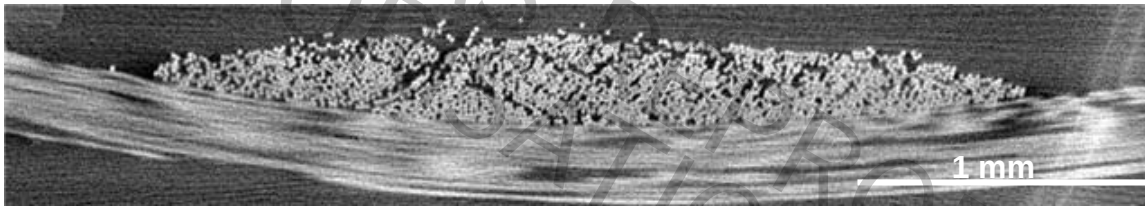
- Essais de traction

- La courbe de traction simple sur le tissu est fortement non linéaire pour des déformations faibles puis devient linéaire
 - La non linéarité a une cause géométrique et matérielle



Comportement mécanique des renforts

- Essais de traction

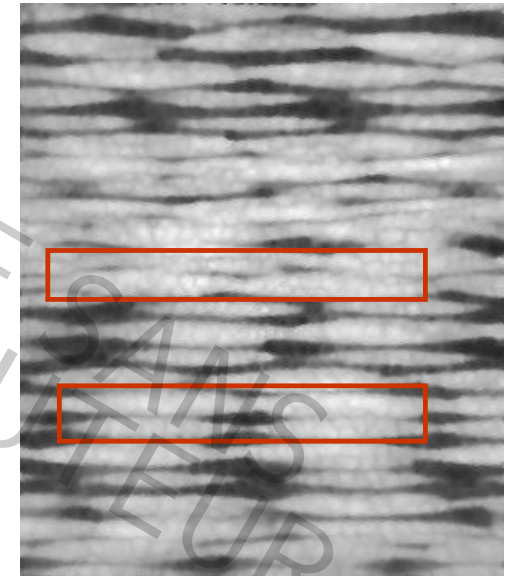
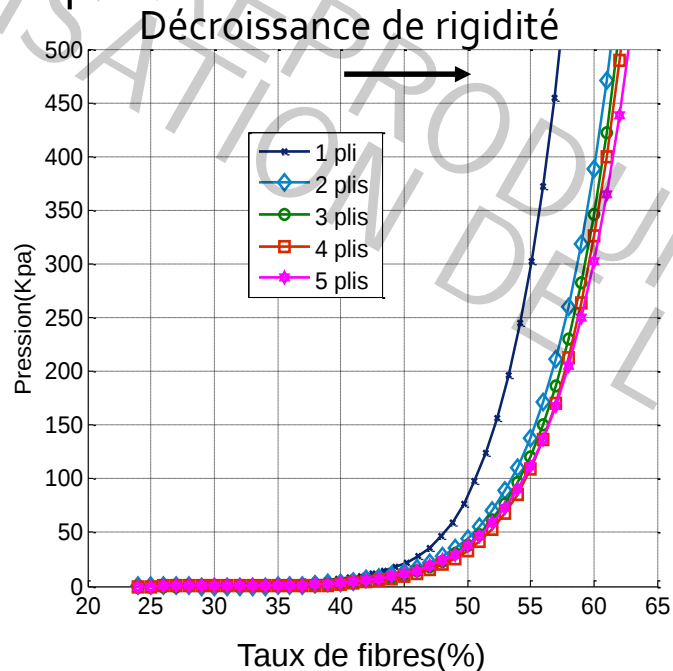
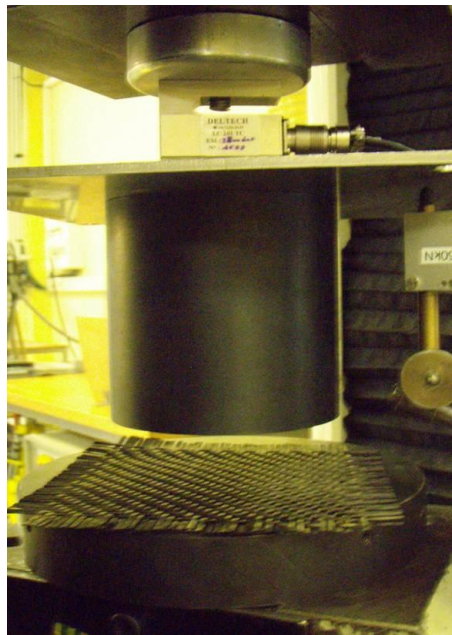


Mode de déformation en compaction

Tension de 11 N
 $S / S_0 = 0,86$

Comportement mécanique des renforts

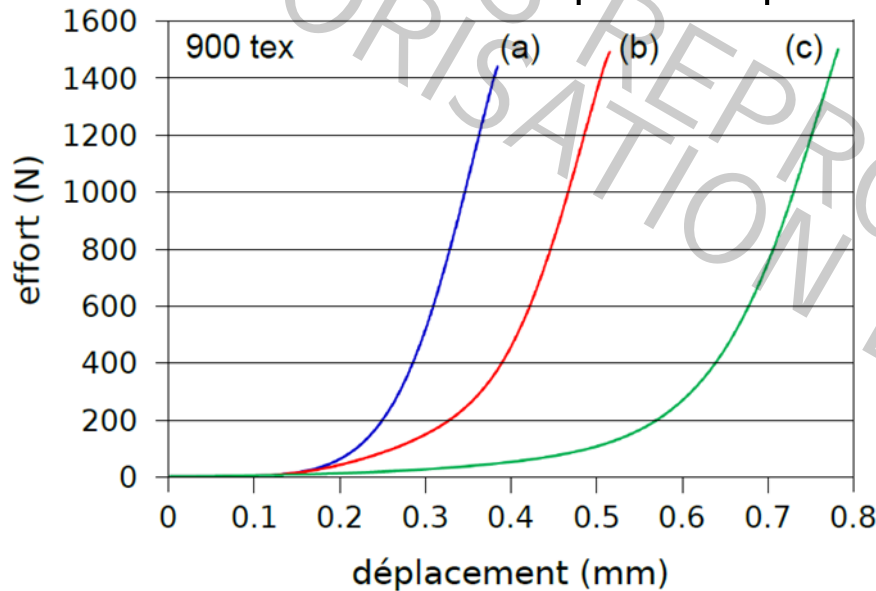
- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - La grande présence de pores dans la mèche rend le matériau très souple en compaction



