



MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA MISE EN FORME DES RENFORTS TISSÉS À L'ÉCHELLE MÉSOSCOPIQUE

Audrey HIVET

Laboratoire de Mécanique Gabriel LaMé

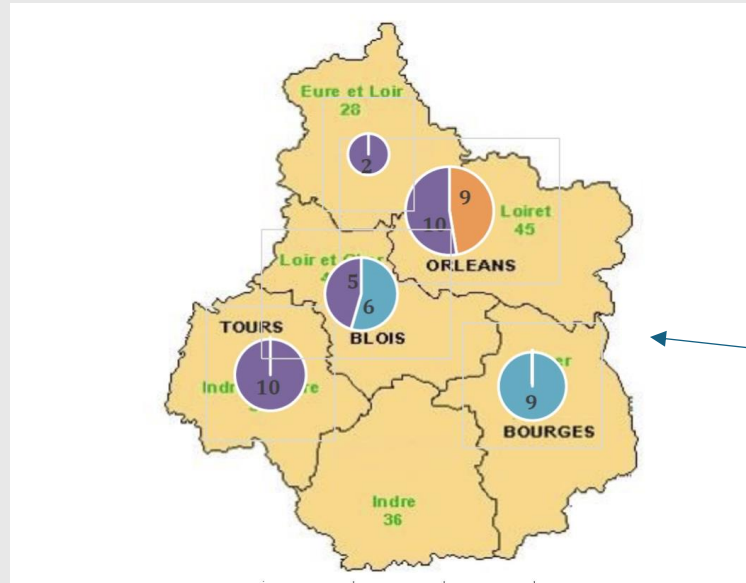
audrey.hivet@univ-orleans.fr

Présentation du labo



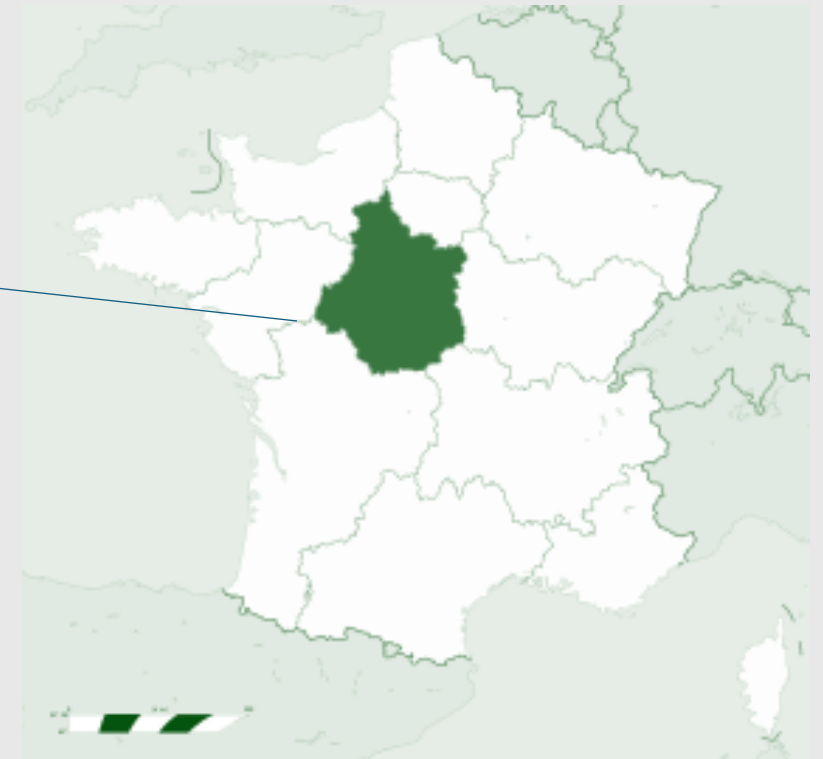
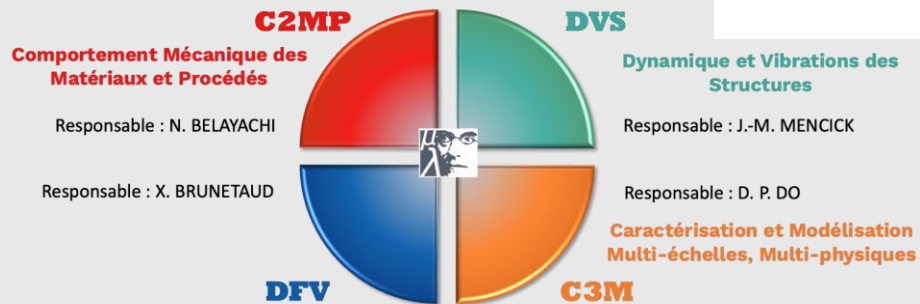
*Un laboratoire de mécanique en région
Centre Val de Loire*

◦ 5 sites



◦ 4 équipes

4 équipes de recherche



Avant de commencer

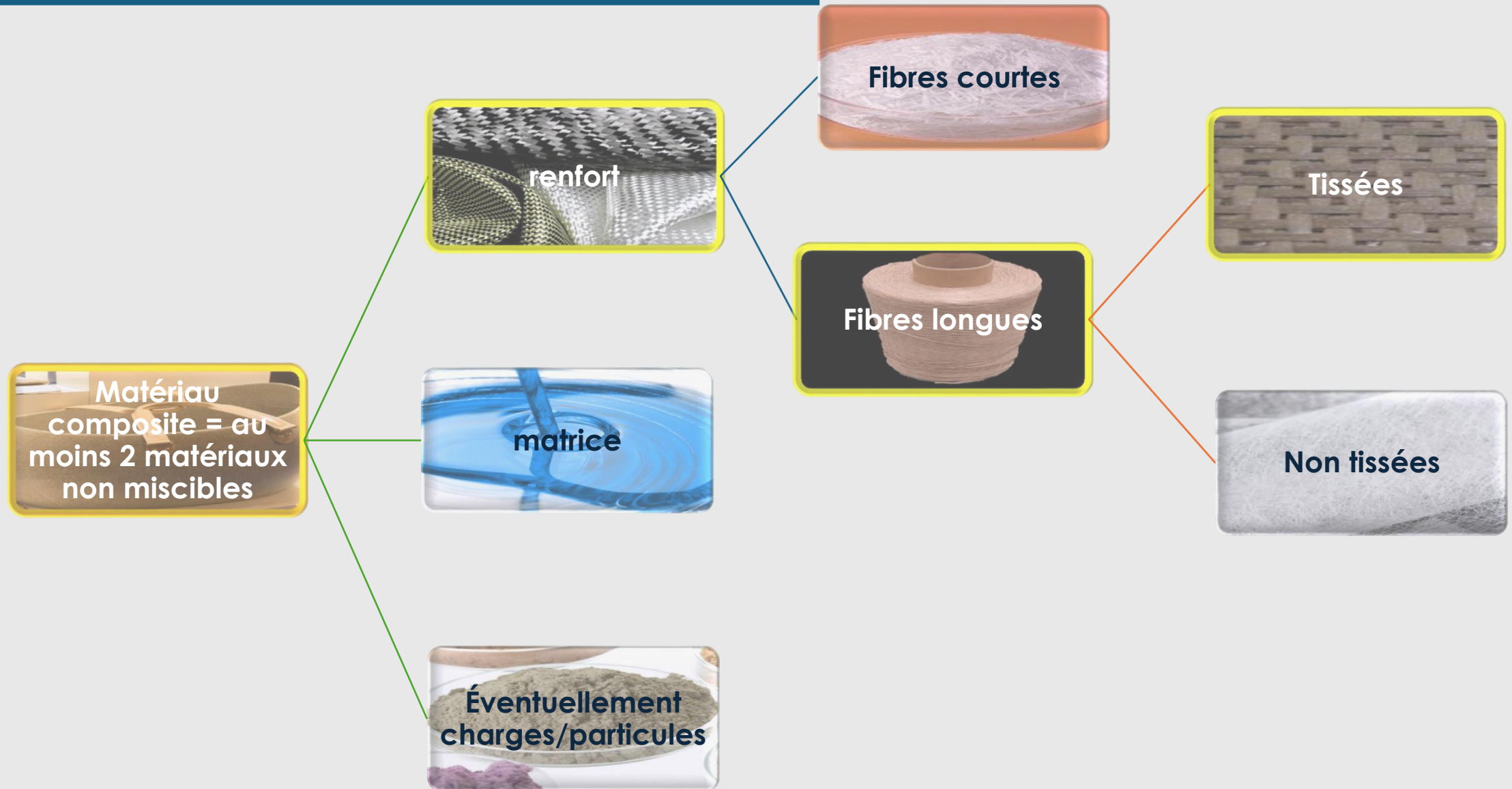
- Un énorme merci à :





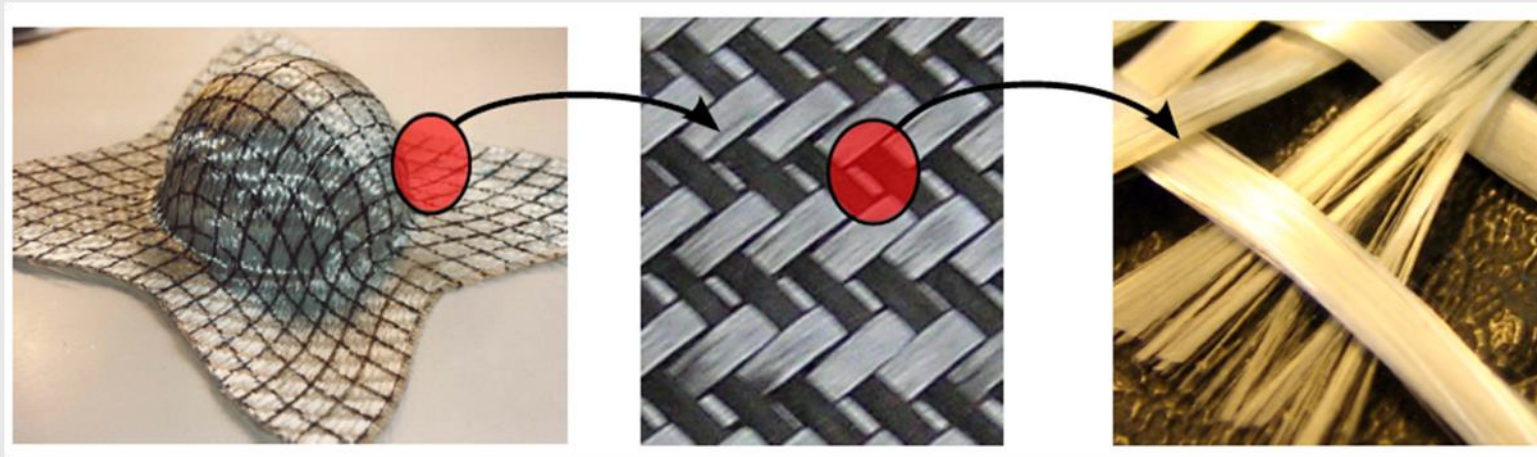
CONTEXTE

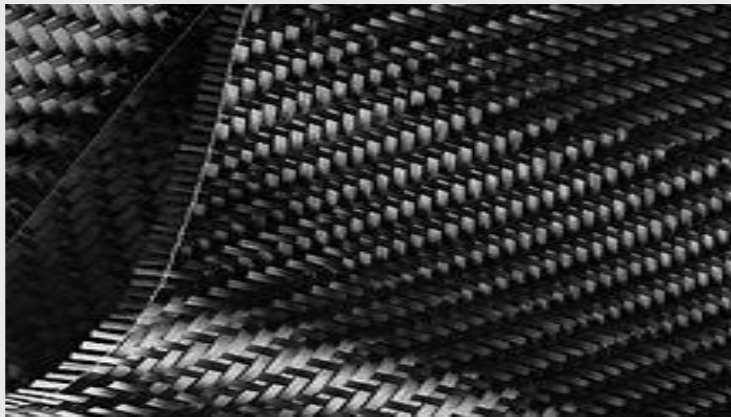
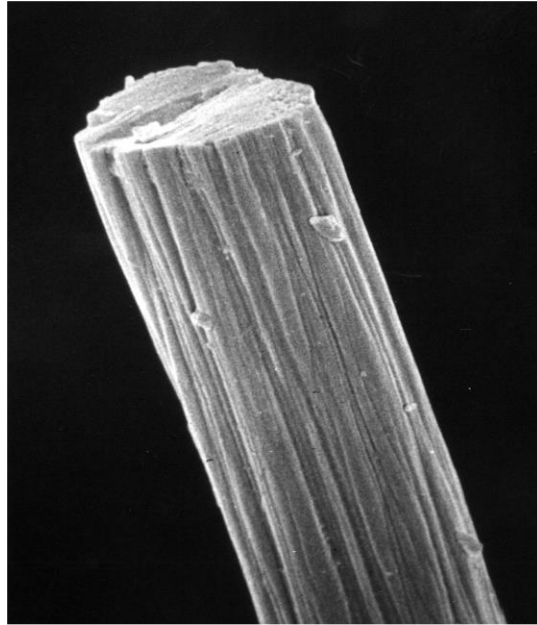
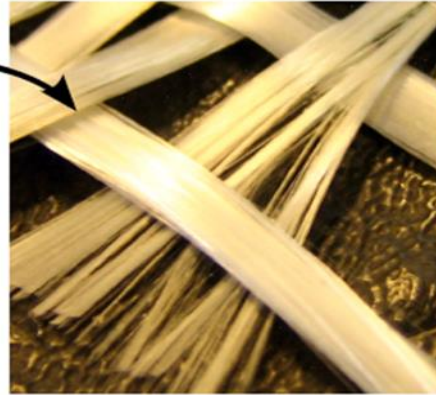
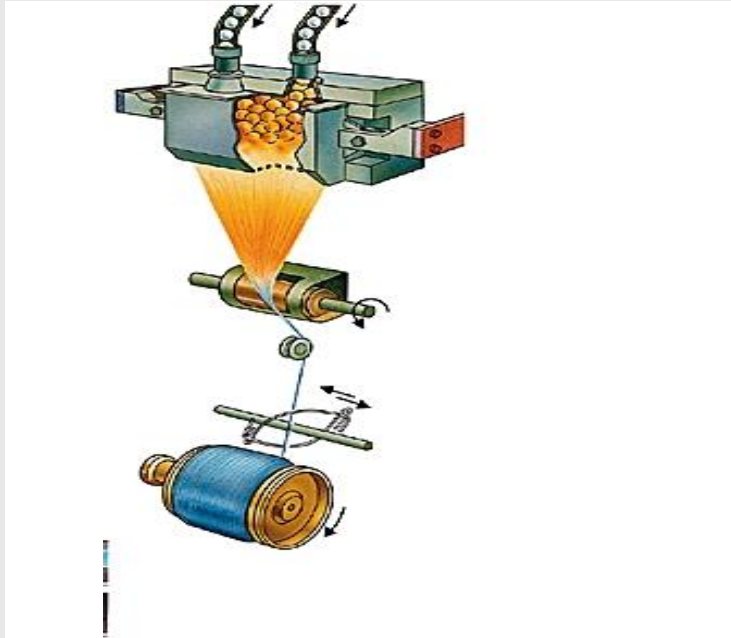
Composite



Composite

- Renfort = matériau multi-échelle (composé de mèches, elles-mêmes composées de milliers de fibres)

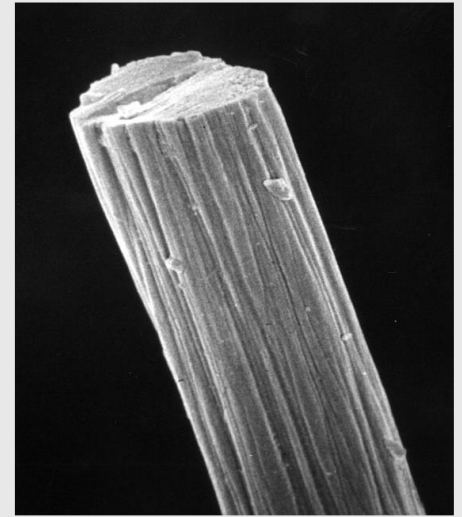




QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES FIBRES

Fibres : définition

- Terme utilisé pour une matière textile de toute nature.
- On parle également de monofilament / fibre élémentaire / fibre unitaire
- Solide dont une dimension est très grande devant la section.
- Assimilée à un cylindre homogène
- Définie par
 - Sa longueur et son diamètre
 - En règle générale :
 - Diamètre souvent de l'ordre de qqs micromètres
 - Longueur : de quelques mm (fibres courtes) à qqs mètres (fibres continues)
 - → **Conséquences majeures sur les propriétés mécaniques**



**A high strength
Carbon fibre
with a diameter of
7 μ m
made from a PAN
precursor**



Propriétés mécaniques : généralités

- **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

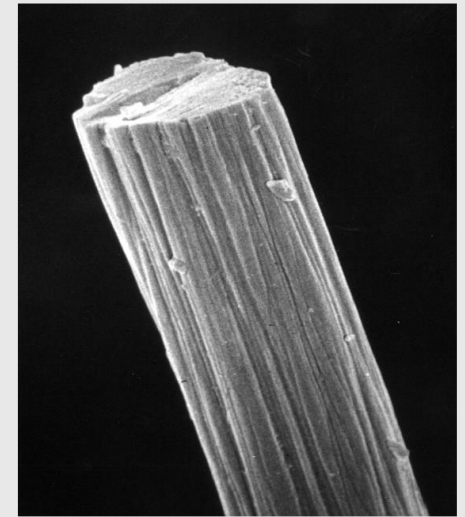
→ **Une fibre est rigide en traction et extrêmement flexible.**

→ 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**

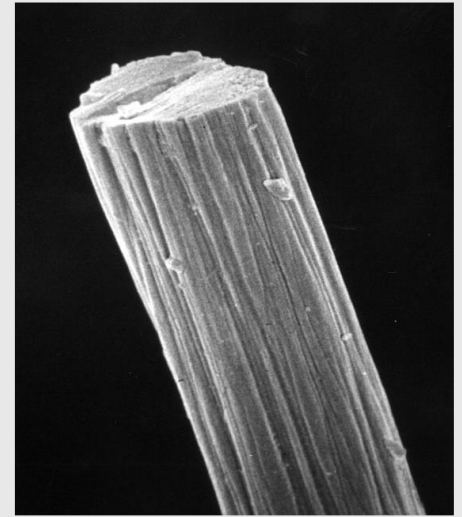
**with a diameter of
7 μ m**

**made from a PAN
precursor**



Fibres : définition

- Terme utilisé pour une matière textile de toute nature.
 - On parle également de monofilament / fibre élémentaire / fibre unitaire
 - Solide dont une dimension est très grande devant la section.
 - Assimilée à un cylindre homogène
 - Définie par
 - Sa longueur et son diamètre
 - Sa masse linéique ou titre
 - Exprimée en Tex : 1 Tex = masse en grammes de 1000m de fibres :
- $$1 \text{ Tex} = \rho \times S \times 10^5$$
- Exprimée en Denier : 1 Denier = masse en grammes de 9000m de fibres
- **Les propriétés mécaniques massiques sont cruciales pour les fibres techniques impliquées dans l'allègement** des structures (ex : module spécifique).