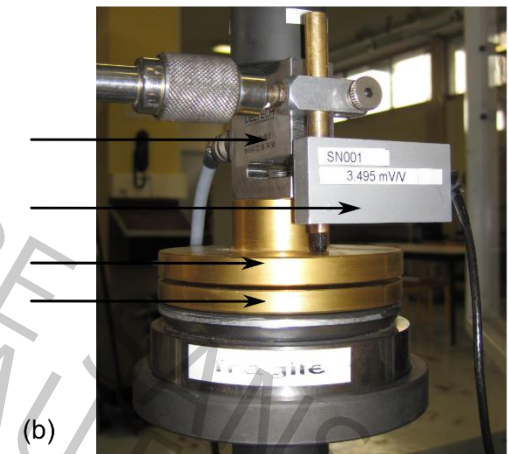
Nguyen Q. T., Vidal-Sallé E., Boisse P., Park C.H., Saoub A., Bréard J., Hivet G. *Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction* - Composites : Part B **44** (2012) 231-241.

Comportement mécanique des renforts

- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - Le nombre de ces pores dépend de l'armure du tissu



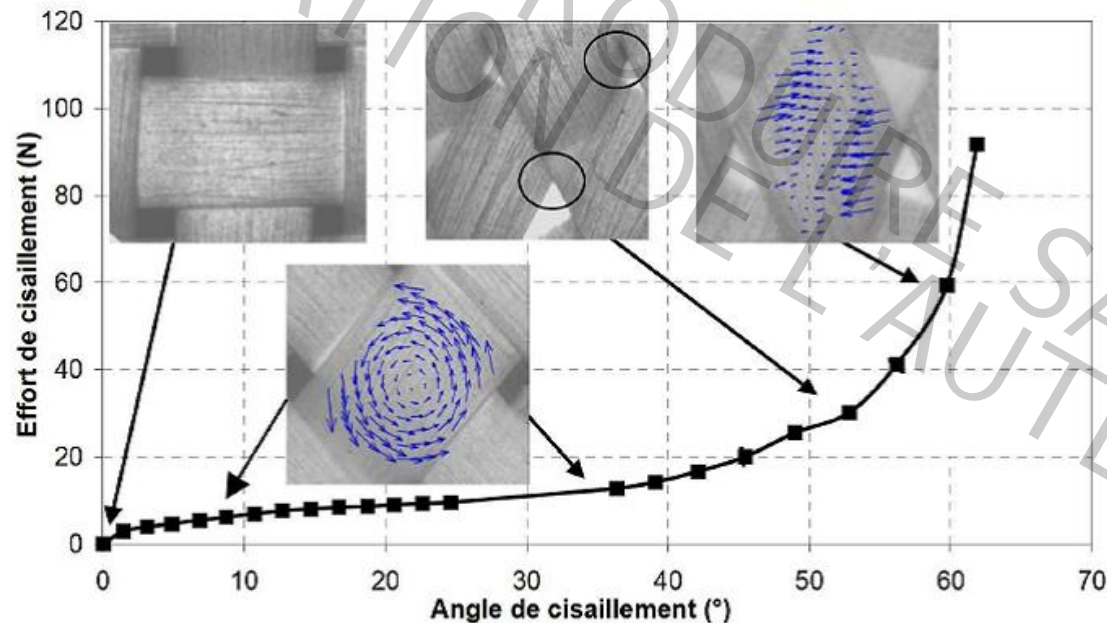
capteur d'effort
capteur de déplacement
plateau supérieur
plateau inférieur rotulé



(b)

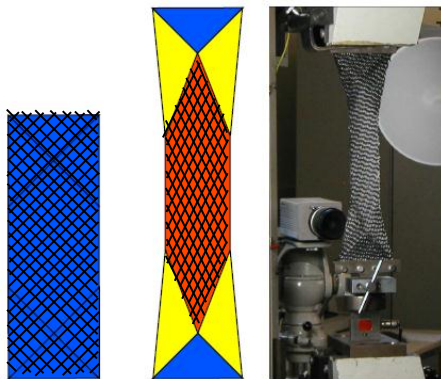
Comportement mécanique des renforts

- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - Comportement en cisaillement plan beaucoup plus souple que celui d'un matériau continu $\Rightarrow$ Deux essais : l'essai de cadre (picture frame test) et la traction à 45° (bias extension test)

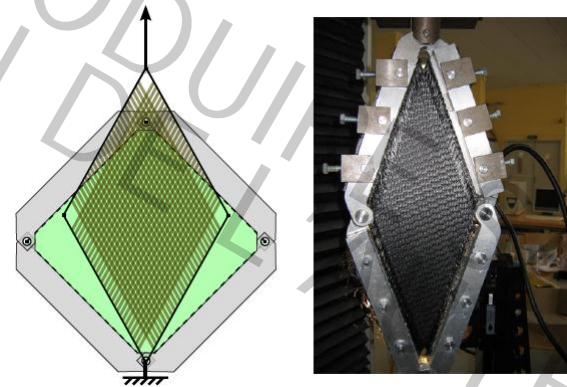


Comportement mécanique des renforts

- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - Comportement en cisaillement plan beaucoup plus souple que celui d'un matériau continu $\Rightarrow$ Deux essais : l'essai de cadre (picture frame test) et la traction à 45° (bias extension test)

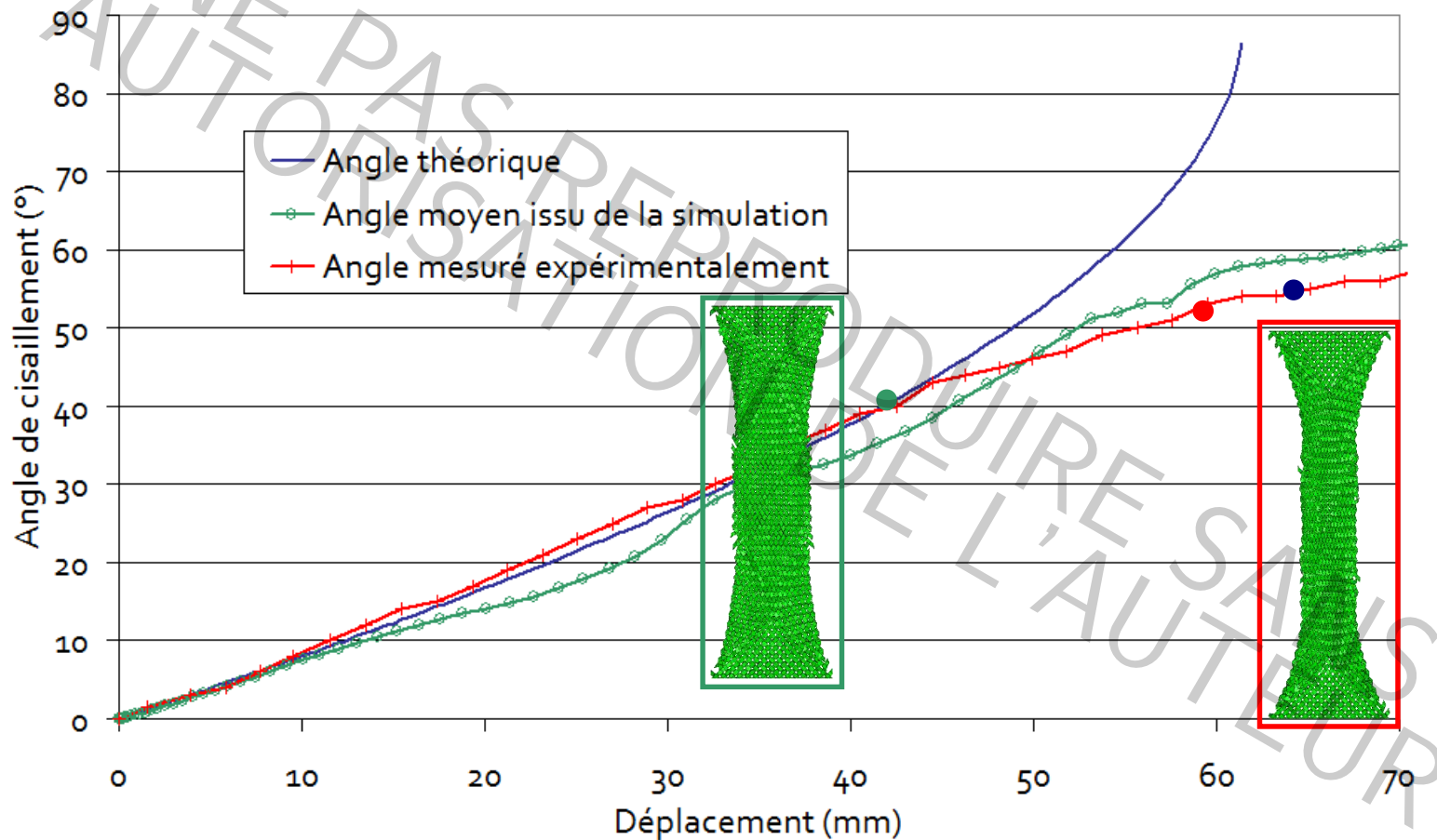


Traction de biais / *Bias test*



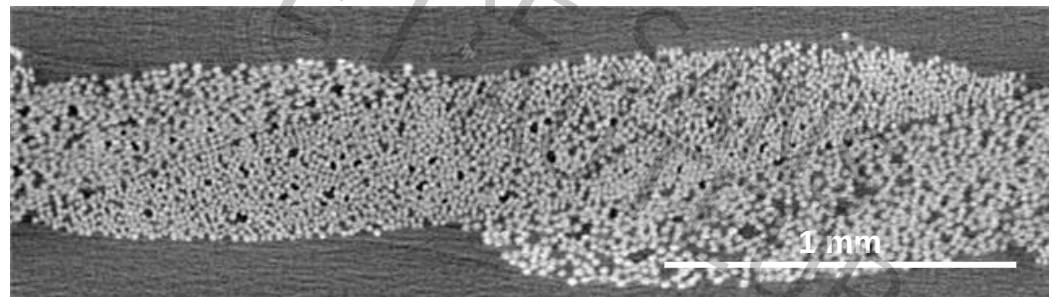
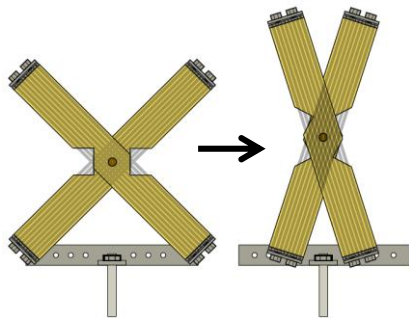
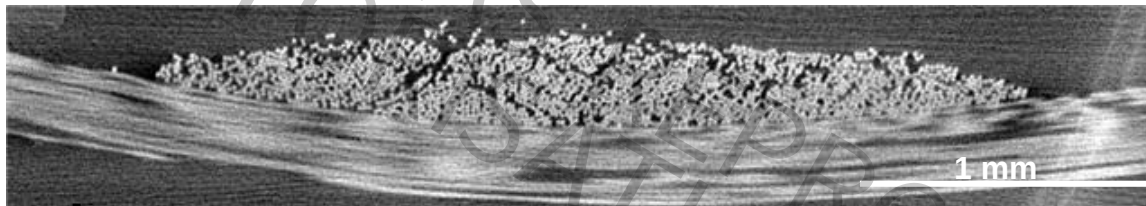
Cadre de cisaillement / *Picture frame*