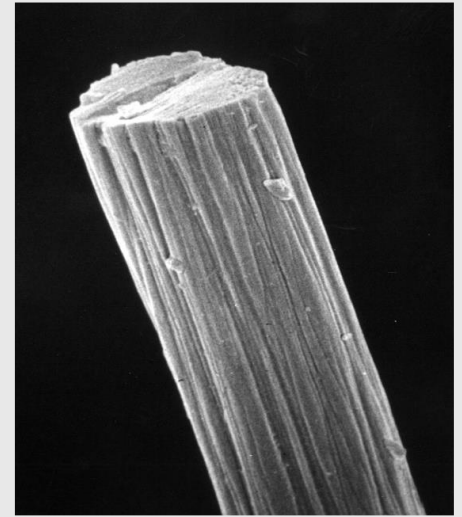


**A high strength
Carbon fibre
with a diameter of
7µm
made from a PAN
precursor**



Fibres : définition

- Terme utilisé pour une matière textile de toute nature
- On parle également de monofilament / fibre élémentaire / fibre unitaire
- Solide dont une dimension est très grande devant la section
- Assimilée à un cylindre homogène
- Définie par
 - Sa longueur et son diamètre
 - Sa masse linéique ou titre
 - Son origine, son matériau
 - Nature de la fibre et catégorie de la fibre




**A high strength
Carbon fibre
with a diameter of
7 μ m
made from a PAN
precursor**



Fibres : définition

- Norme NF G00-001 (1985)
- Différents types de fibres
 - Naturelles
 - artificielles
 - Synthétiques
 - De spécialité

Fibres : définition

- Norme NF G00-001 (1985)
 - Différents types de fibres
 - Naturelles
 - artificielles
 - Synthétiques
 - De spécialité
- Fibres
chimiques
- 

Fibres : définition

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

- Naturelles
- artificielles
- Synthétiques
- De spécialité

Fibres
chimiques

Applications traditionnelles ou
techniques

Applications techniques

Fibres : définition

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

- Naturelles
- artificielles
- Synthétiques
- De spécialité

Fibres
chimiques

Applications traditionnelles ou
techniques

Applications techniques

Peuvent être modifiées pour leur apporter des propriétés
spécifiques → fibres fonctionnalisées

Applications
techniques

Fibres chimiques

- Fibres artificielles
 - Obtenues par dissolution de matières naturelles
 - filage de la solution par extrusion
- Fibres synthétiques
 - Obtenues par filage d'un polymère synthétique
 - extrusion/filage par voie fondue

Viscose
(cellulose
du bois)

Polyamide

Polypropylène

Fibres artificielles et synthétiques

- BISFA : bureau international de standardisation des fibres artificielles

Viscose

Lyocell

Polyester

Aramide

Polyéthylène

Polyamide

Elasthane

Polypropylène

Acrylique

Fibres : définition

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

- Naturelles
- artificielles
- Synthétiques
- De spécialité

Fibres
chimiques

Applications traditionnelles ou
techniques

Applications techniques

Peuvent être modifiées pour leur apporter des propriétés
spécifiques → fibres fonctionnalisées

Applications
techniques

Fibres naturelles

- Extraites de :

- Plante

Lin

Coton

Chanvre

- Arbre (fruits)

Kapok

Coco

- Animal

Laine

Soie

Fibres : définition

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

- Naturelles
- artificielles
- Synthétiques
- De spécialité

Fibres
chimiques

Applications traditionnelles ou
techniques

Applications techniques

Peuvent être modifiées pour leur apporter des propriétés
spécifiques → fibres fonctionnalisées

Applications
techniques

Fibres de spécialité

- Fibres organiques
 - À hautes performances mécaniques
 - À hautes performances thermiques
 - À hautes performances mécaniques et thermiques
- Fibres inorganiques
 - Bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques
 - + propriétés particulières

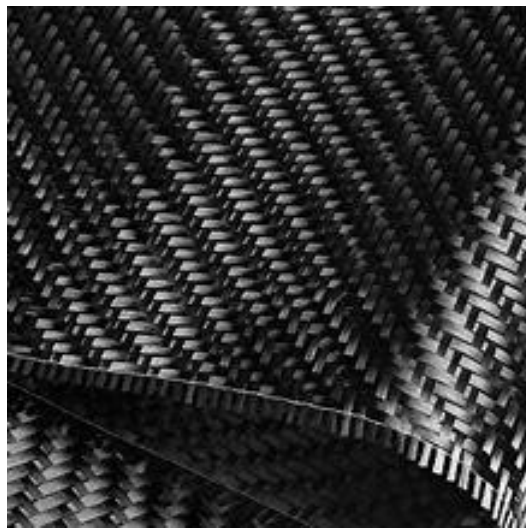
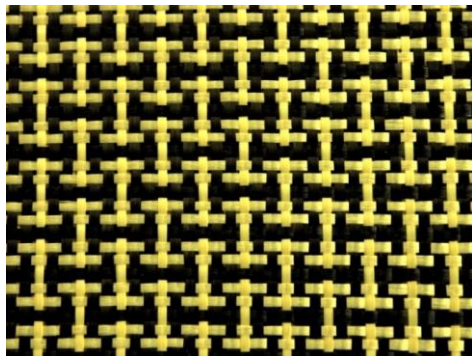
Para-aramide
(Kevlar)

Basalte

Céramique

Verre

Carbone



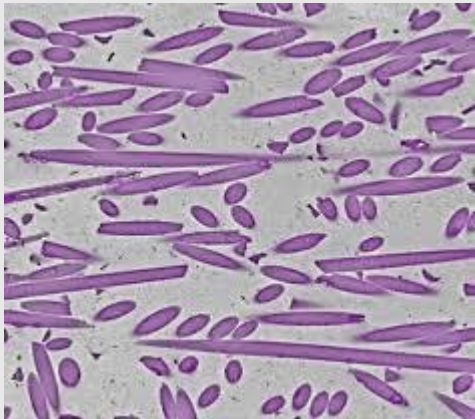
DE LA FIBRE AU RENFORT

...

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

Fibre de carbone à partir de Brai

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.

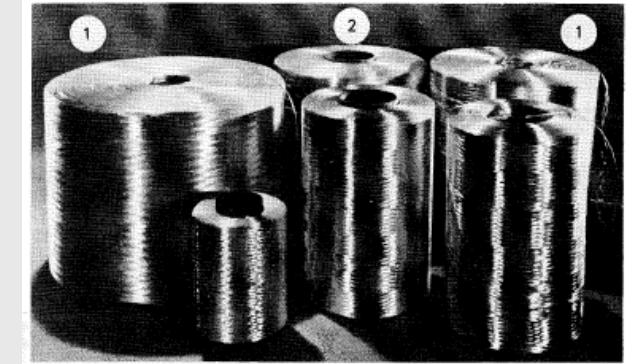
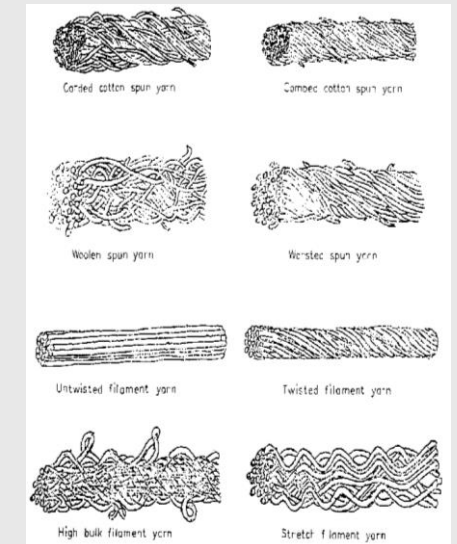
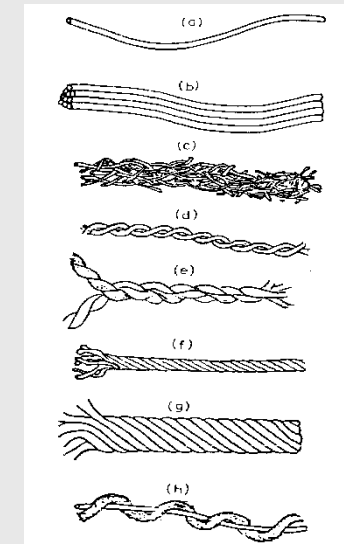


Figure 2.8. Différentes présentations des stratifils : 1. Pelotes - 2. Bobines (sur tubes)
(Documentation Vetrotex)



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



Propriétés mécaniques du fil

➤ **Fil : → composé de milliers de fibres → Matériau multi-échelles**

➤ Le comportement est le résultat

➤ Du comportement de la fibre

➤ Matériau « homogène », formulation classique

➤ Arrangement de fibres pour former le fil

➤ **Le fil 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 fibre)

➤ En traction → en fonction des trajectoires des fils on peut s'approcher (rovings) de la somme des rigidités des fibres.

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

Propriétés mécaniques du fil

➤ Fil

- Le fil n'est pas constitué que de fibres droites, parallèles organisées
 - Organisation ni périodique, ni aléatoire
 - Les fils sont plus ou moins torsadés
 - Les fibres ne sont pas toutes droites rectilignes
 - La rugosité, la section des fibres peuvent être très différents
 - Les fils 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 fibres mais aussi et surtout pour leur mise en œuvre et pour optimiser les performances des composites (ex : adhésion fibre/matrice)

- Etablir la cohésion entre les filaments ;
- Les protéger de l'abrasion ;
- Éviter 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**

Propriétés mécaniques du fil

➤ Fil

- Le fil n'est pas constitué que de fibres droites, parallèles organisées
 - Organisation ni périodique, ni aléatoire
 - Les fils sont plus ou moins torsadés
 - Les fibres ne sont pas toutes droites rectilignes
 - La rugosité, la section des fibres peuvent être très différents
 - Les fils sont ensimés
 - Assurer la cohésion
 - Éviter la dégradation lors du procédé
 - Traitement anti-statique
 -
- **Une cohésion très variable du réseau de fibres peut être obtenue**
 - Joue un rôle clé dans certains procédés.

De la fibre au renfort

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.
- **Préformes, Renforts**
 - **Mats : isotropes obtenus à partir des fibres coupées**
 - **Renforts tissés, tricotés, tressés**

MAT

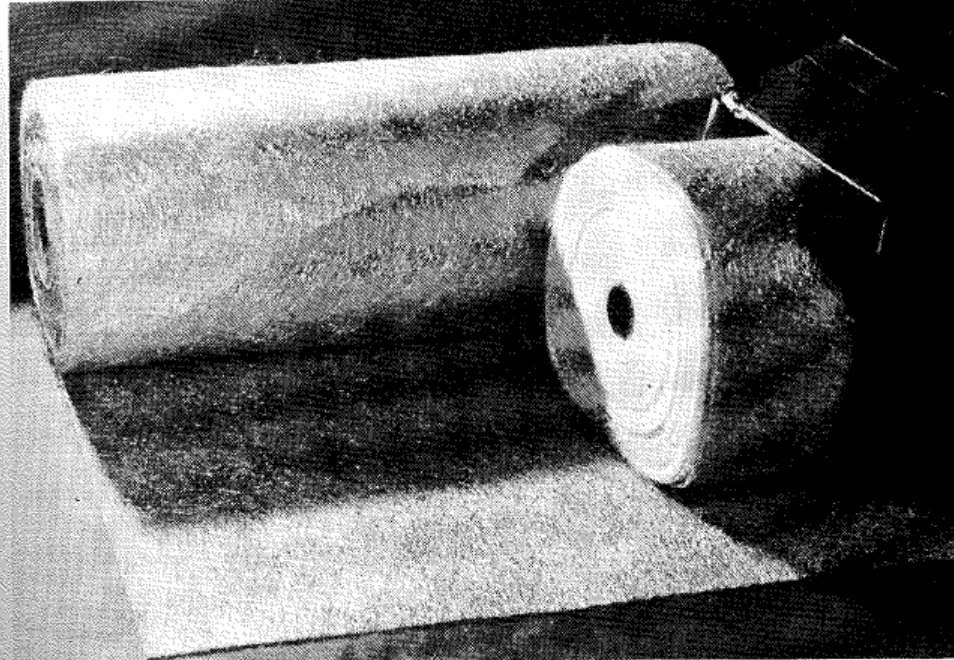


Figure 2.13. Présentation commerciale d'un mat à fils continus (Documentation Vetrotex)

Fibres coupées et assemblées entre elles avec un liant. L'assemblage des fibres se fait sans aucune orientation particulière → isotrope dans le plan

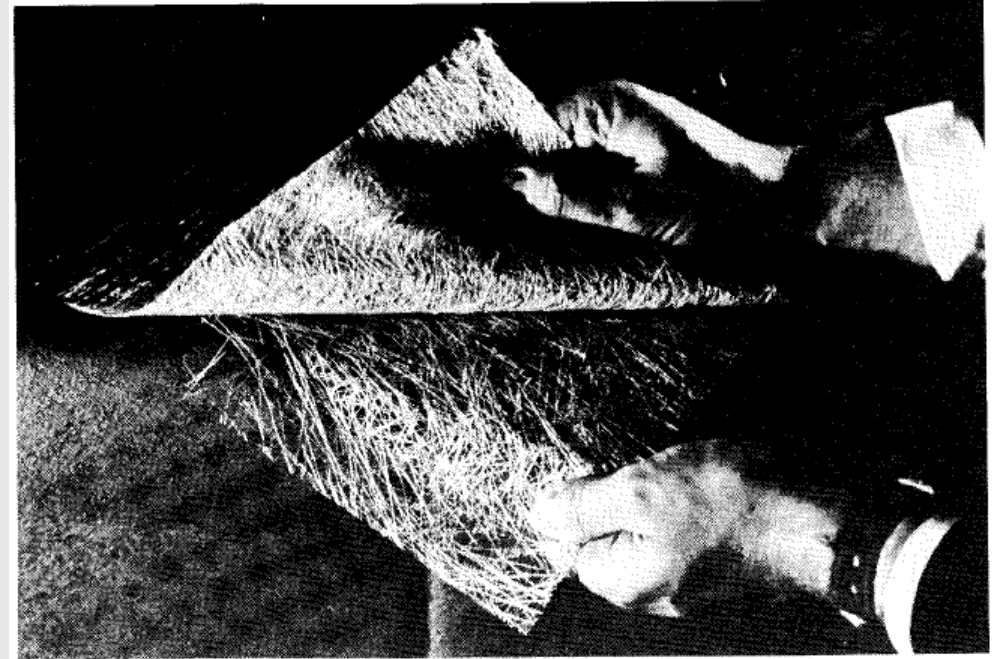
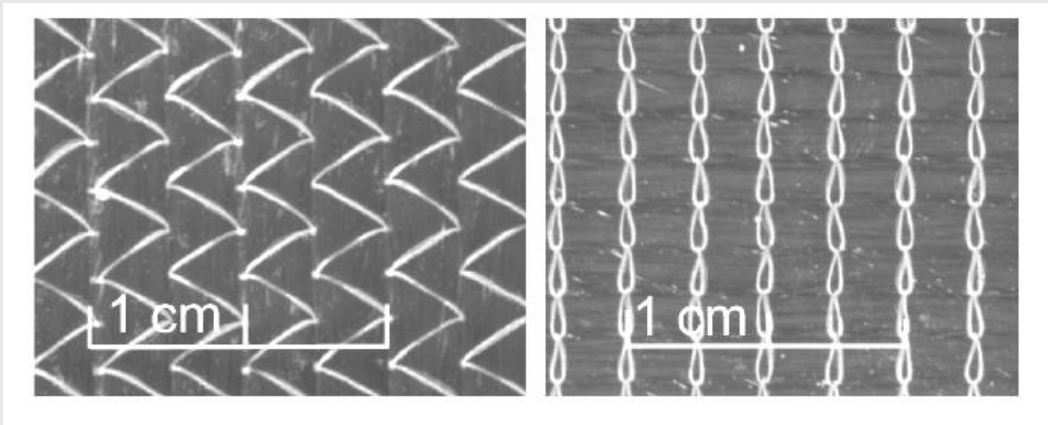
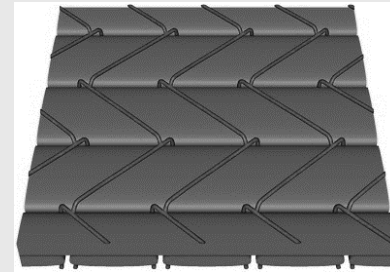
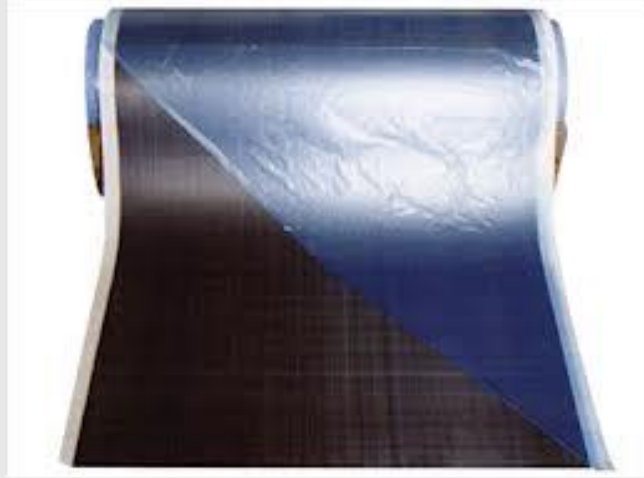


Figure 2.12. Vue de détail d'un mat à fils coupés (Documentation Vetrotex)

Non Crimp Fabric (NCF)

**Matériau obtenu par assemblage de fibres textiles.
Un fil de couture vient donner la cohésion du renfort (stitching,
tufting)**



Renforts tricotés

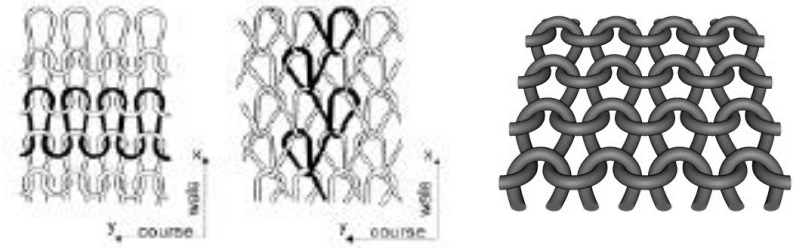


Figure 1-3 : Jersey simple de type plain weft (à gauche) et tricot de type warp (à droite) [GOM98]



Figure 1-6 : Renfort tricoté issu d'un procédé de tricotage circulaire

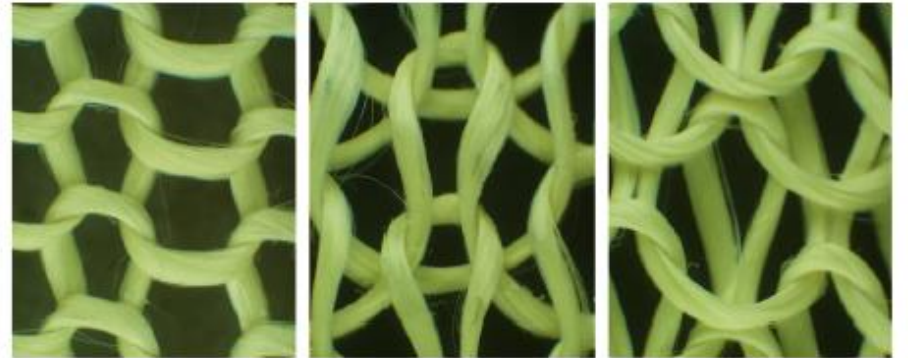
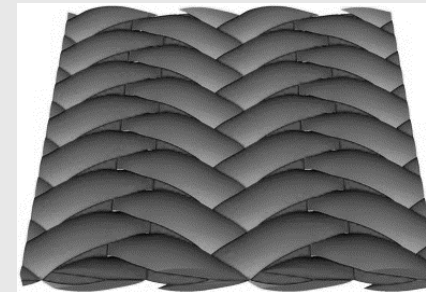
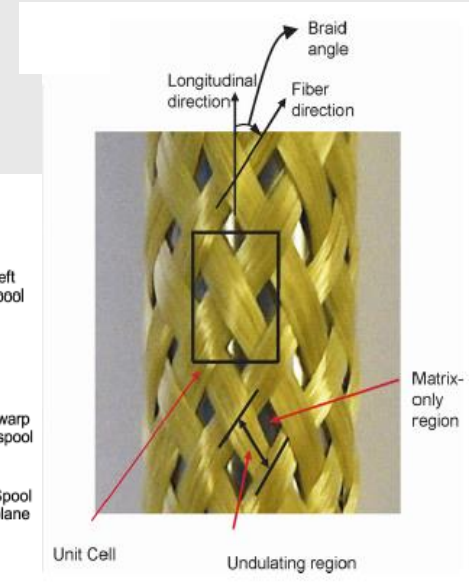
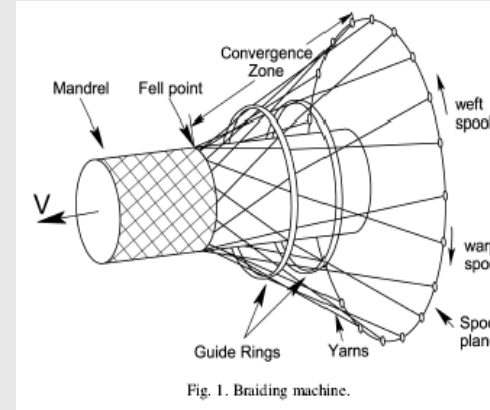
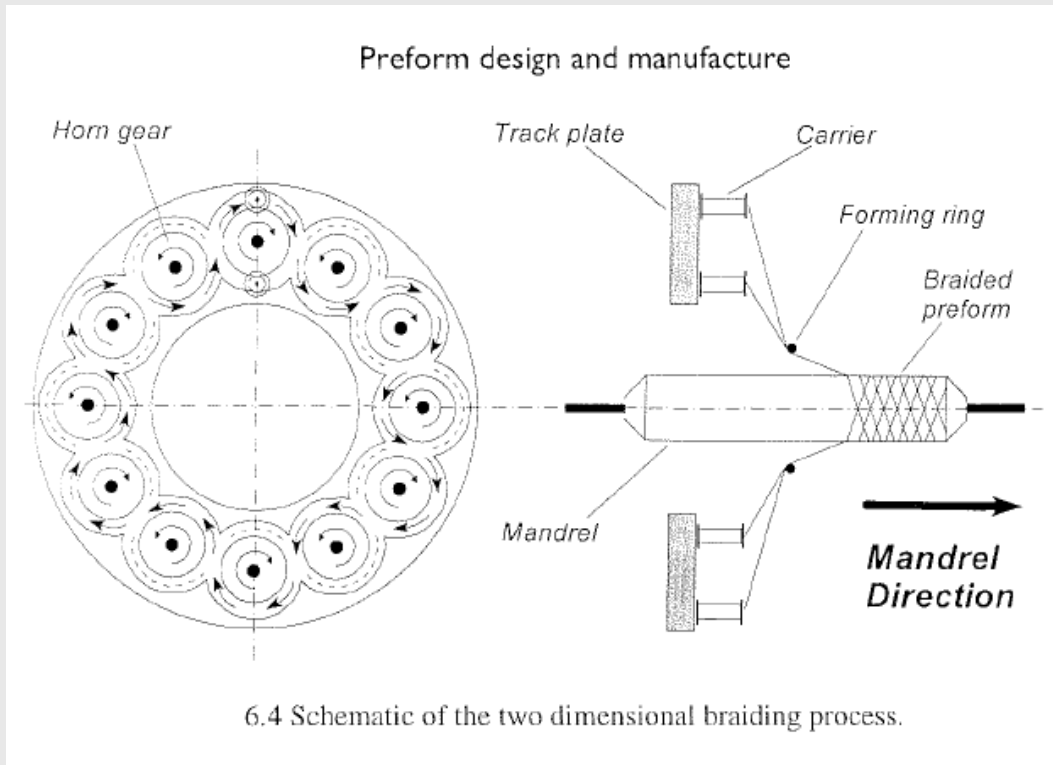
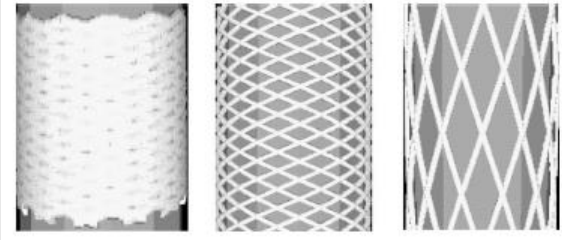


Figure 1-7 : Mésographies de tricots d'aramide industriels

Tresses



Renforts tissés

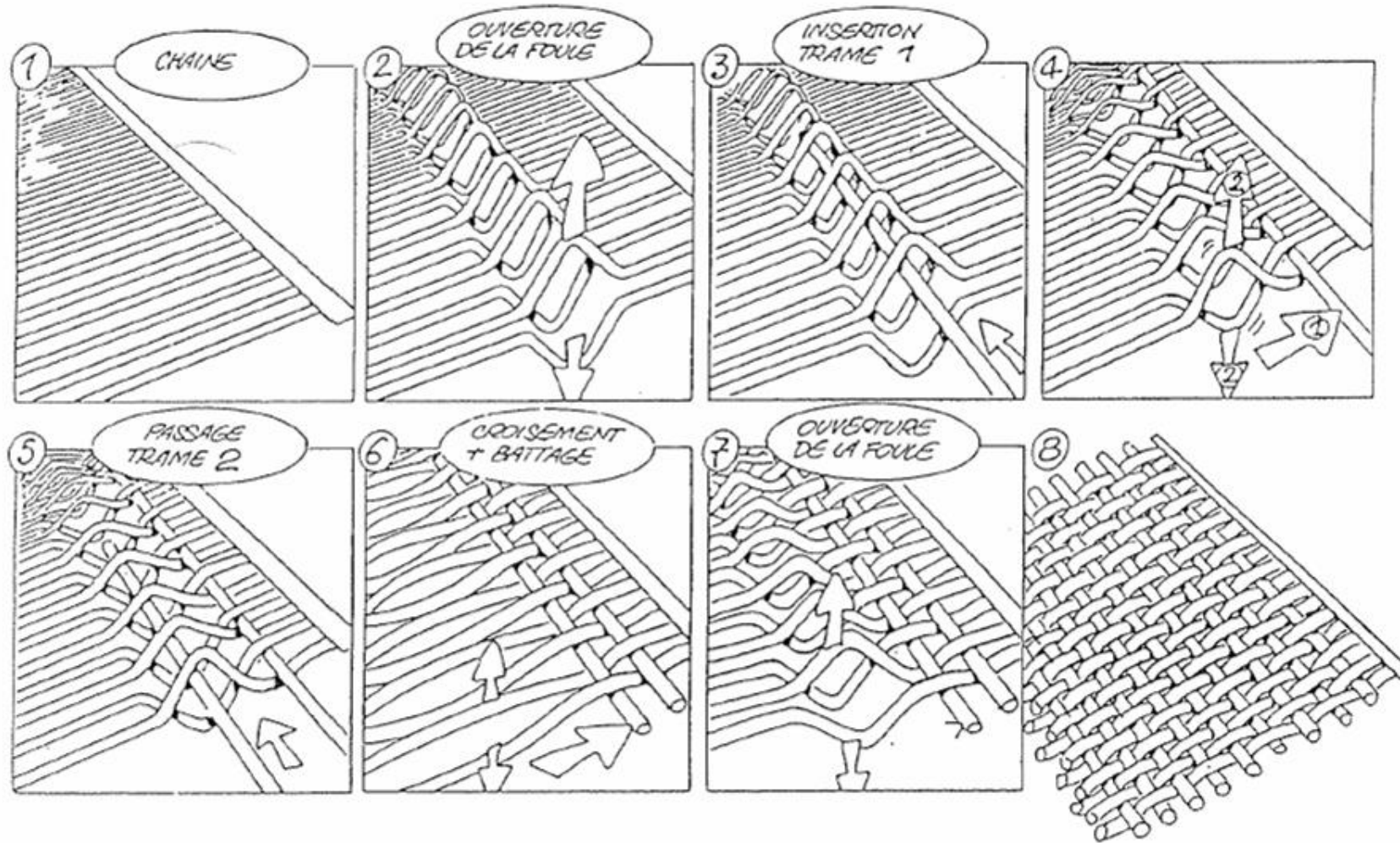
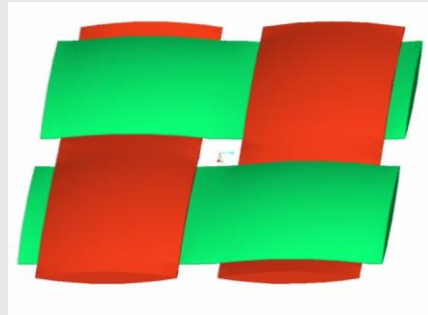
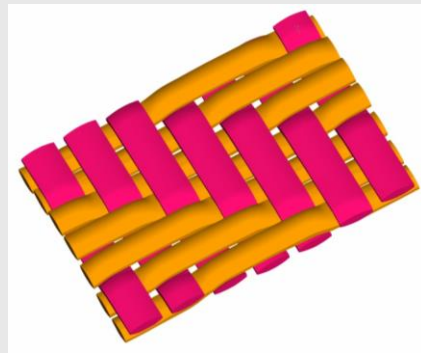


Figure 30 : Principe simplifié du tissage (source Brochier)

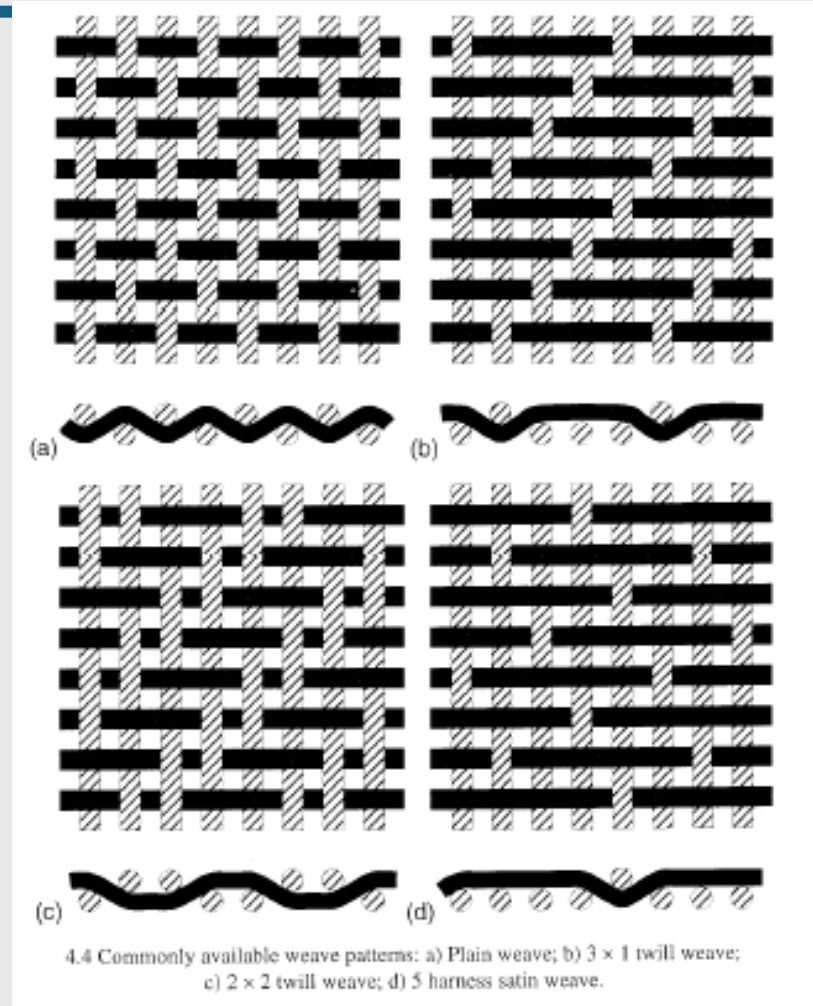
Renforts tissés 2D



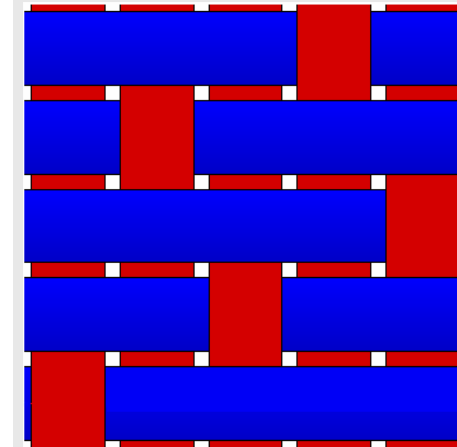
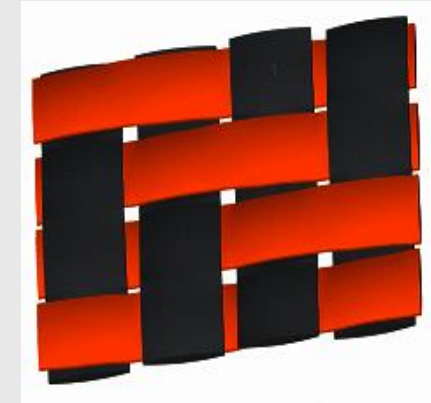
Taffetas



Sergé 4x3

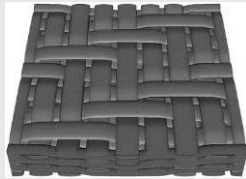
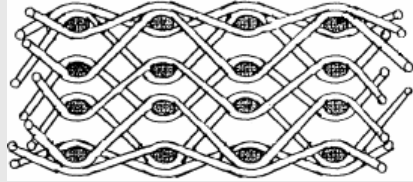


Sergé 2x2

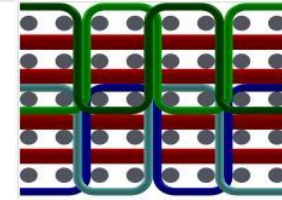
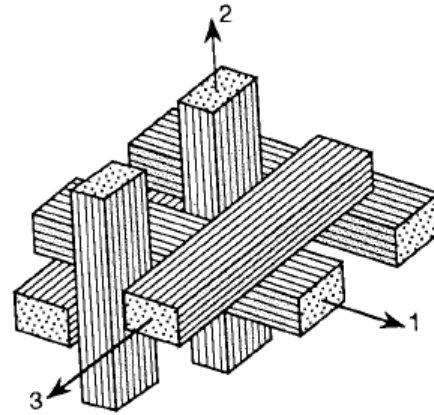
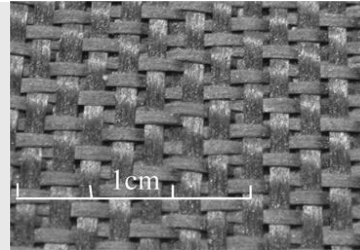
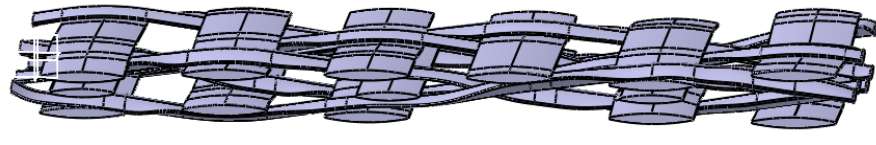
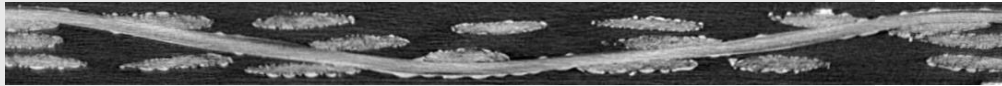