Comportement mécanique des renforts



Comportement mécanique des renforts

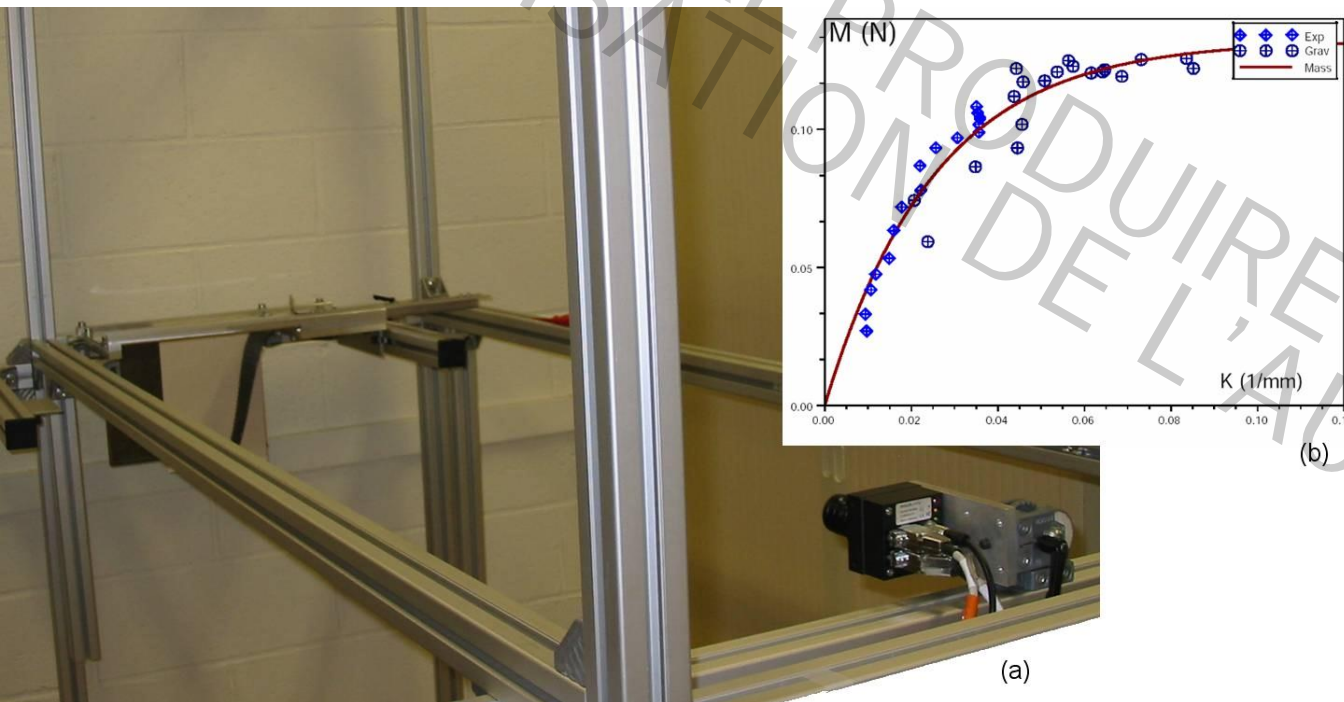
- Comportement en cisaillement



Mode de déformation en distorsion

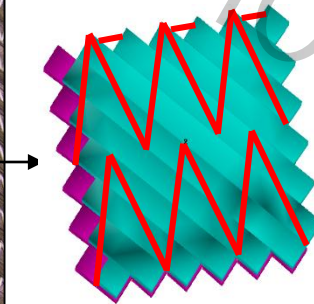
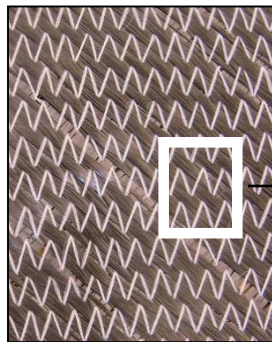
Comportement mécanique des renforts

- Comportement très différent de celui d'un matériau continu
 - Comportement en flexion beaucoup plus souple que celui d'un matériau continu



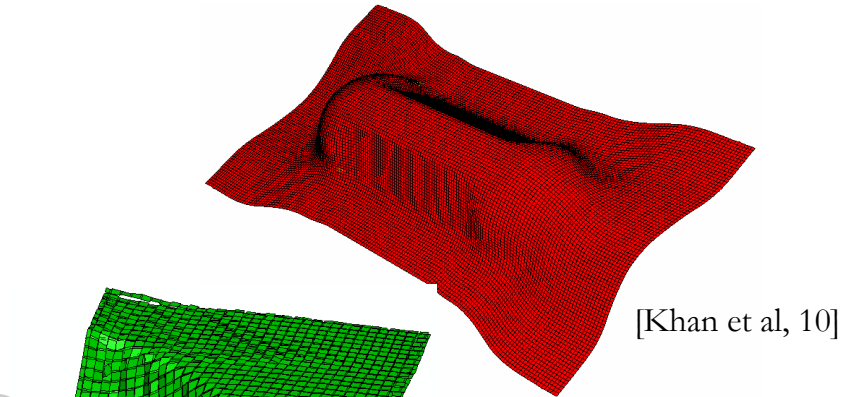
Modélisation du comportement des tissus

- Approche macroscopique
 - Le tissu est un continuum
 - Le tissu est un ensemble de fils

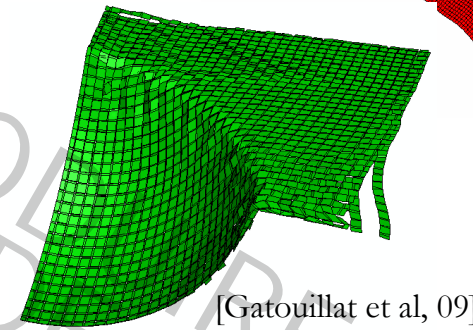


[Pickett & al, EJCm, 2005]

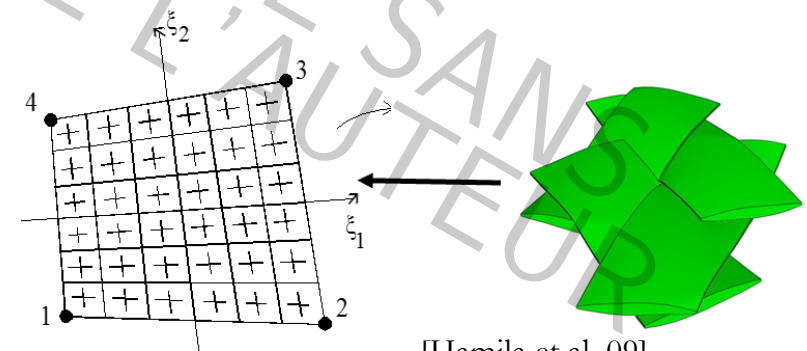
- On fait un mélange des deux approches précédentes



[Khan et al, 10]



[Gatouillat et al, 09]



[Hamila et al, 09]