Satin 5

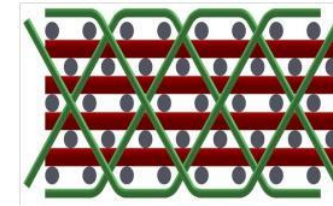
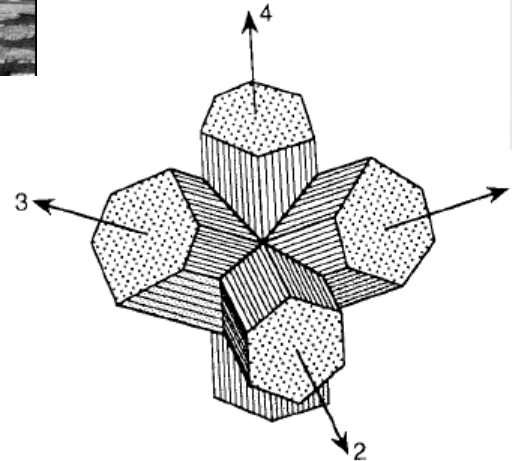
Renforts tissés 2.5D et 3D



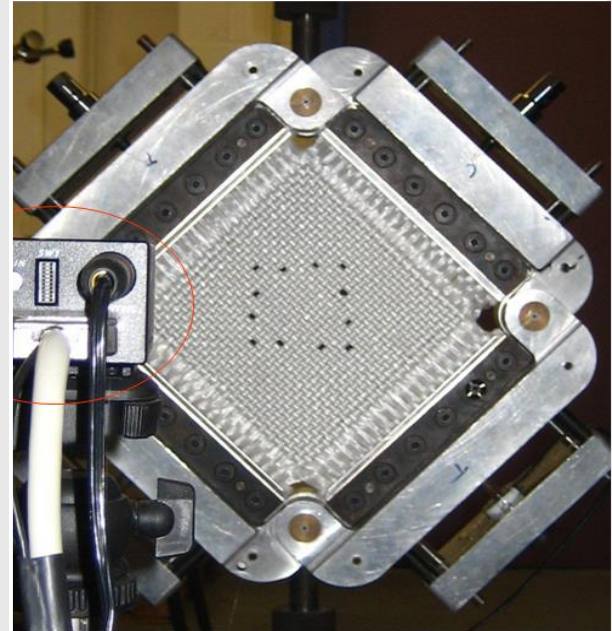
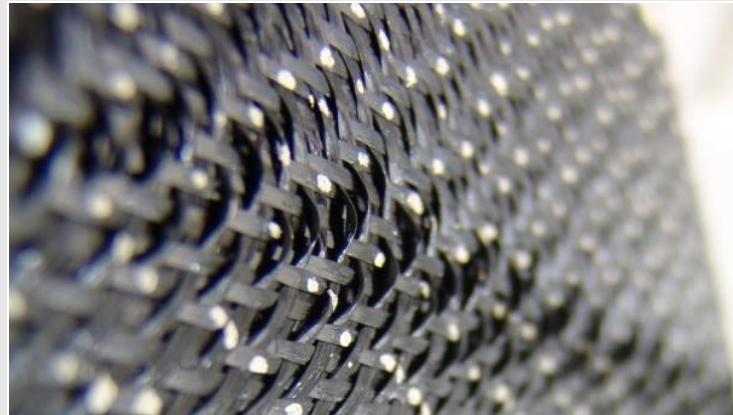
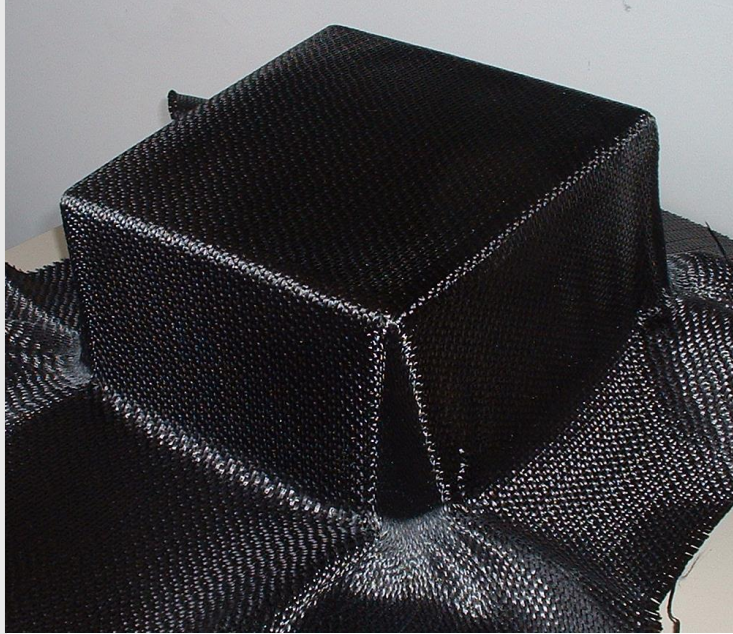
Renforts interlocks (2,5D)



Tissage 3D orthogonal



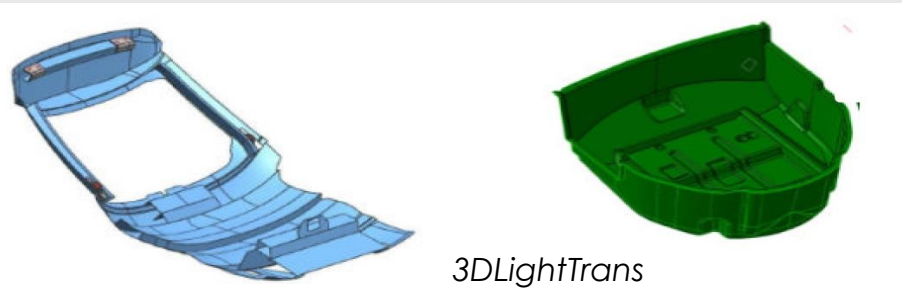
Tissage 4D



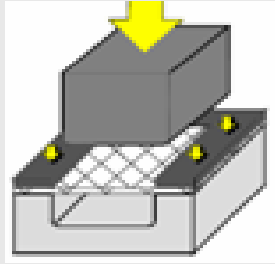
MISE EN
FORME DE
RENFORTS
TISSÉS

Procédé

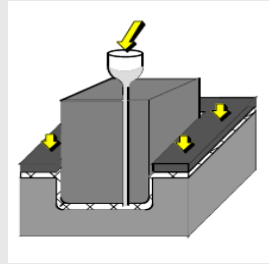
- Intérêt croissant des industriels pour intégrer des pièces composites
- Actuellement : production de **pièces de structure** de **dimensions croissantes** et de **formes de plus en plus complexes**
- Développement de procédés viables de type « **moule fermé** »
- Parmi eux : **LCM, emboutissage de renforts secs**



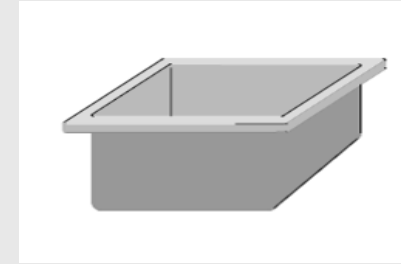
Procédé



Préformage



Injection de résine



Démoulage

Comportement de la **pièce finale** influencé par :

- Les **propriétés géométriques** du renfort déformé (densité de fibres, répartition, orientation...)
- Le **comportement mécanique** du renfort (comportement en traction biaxiale, cisaillement...)

Etape **d'injection** fortement influencée par :

- déformations subies lors de la mise en forme → modification de l'espace poral → influence sur l'injection

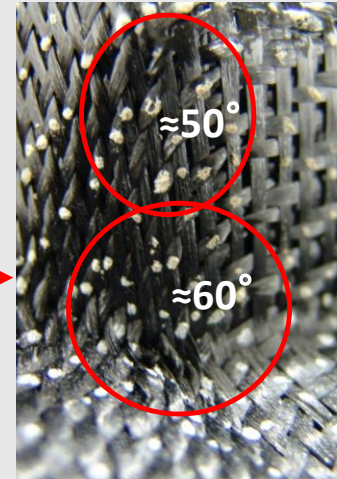
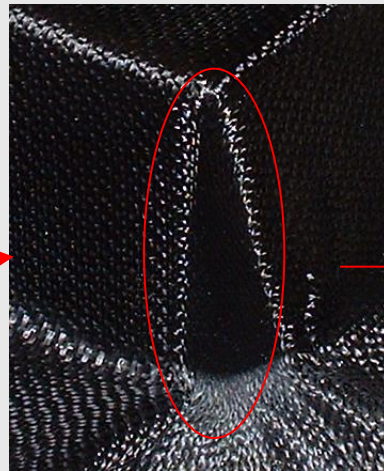
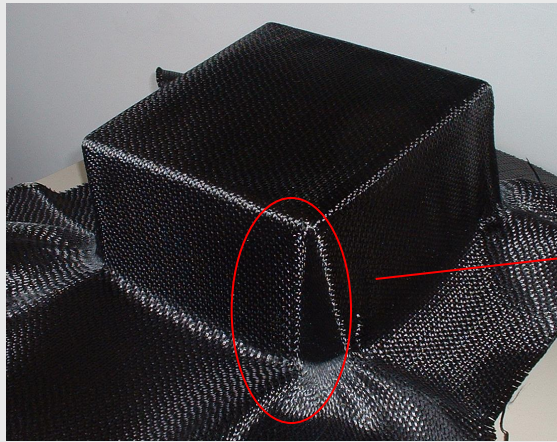


Etude de l'étape de préformage et du comportement mécanique des renforts

Formabilité

✓ **Formes non développables :**

- Forcer le renfort à épouser la forme : **tension** → matrice/serre flan
- **Déformation du réseau de fibres pour épouser la forme**



(IJMF 2013, Allaoui & al)



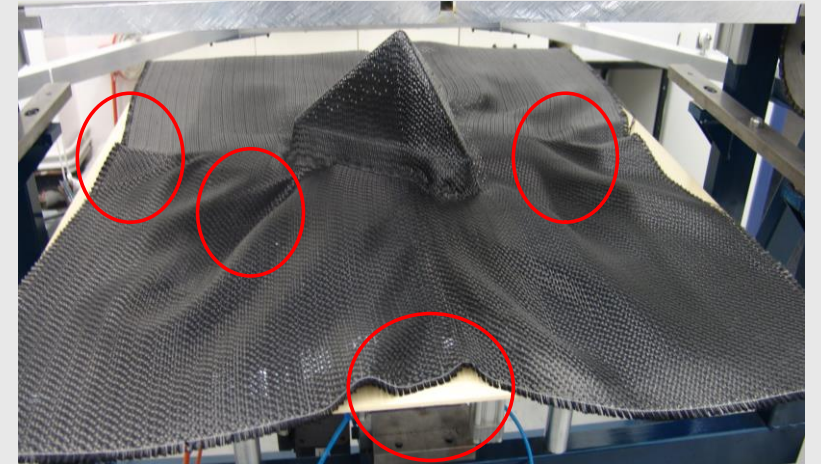
Mise en forme et défauts

An orange oval with a thin black border, centered on the page. It contains the text "Défauts de mise en forme" in white, sans-serif font, arranged in three lines.

Défauts de
mise en
forme

Formabilité

- Des plis peuvent apparaître dans la zone extérieure mais aussi dans la zone utile



Explication avancée : **vérouillage en cisaillement** (Prodomou 1997 ¹)  ¹ Comp A Vol 28

En fait compétition et couplage

Traction
Cisaillement
Flexion

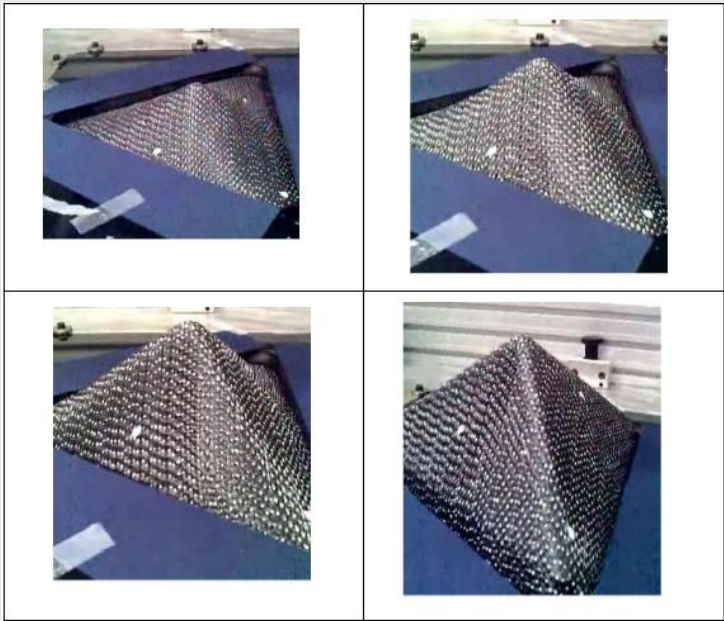
Mise en forme et défauts

Traction/Flexion/Cisaillement
des renforts

Plissements

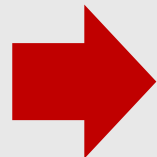
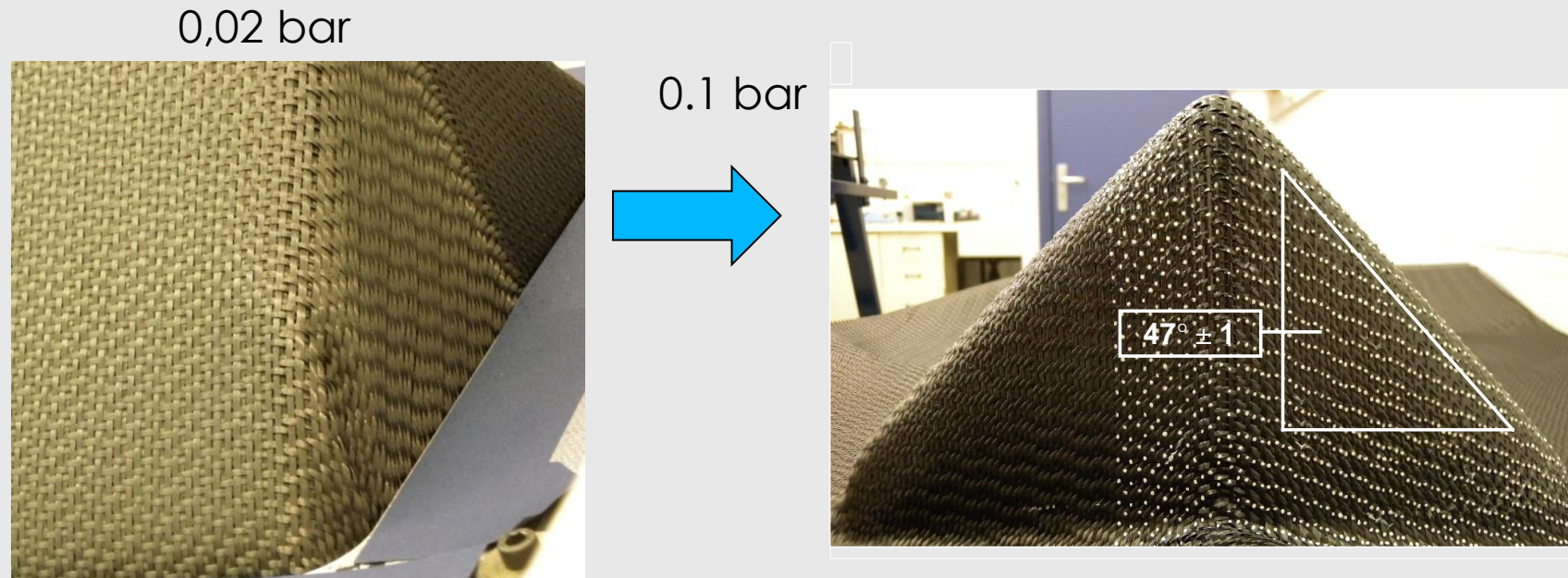