Modélisation du comportement des tissus

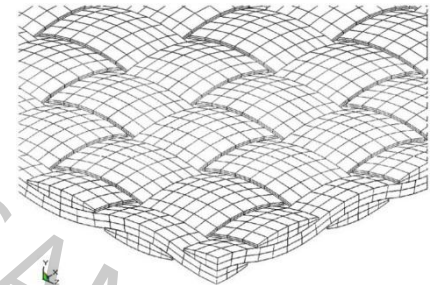
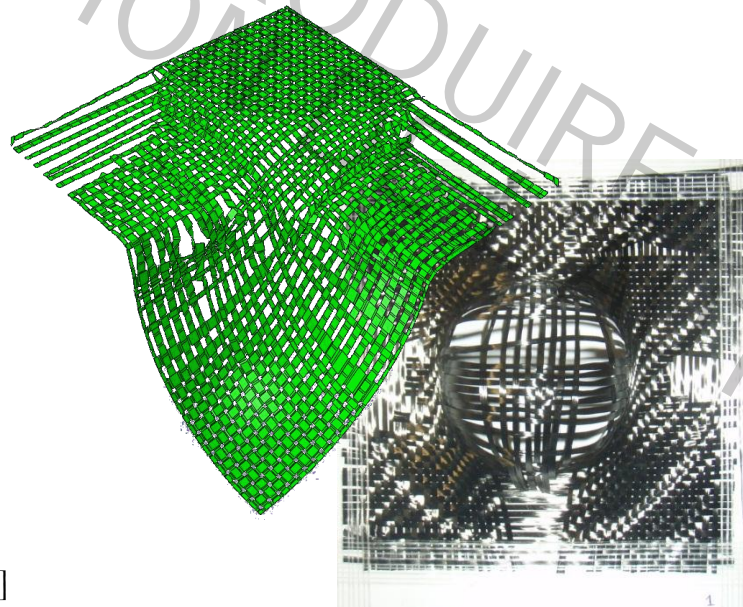
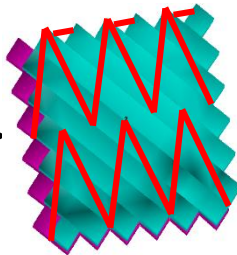
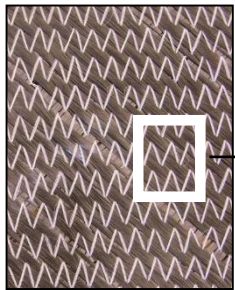
- Le tissu est un matériau continu
 - Approche MMC classique mais comportement atypique



[Spencer, CompA, 2000]
[Lamers et al, IJFP, 2002]
[Yu et al, CompA, 2002]
[Cao et al, CompA 2003, 05]
[King et al, IJSS, 2005]
[Boisse et al, JMS, 2005]
[Ten Thije et al, CMAME, 2007]
[Badel et al, CompA, 2008].....

Modélisation du comportement des tissus

- Le tissu est un assemblage de fils
 - Temps de calcul long impliquant une simplification de la géométrie
 - Beaucoup de contacts à gérer
 - Ne règle pas le problème du comportement atypique



Pickett A.K., et al. European Journal of Computational Mechanics, 14 (2005), 677–691

Duan Y. et al. Composite Structures, 68, 331 – 337.

[D. Durville, JMS, 05]

[Sze et al, IJMMD, 2005]

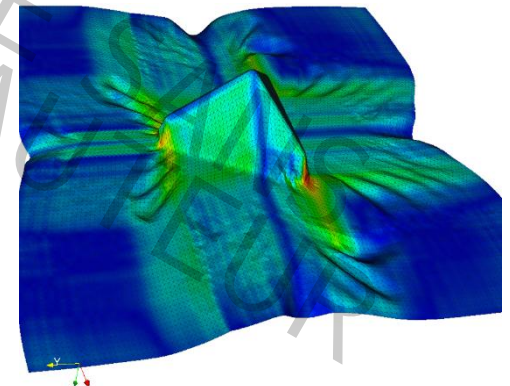
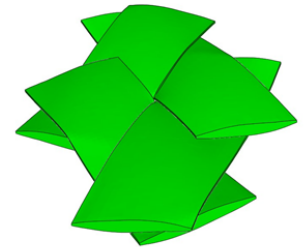
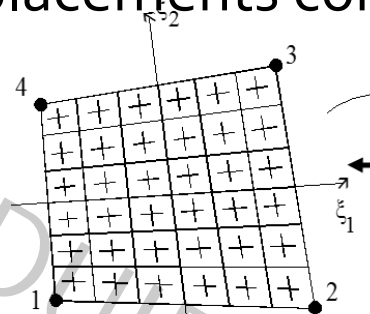
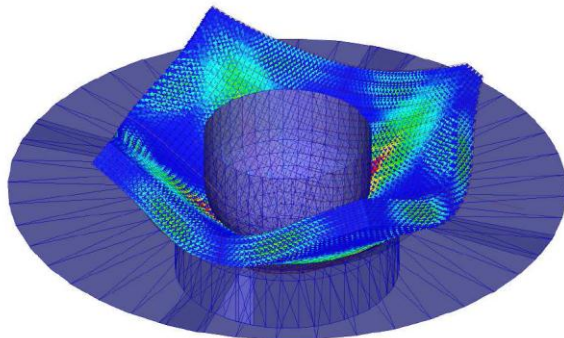
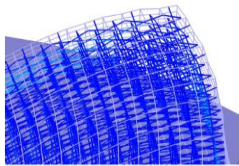
[Duhovic & Bhattacharyya, CompA, 2006]

[Ben Boubaker et al, CompB, 2007]

Gatouillat S. et al. *Composites: Part A* 54 (2013) 135-144.