Défauts de
mise en
forme



Influence et conséquences de l'effort serre-flan

- A renfort choisi → Augmenter la pression serre-flan

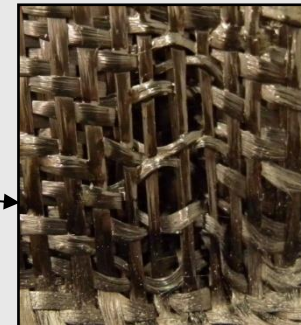
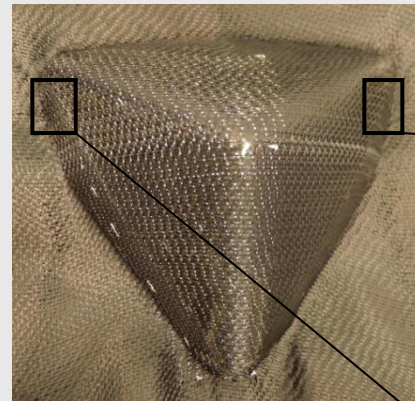
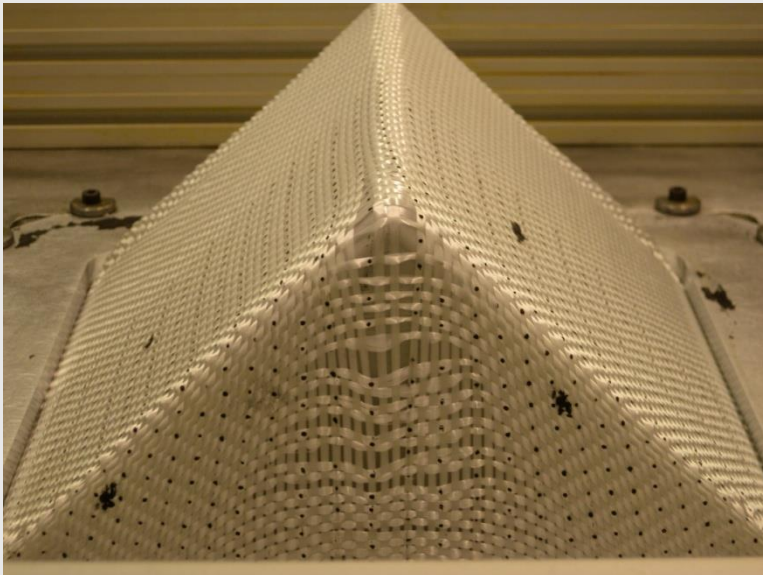


Tend à repousser l'apparition des plis (RCMA 2011¹)

¹Allaoui & al. vol 21

Influence et conséquences de l'effort serre-flan

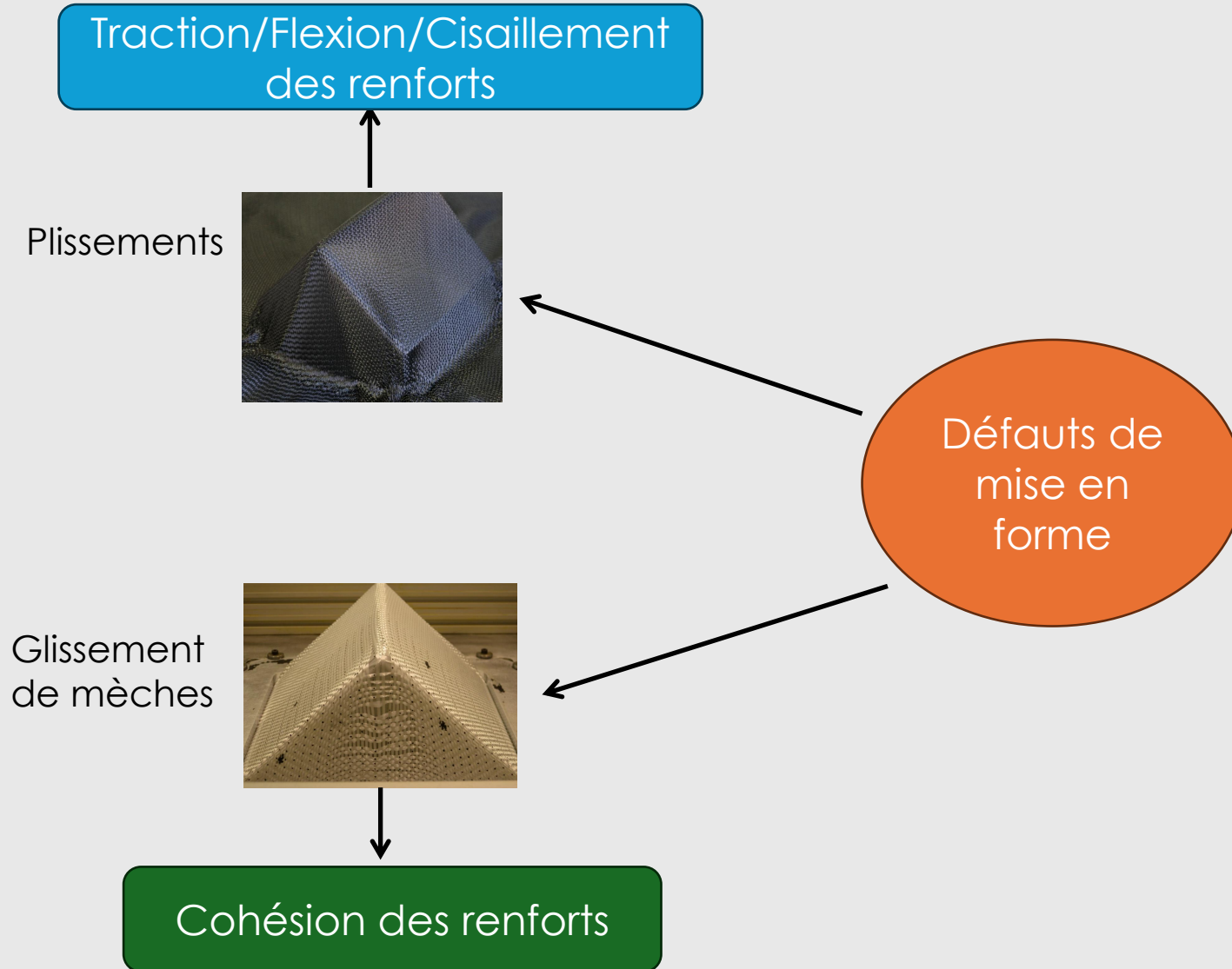
- ↗ **effort serre-flan**
 - **Cohérence du renfort peut-être mise à mal** (4-5 bars pour le G1151[®], dès quelques 1/100^{ème} de bar des renforts moins cohérents)
 - **Glissement des réseaux** (*IJMF 2013¹, ECCM 14²*)
 - **Notamment pour des renforts à faible cohésion**



¹Allaoui & al

²Wendling & al, 2010

Mise en forme et défauts



Mise en forme et défauts



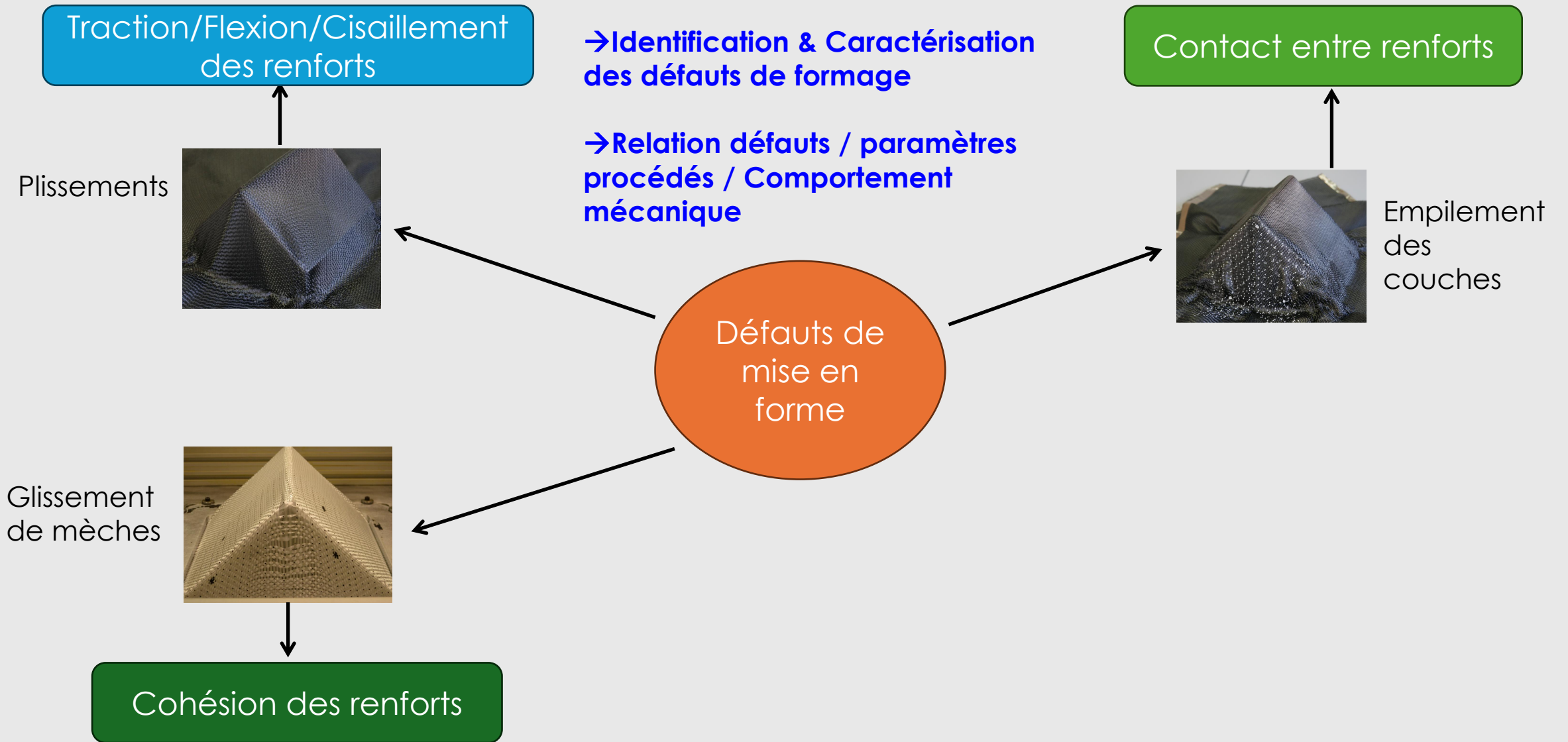
Résultat monopli 45°

Du multipli au frottement

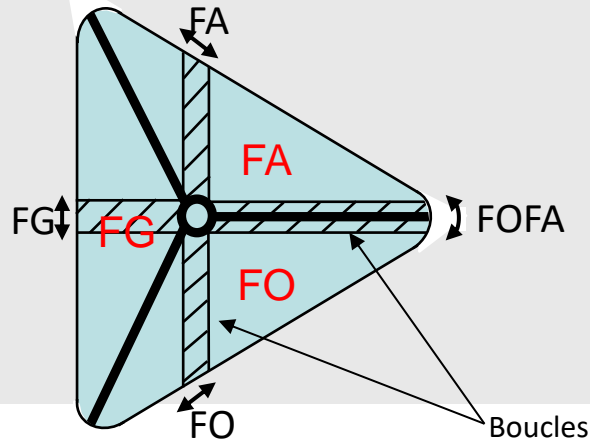
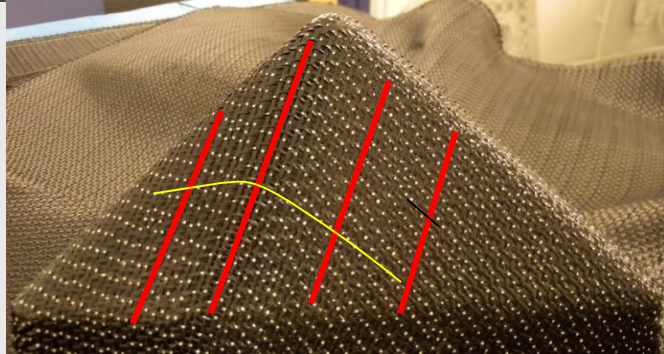
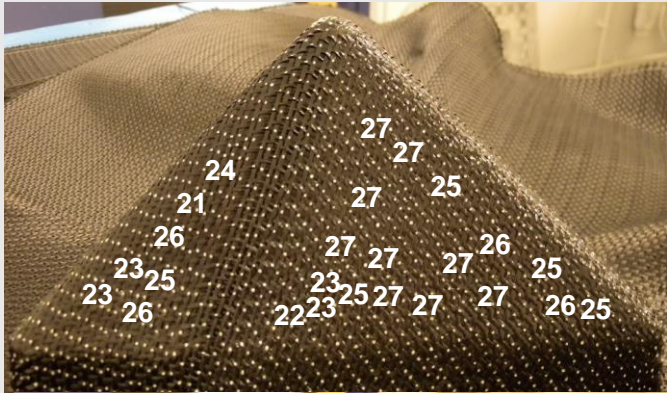
Résultat multipli 0/45°



Mise en forme et défauts

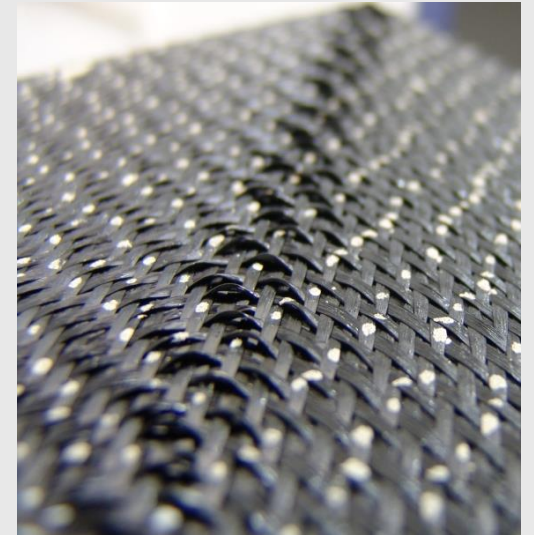
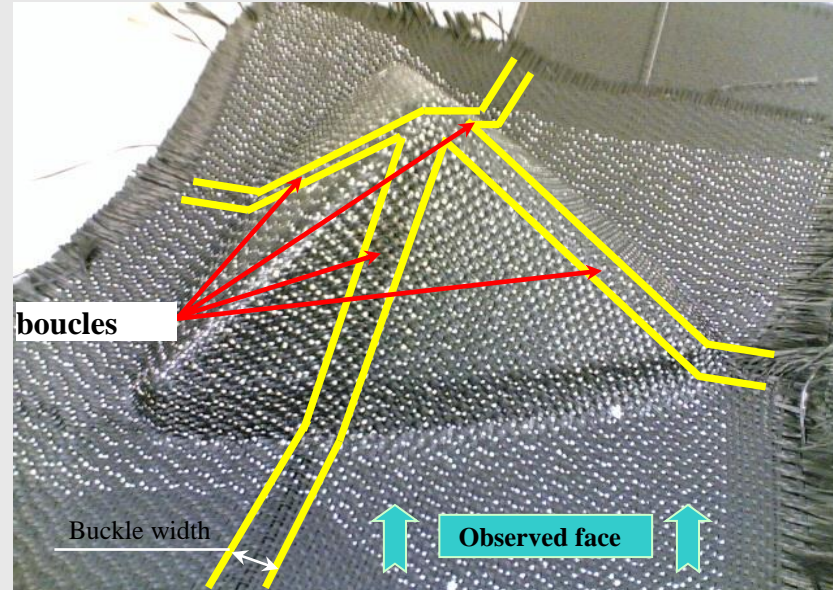


Mise en forme et défauts



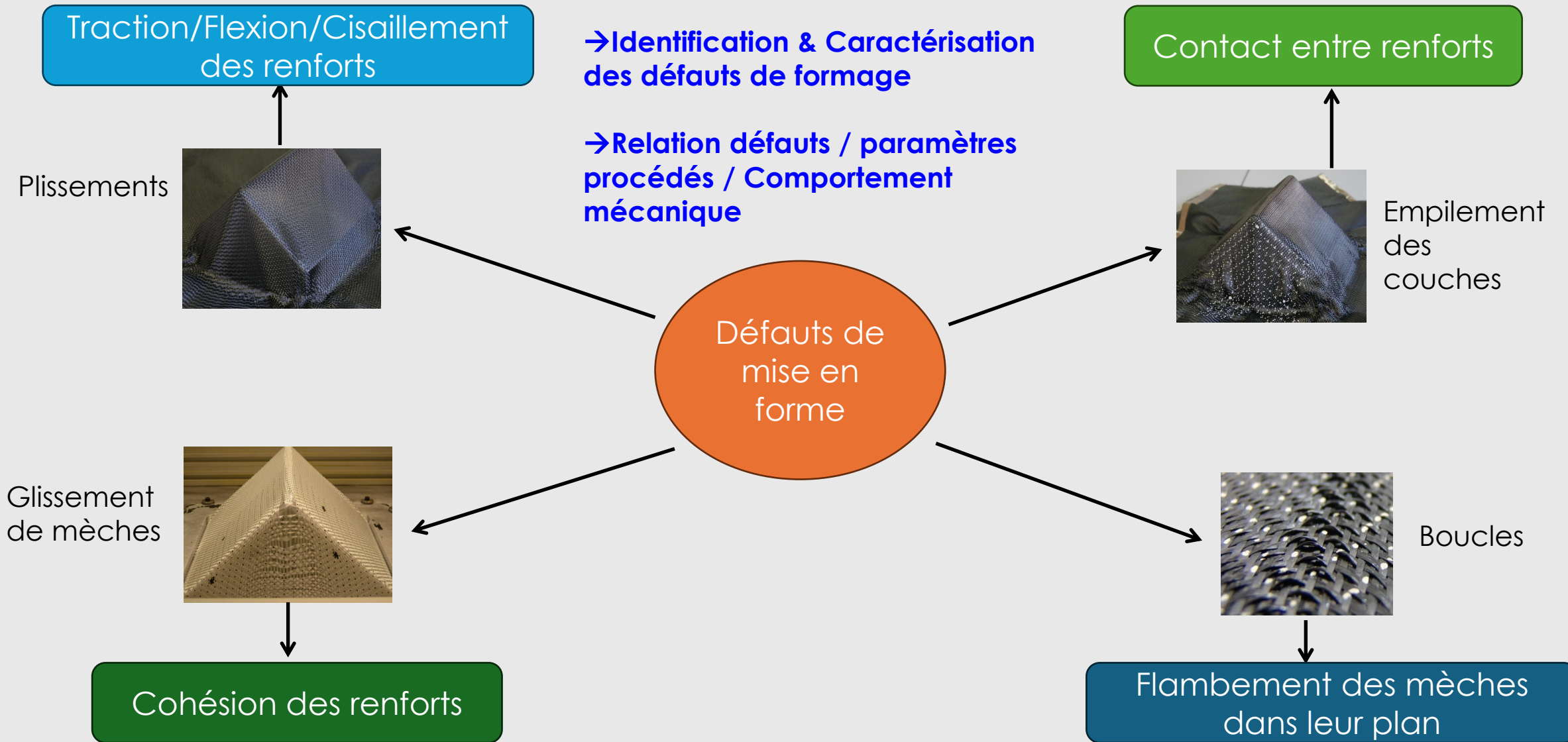
✓ **Poinçons prismatique et tétraédrique :**

- **Diminution des angles de cisaillement**
- **Un nouveau type de défaut apparaît : « les boucles »** (ICCM 17¹, Adv Comp Let 2011²)



¹Hivet & al, 2010 ²Ouagne & al, vol

Mise en forme et défauts

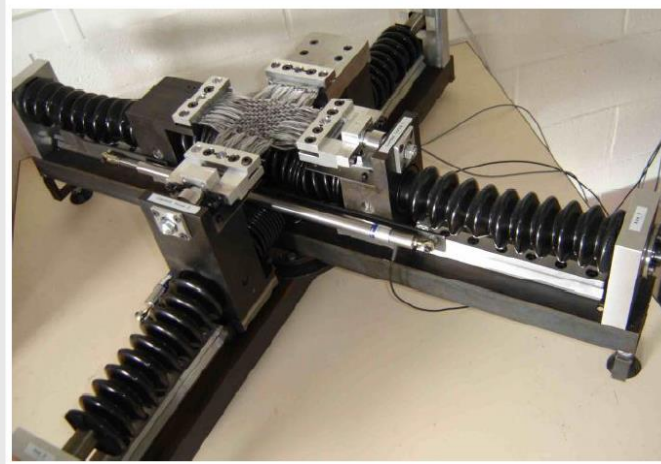


Enjeux de la formabilité des renforts

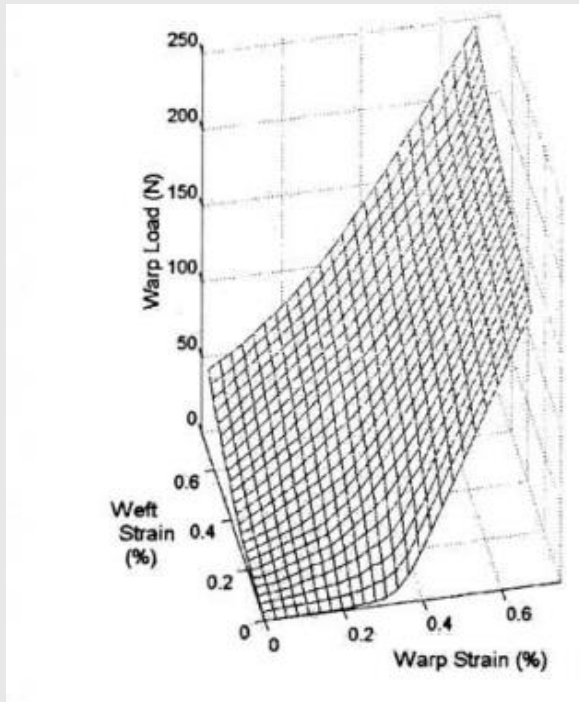
- **Développer les procédés de formage automatiques :**
 - **Analyser, comprendre les mécanismes de déformation du renfort lors de la mise en forme**
 - Maitriser, en tout point la forme finale :
 - **L'orientation** des mèches
 - **L'intégrité** des mèches
 - **La densité de** mèches
 - **Définir, caractériser, analyser, modéliser l'impact des paramètres du duo procédé/matériau**

Comportement mécanique des renforts

Traction biaxiale



choix des rapports et de l'histoire des déformations

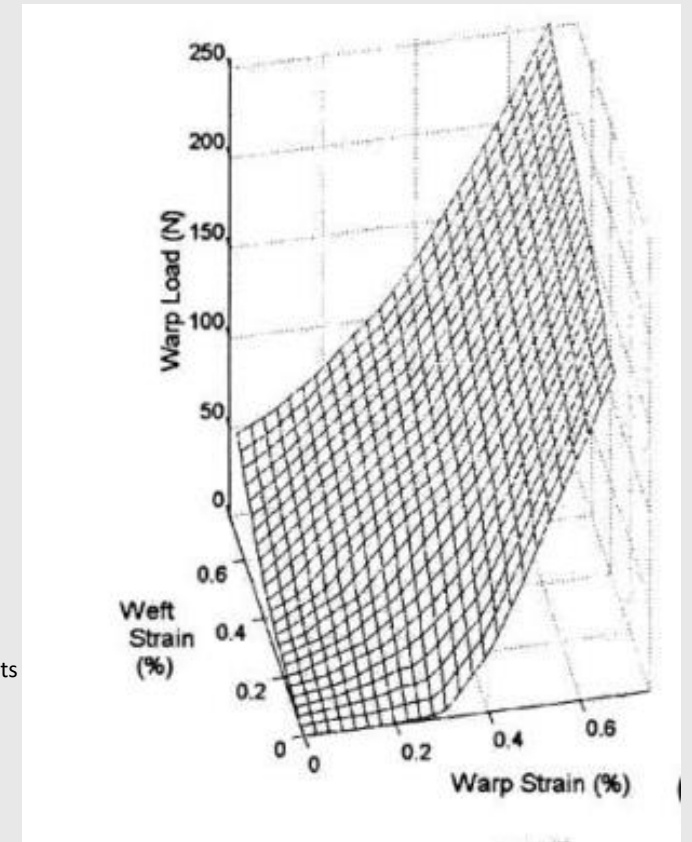


Non linéarité – anélasticité - biaxialité

Hivet G, Launay J, Gasser A, Daniel JL, Boisse P. Mechanical Behaviour of Woven composites reinforcements while forming. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2002;15(6):545-55.

Boisse P, Gasser A, Hivet G. Analyses Of The Fabric Tensile Behaviour Surfaces And Their Use In Forming Simulations, *Composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001;32(10):1395-414.

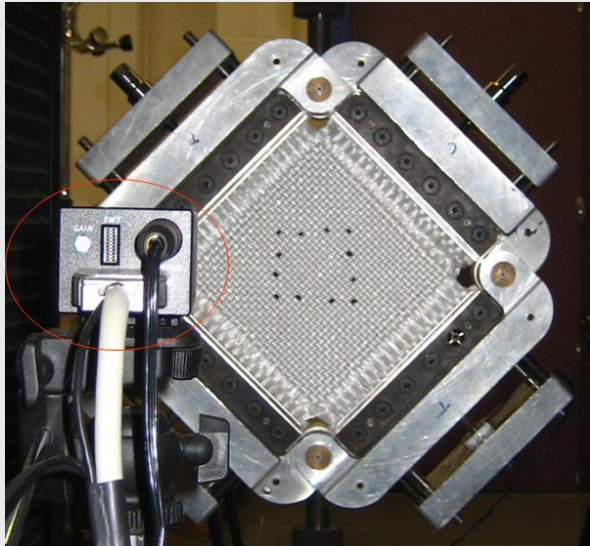
Boisse P, Buet K, Gasser A, Launay J. Meso/macro-mechanical behaviour of textile reinforcements for thin composites. *Composites Science and Technology*. 2001;61(3):395-401.



Comportement mécanique des renforts

Bias Test

Cisaillement

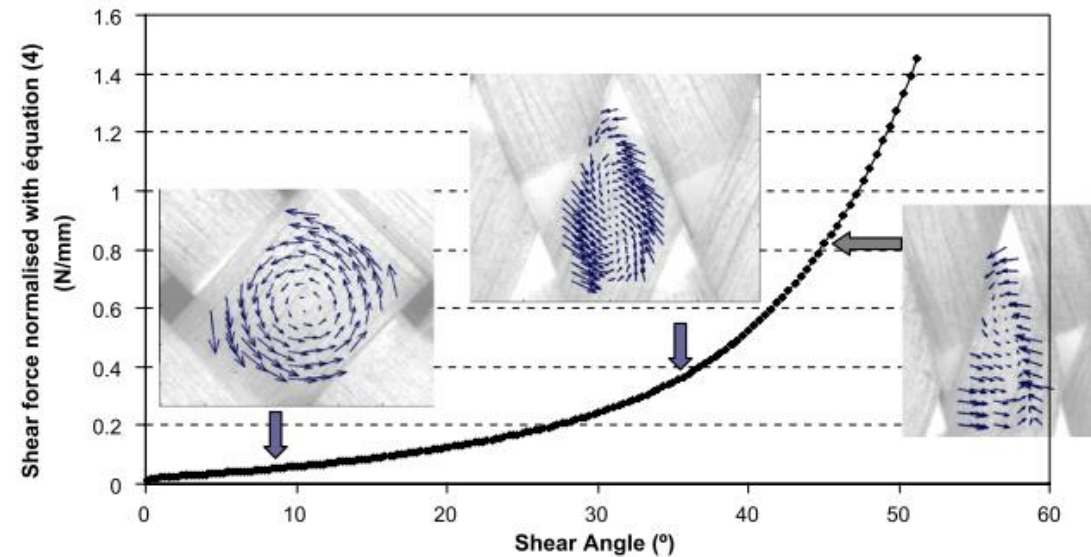
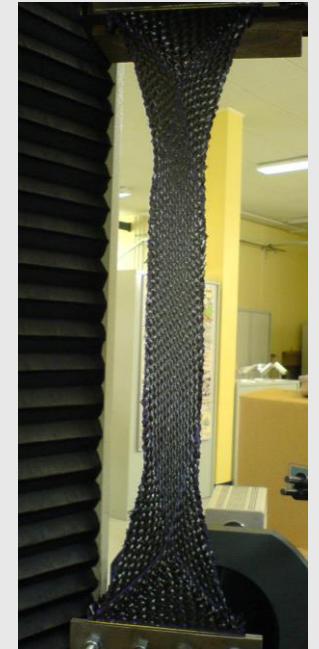
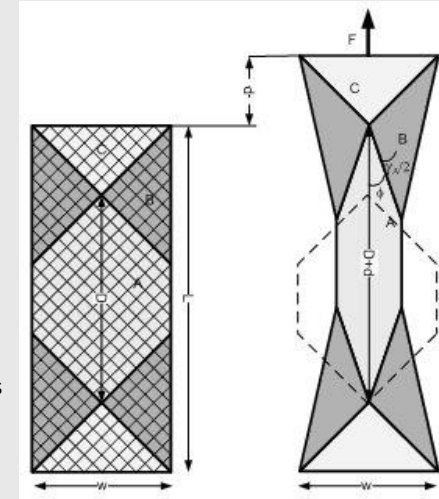


Picture Frame avec tension contrôlée

Hivet G, Launay J, Boisse P. Meso-Macro Optical Experimental Analysis of Woven Composite Reinforcement in Plane Shear during their Forming. *Finite International Journal of Forming Processes*. 2005;8:157-67.

Launay J, Hivet G, Duong AV, Boisse P. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements. *Composites Science and Technology*. 2007;68(2):506.

Hivet G, Duong AV. A contribution to the analysis of the intrinsic shear behavior of fabrics. *Journal of Composite Materials*. 2010;45(6):695-716



Comportement mécanique des renforts

Compression

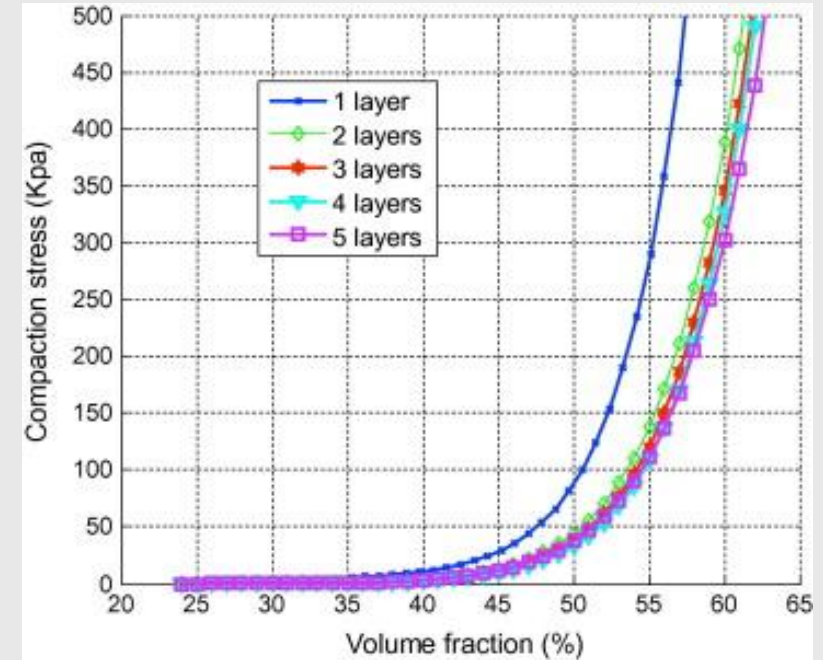
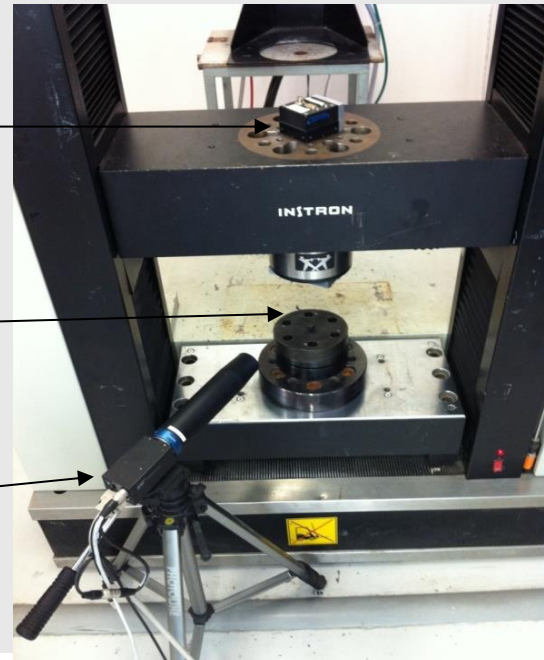
Difficile à mettre en oeuvre :

- 1 pli → faible épaisseur
- Plusieurs plis → nesting ?

Caméra en vue
de dessus

Emplacement de
l'échantillon

Caméra en vue
de côté

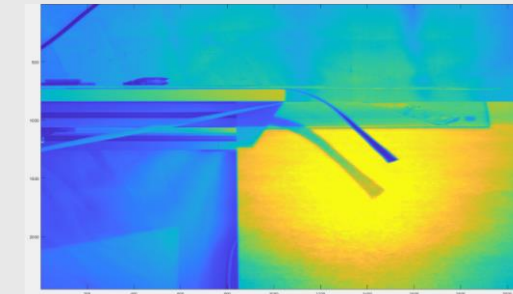
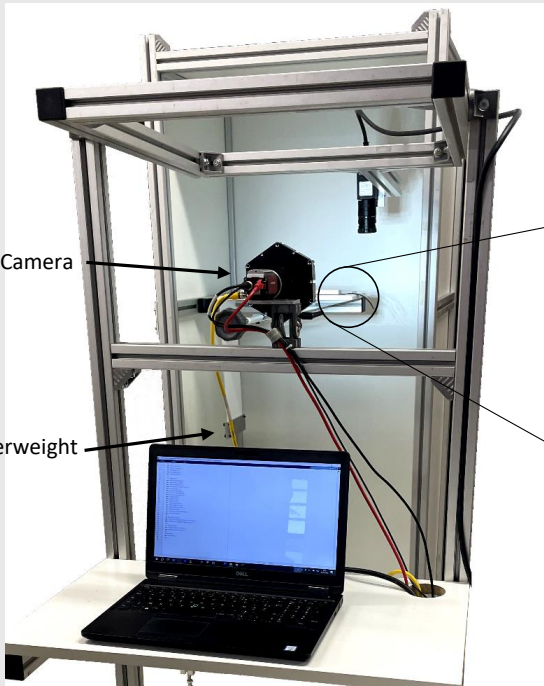


Q.T. Nguyen, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, C.H. Park, A. Saouab, J. Bréard, G. Hivet, Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction, *Composites Part B: Engineering*, Volume 44, Issue 1, 2013, pp 231-241,

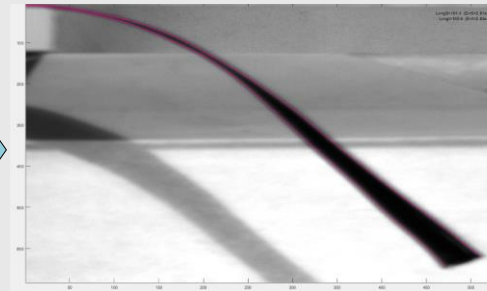
Comportement mécanique des renforts

Flexion

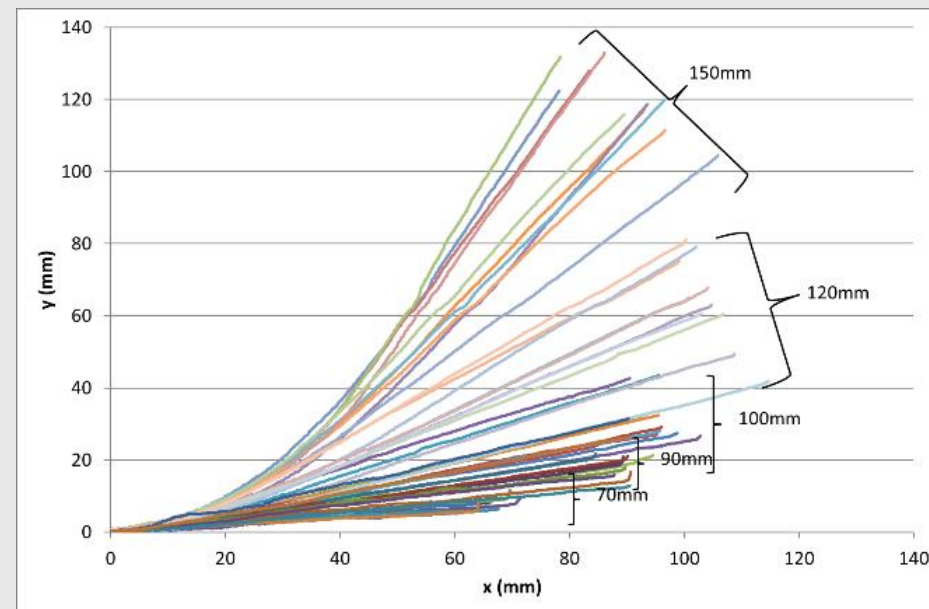
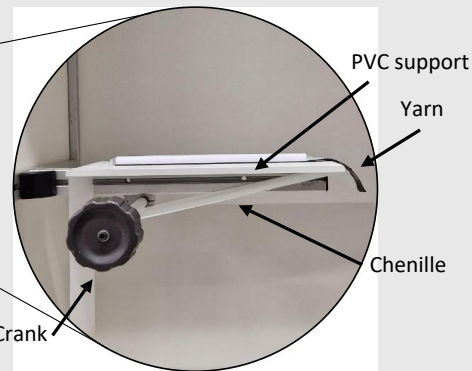
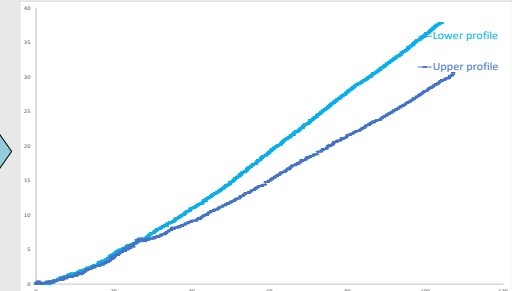
Cantilever généralisé