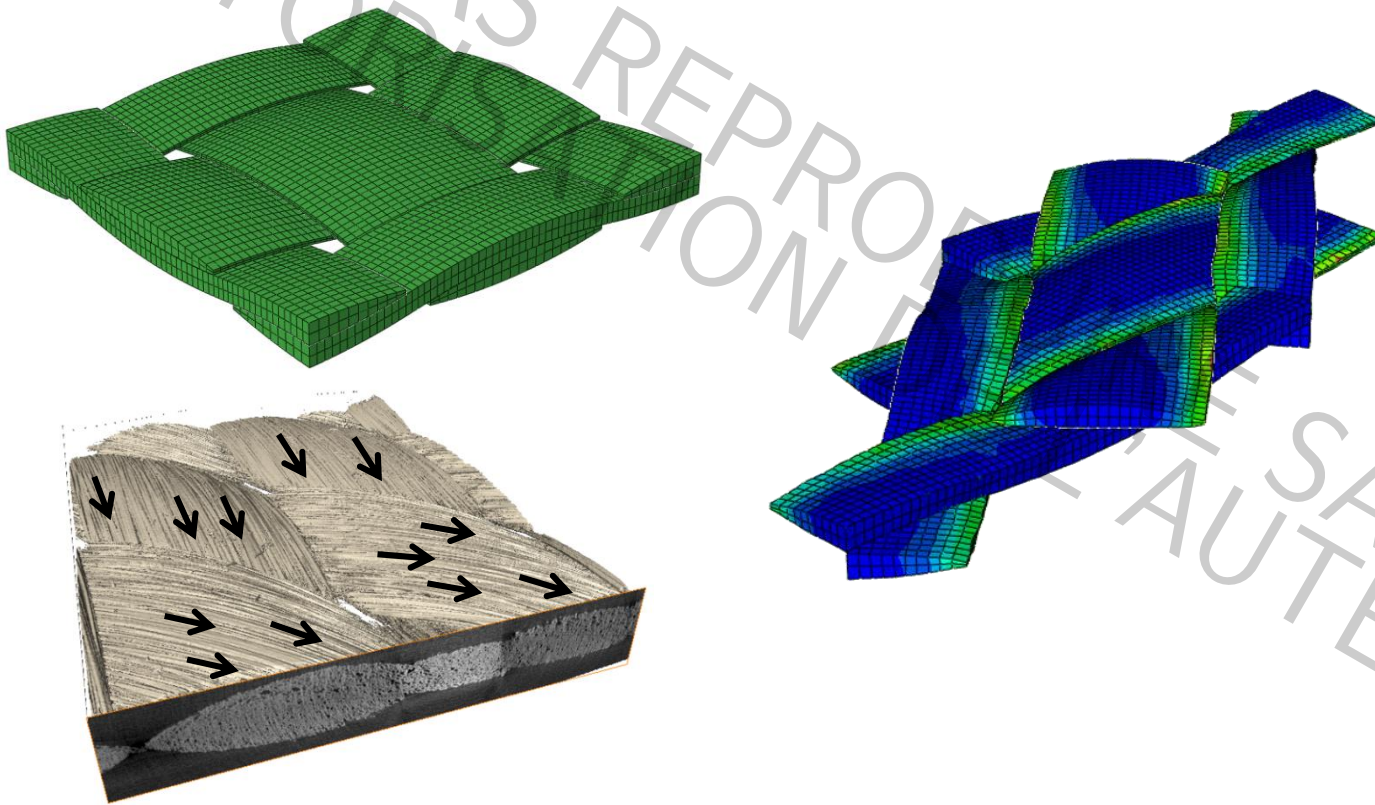
Modélisation du comportement des tissus

- Le matériau est vu comme un assemblage de composants mais traité avec un champ de déplacements continu
 - Approche semi-discrète
 - Généralisable aux tissus interlocks



Modélisation du comportement des tissus

- Et si on s'intéresse de plus près au fil...

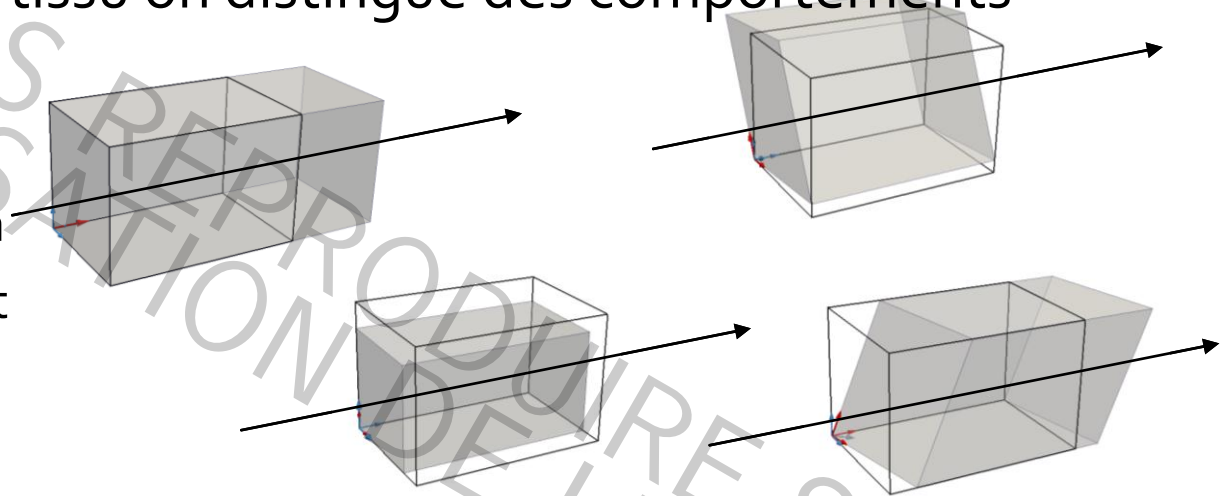


Badel P., Vidal-Sallé E., Boisse P. (2007). *Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements*, Computational Materials Science, 40, 439–448.

Modélisation du comportement des tissus

- Comme pour le tissu on distingue des comportements spécifiques

- En tension
- En compaction
- En cisaillement
- En flexion



- Comment traduire le comportement d'un paquet de fibres avec les outils de la mécanique des milieux continus?

Modélisation du comportement des tissus

Hypoélasticité: une dérivée objective du tenseur des contraintes de Cauchy est une fonction de l'état actuel des contraintes et du taux de déformation.

$$\underline{\underline{\sigma}}^\nabla = \underline{\underline{C}}(\underline{\underline{\sigma}}) : \underline{\underline{D}}$$

- couramment utilisée en plasticité et pour tous les types de comportement non linéaires
- il faut définir la forme de $\underline{\underline{C}}$
- il faut garantir l'objectivité de $\underline{\underline{\sigma}}^\nabla$

Hyperélasticité: un potentiel énergétique permet de définir l'état de contrainte en fonction des déformations.

$$\underline{\underline{S}} = \frac{\partial w}{\partial \underline{\underline{E}}} = 2 \frac{\partial w}{\partial \underline{\underline{C}}}$$