Binarization and profile extraction by Matlab

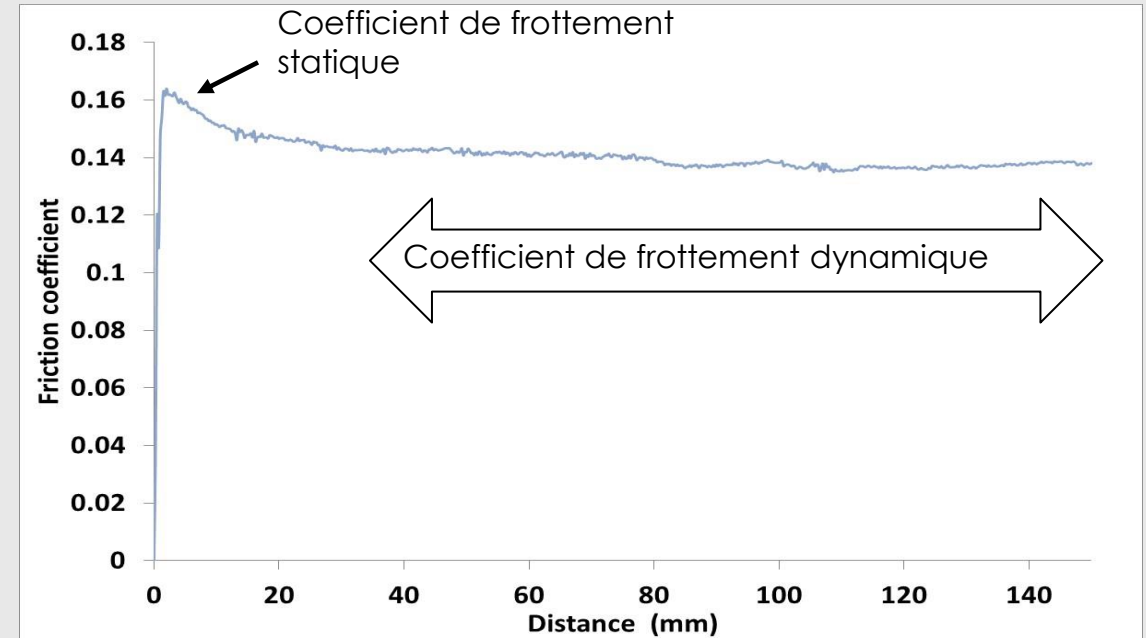
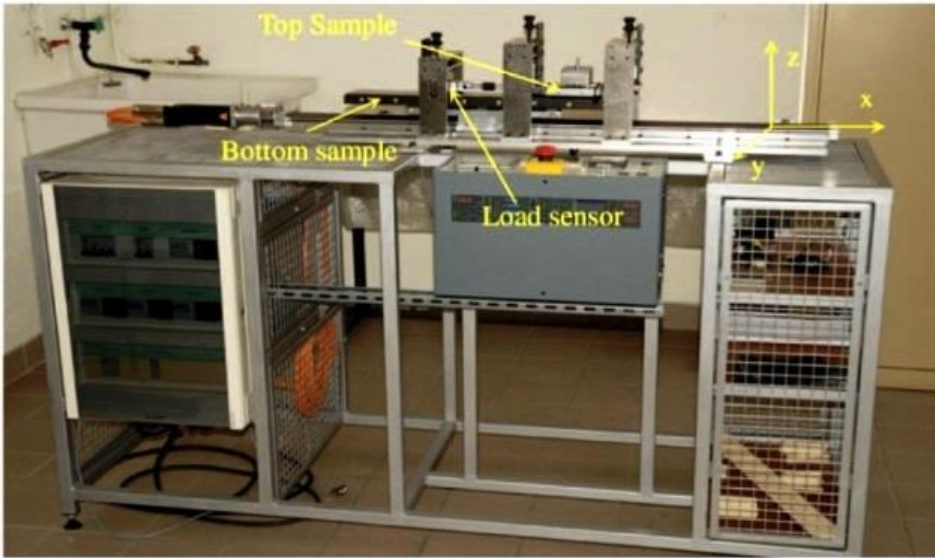
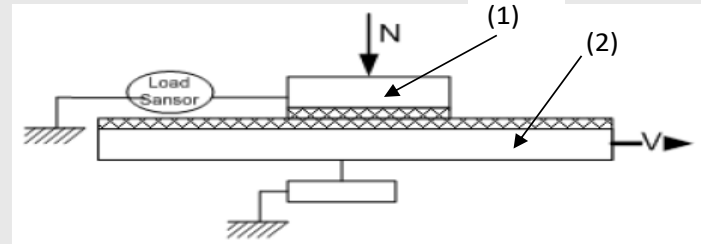


Points calculation and profile shape



Comportement mécanique des renforts

Frottement



Allaoui S, Hivet G, Cellard C. Inter-ply friction effect on the forming result of multi-layered composite. Key Engineering Materials. 2015;651-653:381-6.

Allaoui S, Hivet G, Ouagne P. Analyze of the contact behavior between two layers of dry glass plain weave fabric. Key Engineering Materials. 2012;504-506:313-8.

Allaoui S, Hivet G, Wendling A, Ouagne P, Soulat D. Influence of the dry woven fabrics meso-structure on fabric/fabric contact behaviour. Journal of Composite Materials. 2012;46(6):627-39.

Hivet G, Allaoui S, Cam BT, Ouagne P, Soulat D. Design and potentiality of an apparatus for measuring yarn/yarn and fabric/fabric friction. Experimental Mechanics. 2012;52(8):1123-36.

Sachs U, Akkerman R, Fetfatsidis K, Vidal-Sallé E, Schumacher J, Ziegmann G, et al. Characterization of the dynamic friction of woven fabrics: Experimental methods and Benchmark results. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2014;67:289-98

Enjeux de la formabilité des renforts

➤ Développer les procédés de formage automatiques :

➤ Analyser, comprendre les mécanismes de déformation du renfort lors de la mise en forme

➤ Maîtriser, en tout point la forme finale :

➤ **L'orientation** des mèches

➤ **L'intégrité** des mèches

➤ **La densité de** mèches

➤ Définir, caractériser, analyser, modéliser l'impact des paramètres du

Nombreuses sollicitations

Caractérisées expérimentalement

Compréhension de la relation entre fibres/comportement mécanique des mèches et comportement mécanique du renfort loin d'être achevée

Nécessite une grande quantité d'essais + limité aux renforts existants

Enjeux de la formabilité des renforts

Modélisation des phénomènes physiques

ors de la mise en forme

La densité de machines

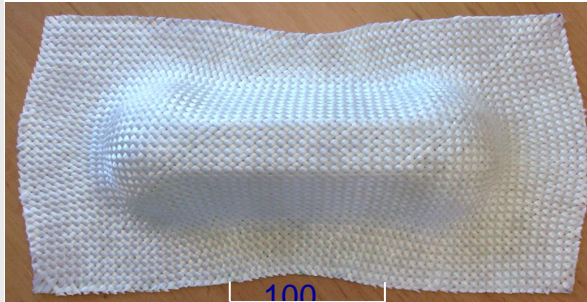
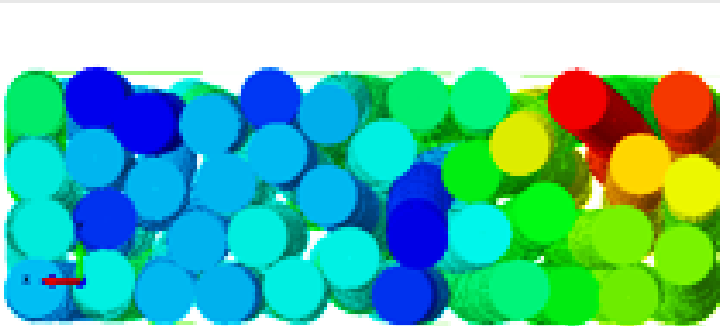
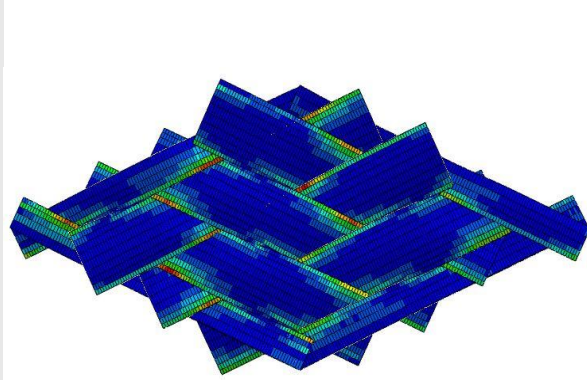
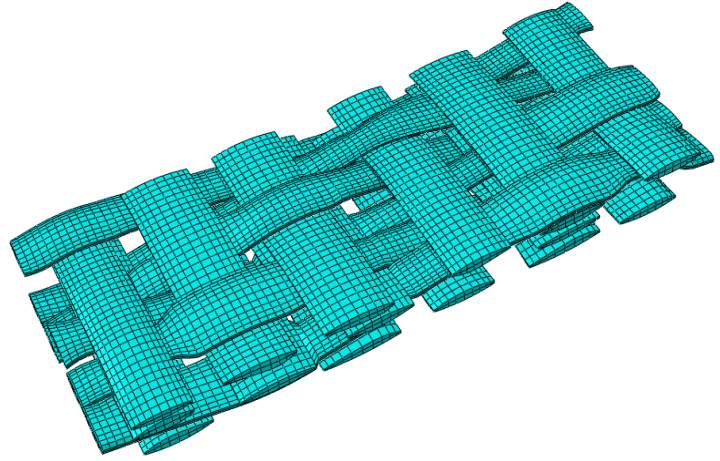
➤ Définir, caractériser, analyser, modéliser

Caractérisées

Mise en place d'outils de simulation prédictifs

Nécessite une grande quantité d'essais
+ limité aux renforts existants

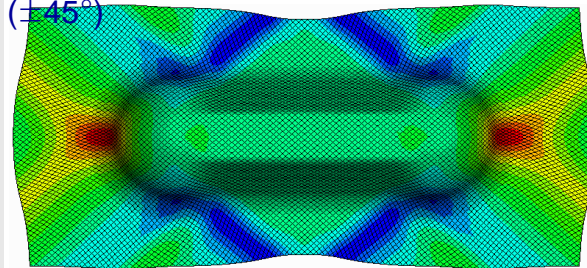
SIMULATION DE LA MISE EN FORME DE RENFORTS TISSEÉS



Experimental

100
mm

($\pm 45^\circ$)



Numerical

($\pm 45^\circ$)

Simulation de mise en forme

2 approches principales



Approches cinématiques

Approches purement géométriques

Cherouat A, Borouchaki H, Billöt JL. Geometrical and mechanical draping of composite fabric. *European Journal of Computational Mechanics*. 2005;14.

Aono M, Breen DE, Wozny MJ. Fitting a woven-cloth model to a curved surface: mapping algorithms. *Computer-Aided Design*. 1994;26(4):278-92.

Potluri P, Sharma S, Ramgulam R. Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001;32(10):1415-24

Simulation de mise en forme

The “fishnet” algorithm : méthode du filet
« Modèle cinématique »

[Mark & Taylor, 1956] [Van Der Ween, 1991]
[Long & Rudd, 1994][Cherouat & al, 2005]

HYPOTHESES:

Fils inextensibles

Rotation pure et libre au niveau des intersections entre les fils (aucun glissement)

Pas de glissement relatif entre fils et outils.

→ **Modèle très simplifié de renfort**

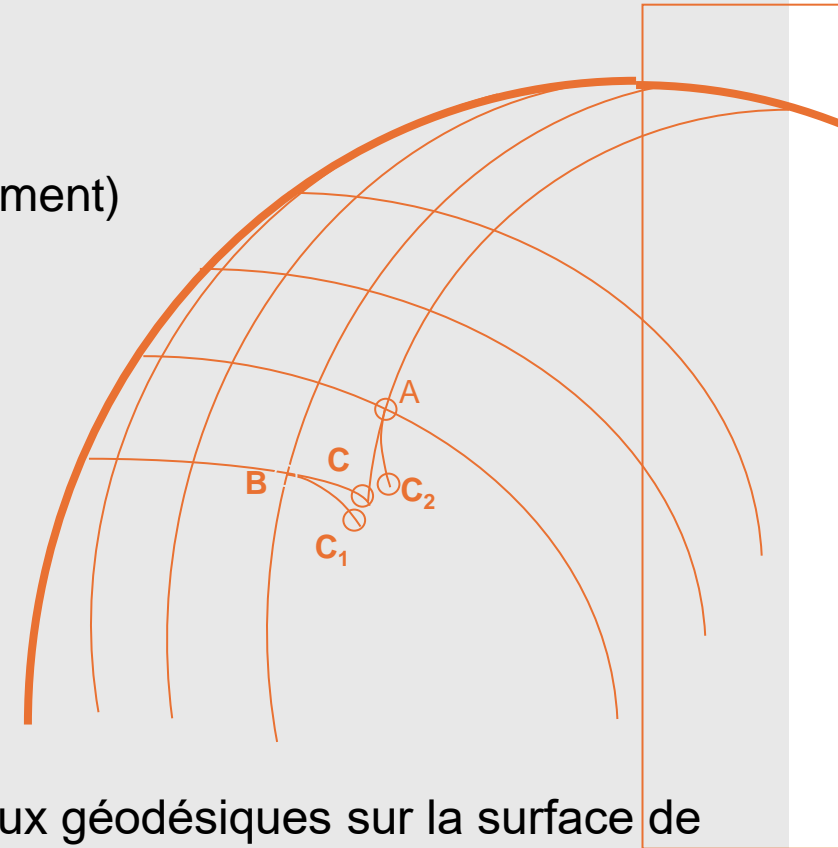
→ **Principe :**

→ **La surface de drapage est définie**

→ **Un point de départ et deux directions initiales sont définies**

→ **On en déduit deux point A et B initiaux**

→ La position du 3^{ème} point est alors définie par l'intersection des deux géodésiques sur la surface de drapage avec les longueurs inextensibles définies



Simulation de mise en forme

The “fishnet” algorithm : méthode du filet
« Modèle cinématique »

Avantages...

- Très efficace et extrêmement rapide.
- Permet d’avoir très vite une idée des problèmes potentiels et de la possibilité de formabilité
- Fonctionne bien dans des cas simples et éprouvés
- Encore très utilisé aujourd’hui : FiberSIM, ESI-QuickFORM, Catia.....

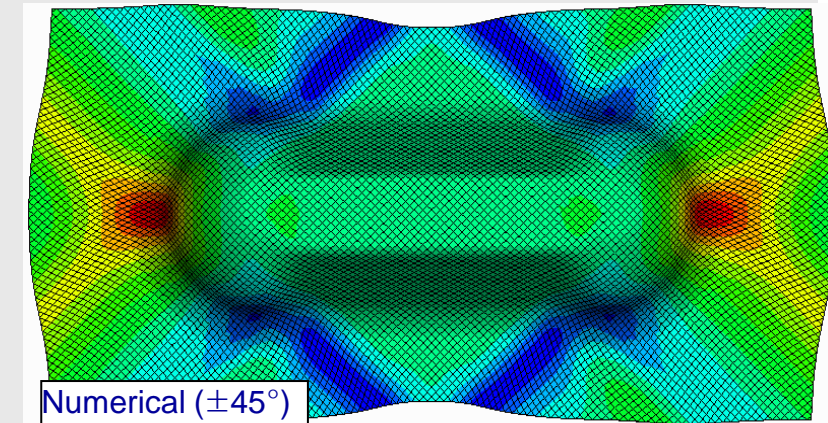
Limites....

- Le résultat est identique quelles que soient les propriétés du renfort (pas de mécanique...)
- Des adaptations existent pour introduire des rigidités.
- Le résultat peut dépendre du choix du point de départ et des deux directions.
- Les efforts sur les outils ne sont pas considérés.
- Pas de limite de cisaillement, les plis ne sont pas explicites, des adaptations avec verrouillage en cisaillement existent.