Matériau isotrope transverse

Tenseur de structure : $\underline{\underline{M}} = m \otimes m$

Potentiel de déformation

$$w(\underline{\underline{C}}) = \tilde{w}(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5) \text{ où } \begin{cases} I_1 = \text{Tr}(\underline{\underline{C}}) \\ I_2 = \frac{1}{2}(\text{Tr}(\underline{\underline{C}})^2 - \text{Tr}(\underline{\underline{C}}^2)) \\ I_3 = \text{Det}(\underline{\underline{C}}) \\ I_4 = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{M}} \\ I_5 = \underline{\underline{C}}^2 : \underline{\underline{M}} \end{cases}$$

w s'annule lorsque le matériau n'est soumis à aucune sollicitation

$$w(\underline{\underline{I}}) = 0$$

w respecte le principe d'indifférence matérielle

$$w(\underline{\underline{F}}) = w(\underline{\underline{QF}}), \forall \underline{\underline{Q}} \in \mathcal{SO}_3 \rightarrow w(\underline{\underline{C}})$$

w respecte les symétries du matériau

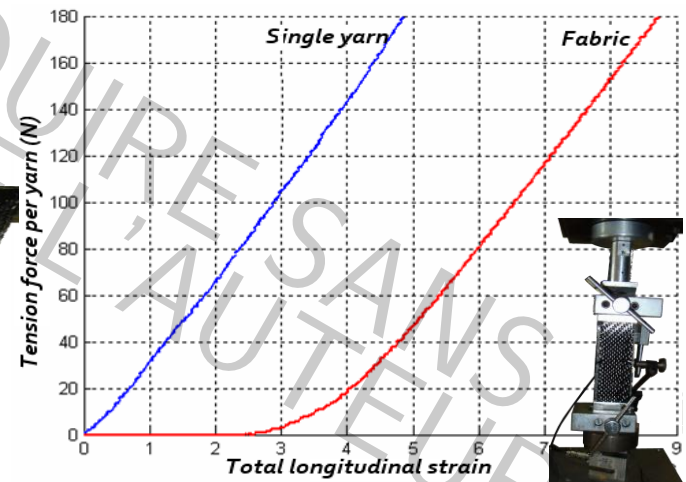
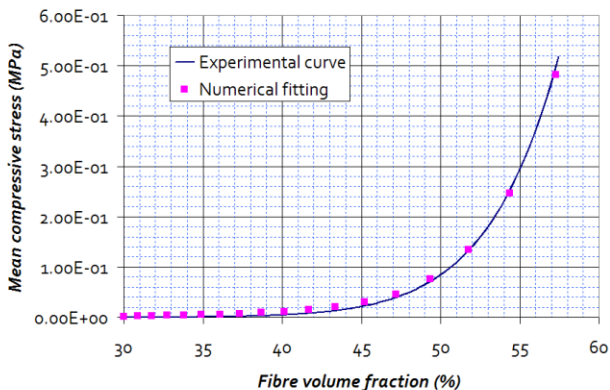
$$w(\underline{\underline{F}}) = w(\underline{\underline{FQ}}), \forall \underline{\underline{Q}} \in \mathcal{G} \subset \mathcal{SO}_3 \rightarrow w(\underline{\underline{C}}) = \tilde{w}(I_1, I_2, I_3)$$

Modélisation du comportement des tissus

- Ces modélisations sont fortement dépendantes
 - De la qualité de la modélisation géométrique du fil
 - Permettent de prendre en compte des effets locaux
 - Nécessitent des algorithmes de contact performants
- La mise en œuvre dans des codes implicites est difficile
 - Comment accéder aux quantités qui permettront de prédire les endommagements ?
 - Comment identifier le frottement ?
 - Est-il isotrope ?

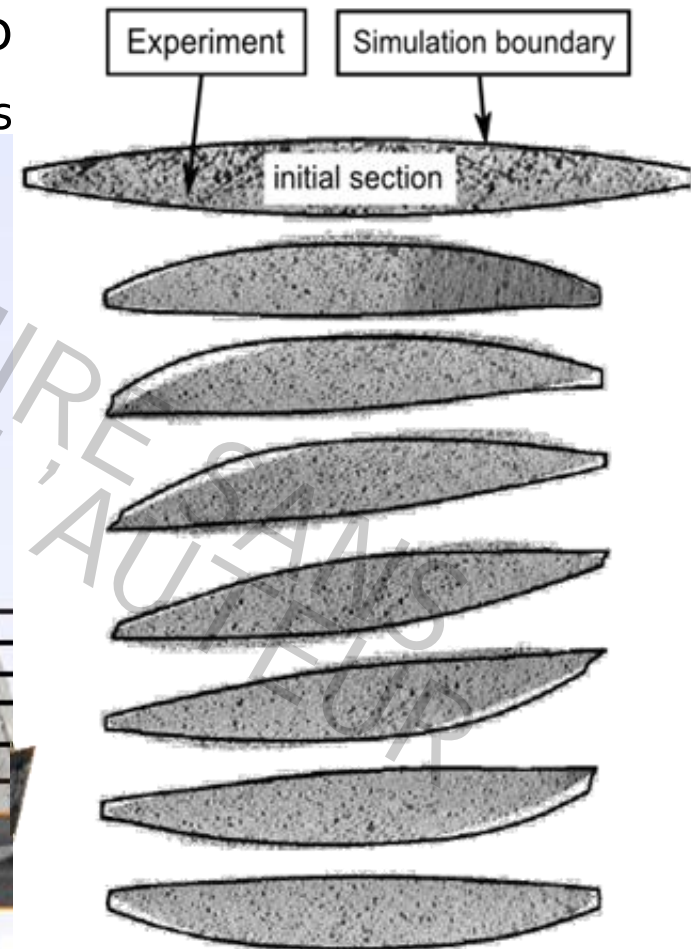
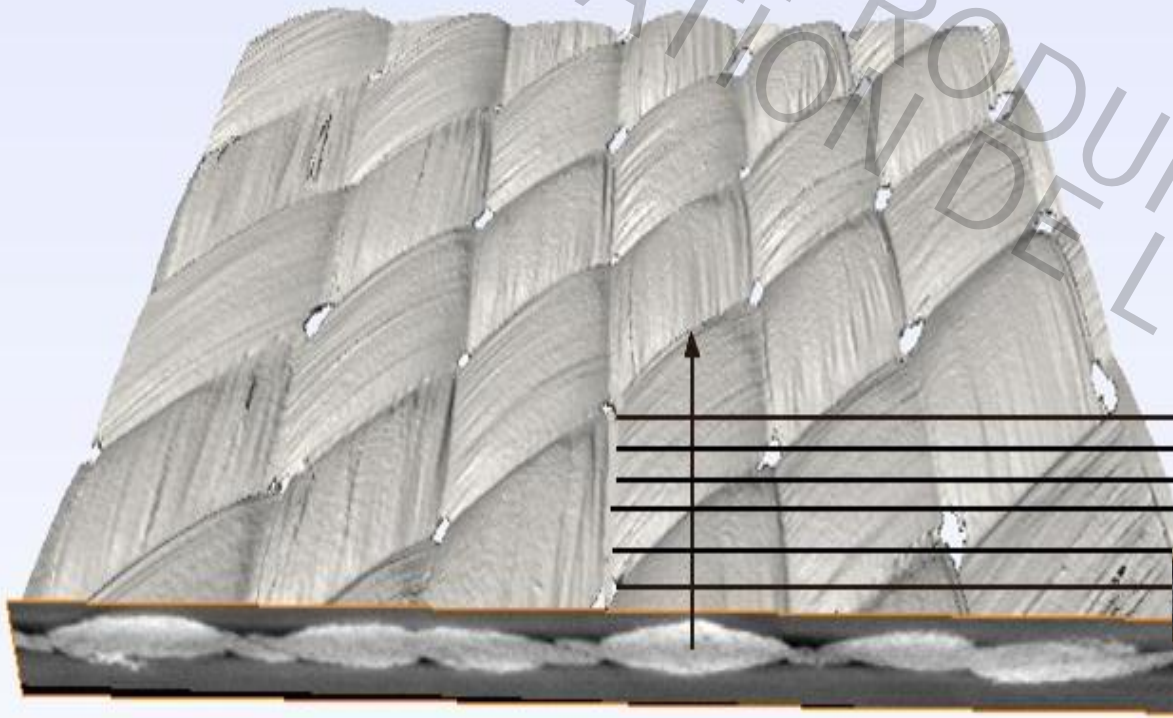
Identification du comportement

- L'identification du comportement de la mèche dépend
 - De l'approche choisie (hypoélastique / hyperélastique)
 - De la modélisation géométrique choisie
- Les essais de base qui servent sont :
 - Traction uniaxiale
 - Traction biaxiale
 - Cisaillement plan
 - Compression



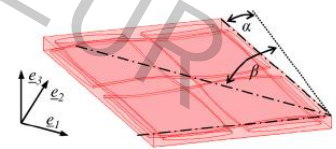
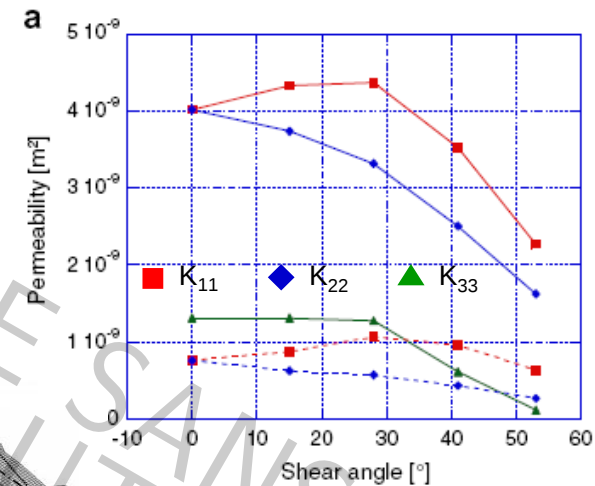
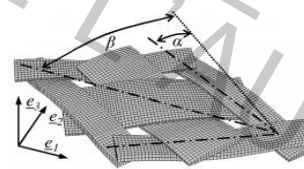
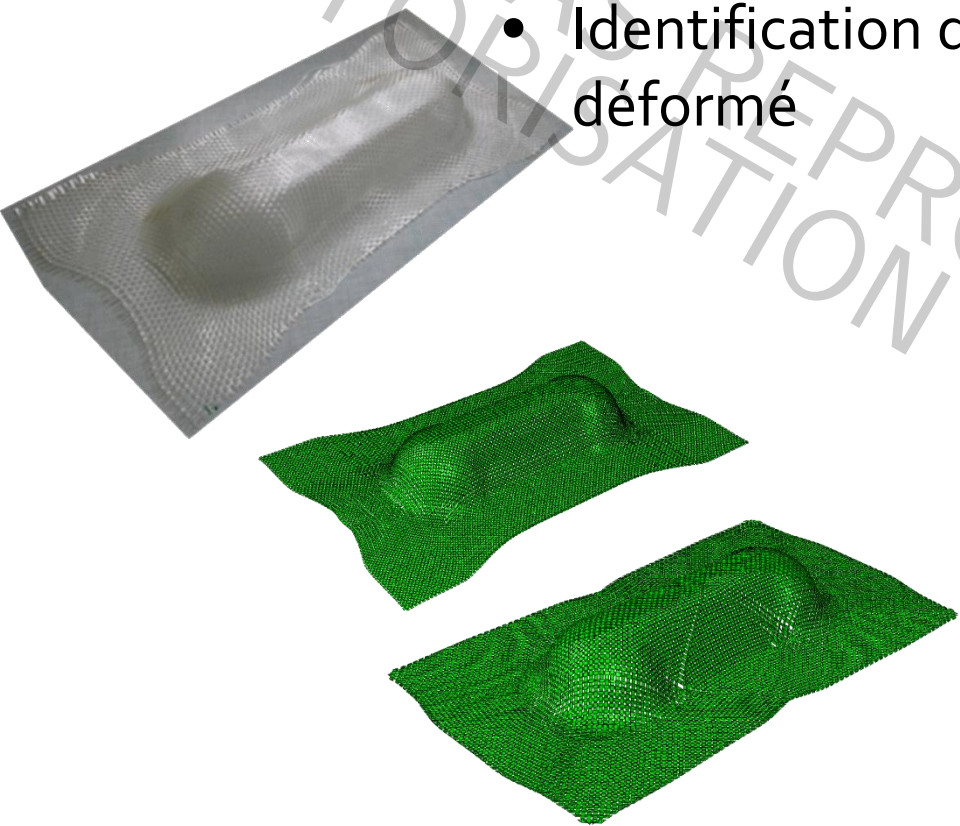
Identification du comportement

- Mais cette identification sur les efforts doit être validée par la cohérence des déformées à l'échelle lo
 - Exemple du cisaillement plan d'un taffetas



Des simulations pour quoi faire ?

- Simulation de la mise en forme
 - Identification de la perméabilité sur renfort déformé



Des simulations pour quoi faire ?

- Prédiction des endommagements pour avoir les propriétés en service