Experimental ($\pm 45^\circ$)

100 mm



Numerical ($\pm 45^\circ$)

Simulation de mise en forme

2 approches principales

Approches cinématiques

Approches par éléments finis

Approches purement géométriques

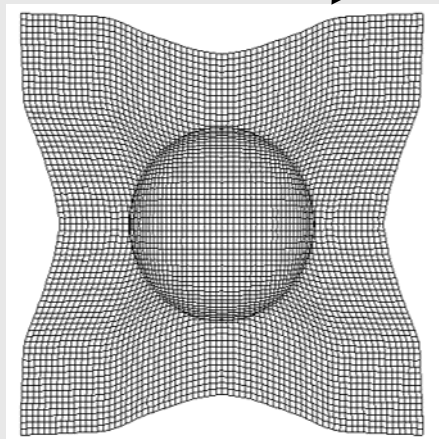
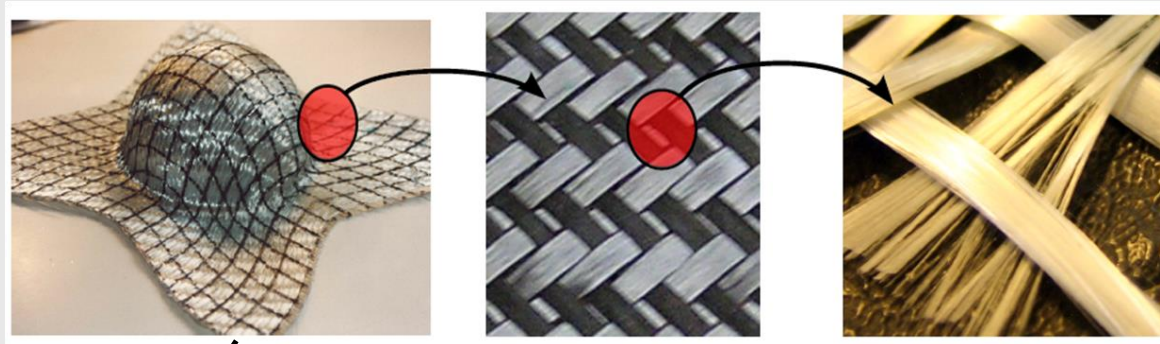
Cherouat A, Borouchaki H, Billötet JL. Geometrical and mechanical draping of composite fabric. European Journal of Computational Mechanics. 2005;14.

Aono M, Breen DE, Wozny MJ. Fitting a woven-cloth model to a curved surface: mapping algorithms. Computer-Aided Design. 1994;26(4):278-92.

Potluri P, Sharma S, Ramgulam R. Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile preforms. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001;32(10):1415-24

A quelle échelle ???

Echelle de simulation



Modèle macro

Approches macroscopiques

Le renfort est modélisé par une membrane

→ **Milieu continu.**

- La loi de comportement macroscopique doit modéliser la nature fibreuse et enchevêtrée du renfort

- **Complexe →**

- **Grandes déformations, Forte anisotropie, suivi de la direction de la fibre lors des grandes rotations.**

[Spencer, CompA, 2000][Lamers et al, IJFP, 2002]

[Yu et al, CompA, 2002] [Cao et al, CompA 2003, 05]

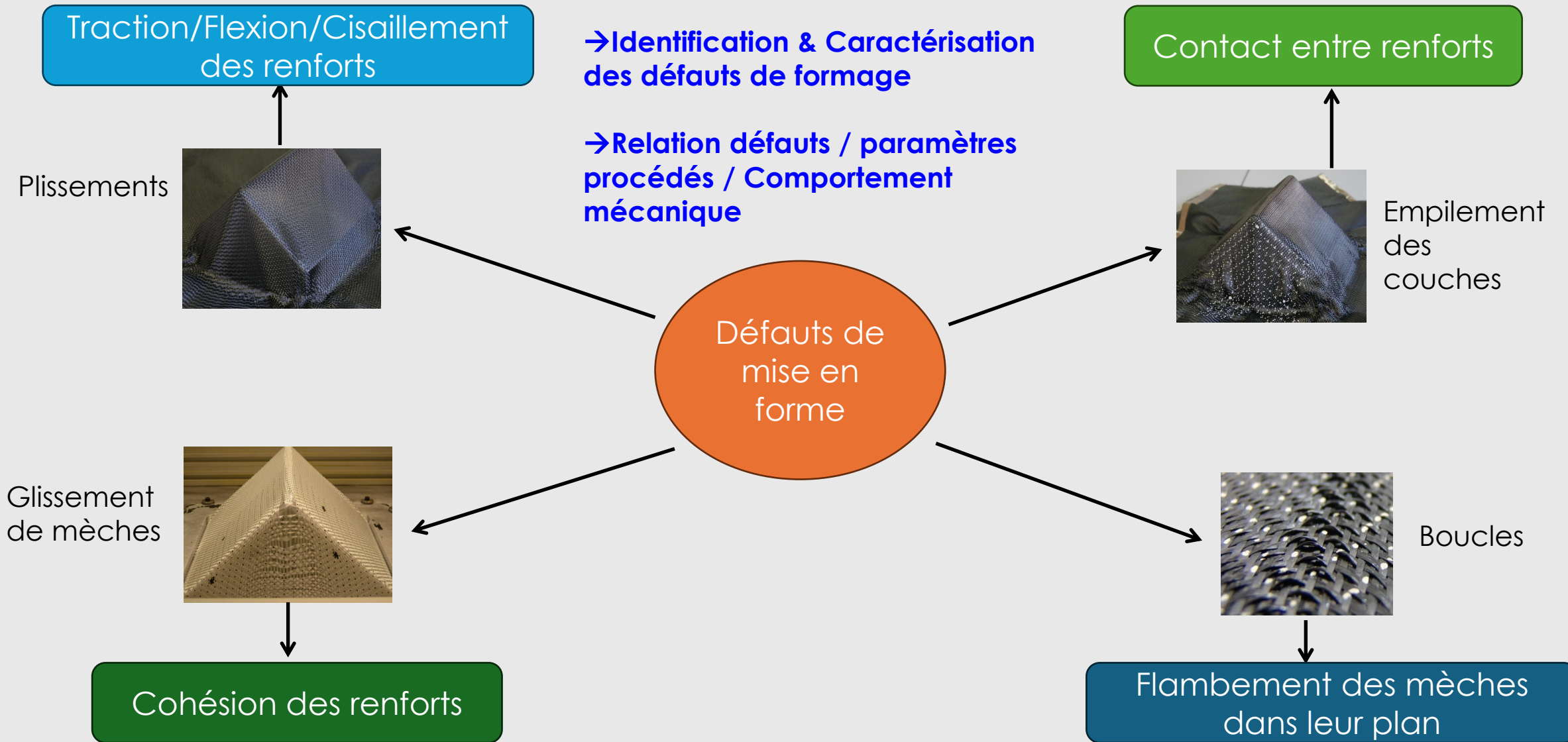
[King et al, IJSS, 2005][Boisse et al, JMS, 2005]

[Ten Thije et al, CMAME, 2007],[Badel et al, CompA, 2008].....

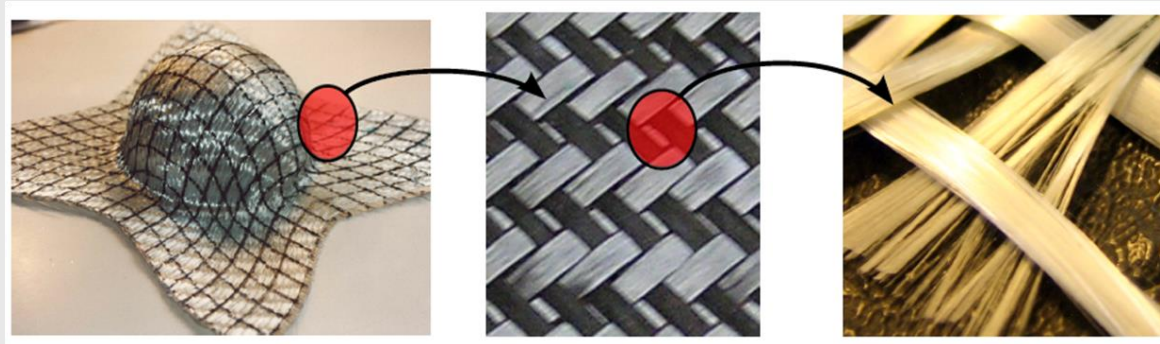
- Pas de modèle universellement accepté aujourd'hui mais de nombreuses approches concurrentes fournissent des résultats cohérents sous certaines limites.
- Les modèles continus ne peuvent pas décrire le glissement relatif des mèches.



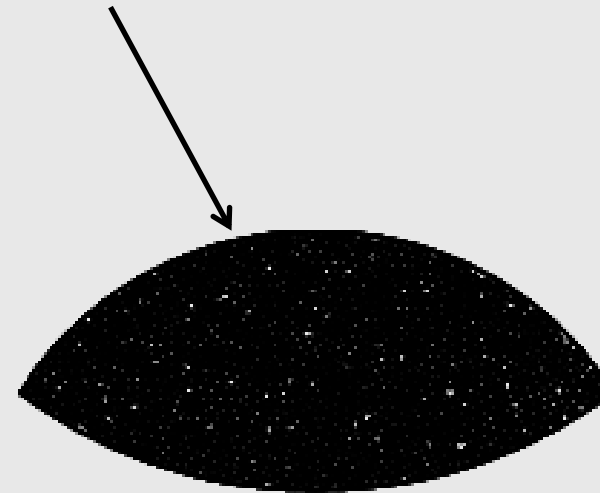
Mise en forme et défauts



Echelle de simulation



Modèle micro

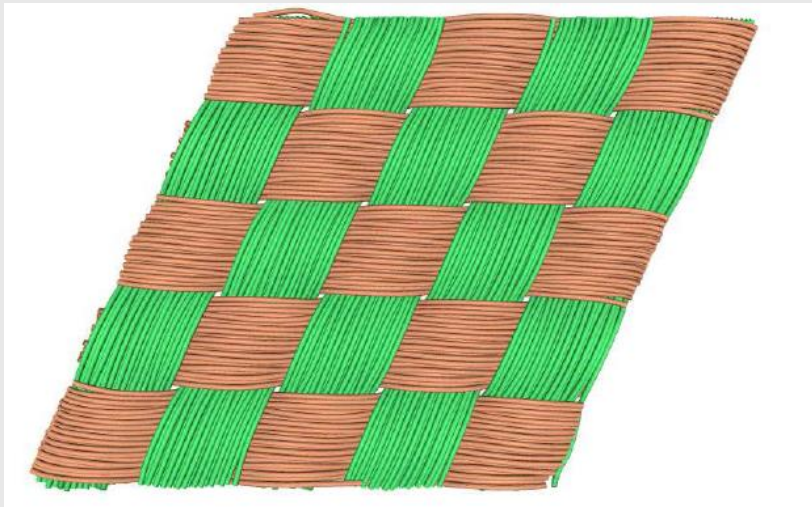


Approches microscopiques

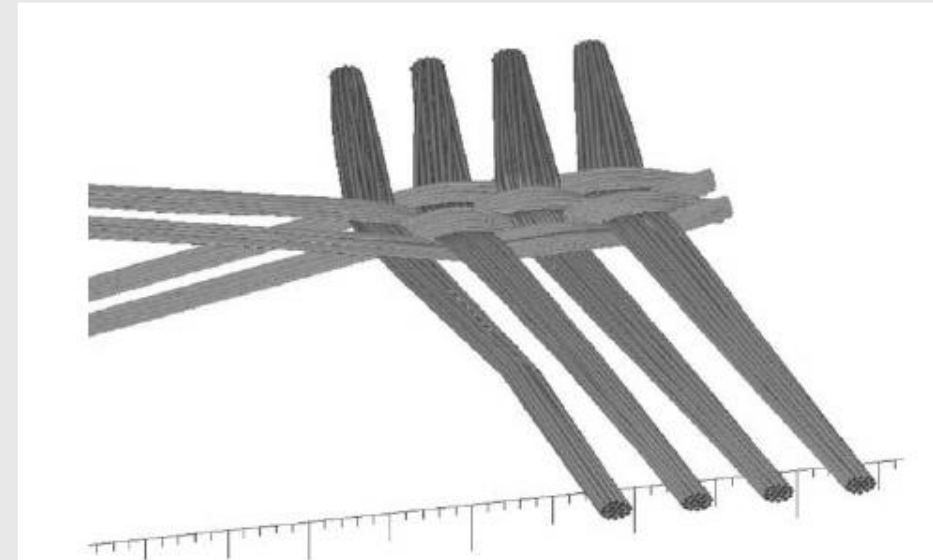
Prend en compte le contact et la distribution de milliers de fibres

[Zhou et al, CST, 04] [Durville, JMS 05]

[Duhovic & Bhattacharya, CompA 06] [Grave & Kyosev, Greenville 09]



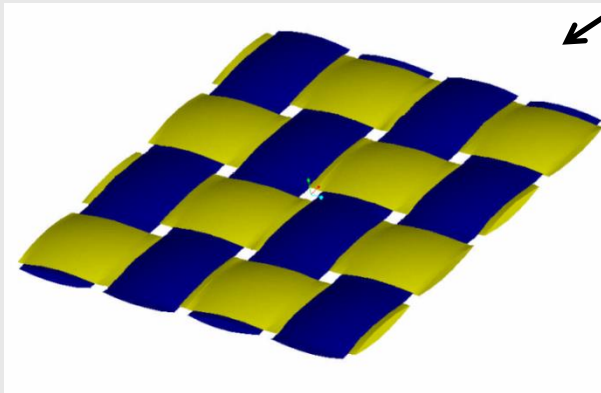
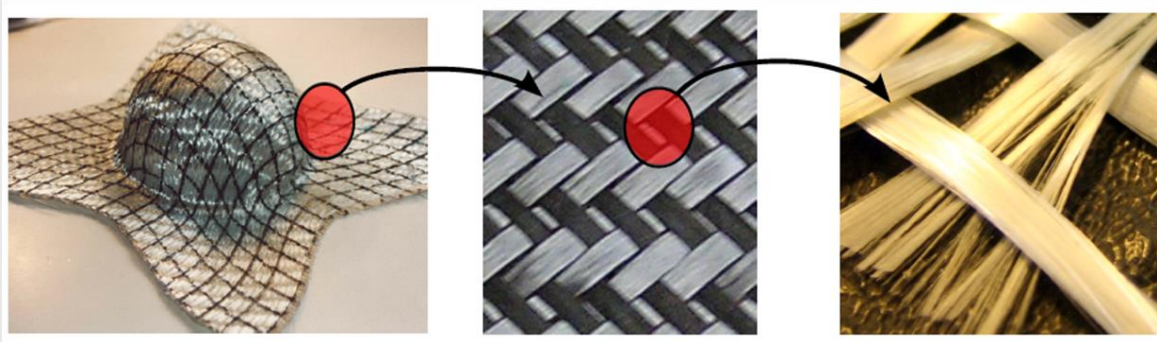
Shear test [Durville, IJMF 2010]



2-D woven fabric generated by multi-chain digital element model [Zhou et al, CST 04]

La simulation à l'échelle de la préforme n'est pas possible aujourd'hui (Calculs couteux, difficulté de prendre en compte les milliers de fibres)

Echelle de simulation : approches mésoscopiques



Modèle méso : entrelacement de mèches supposées homogènes

- ✓ Permet d'obtenir des résultats globaux et locaux : déformation des mèches, variation de forme des sections, renfort à l'état déformé
- ✓ Bon compromis entre réalité et complexité



Géométrie

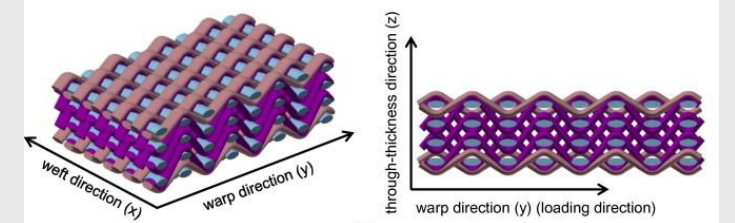
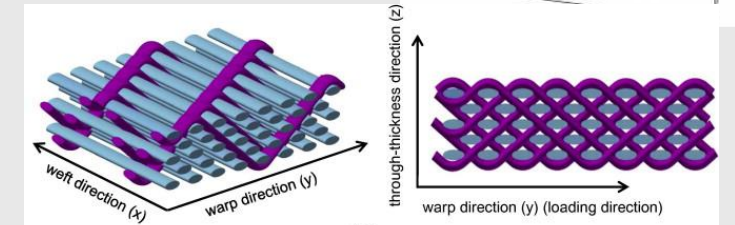
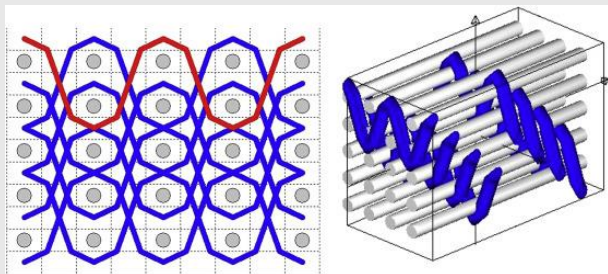
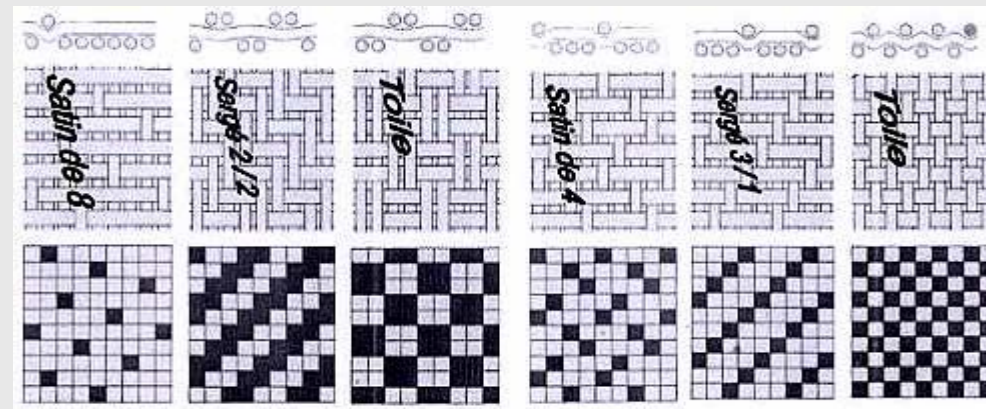
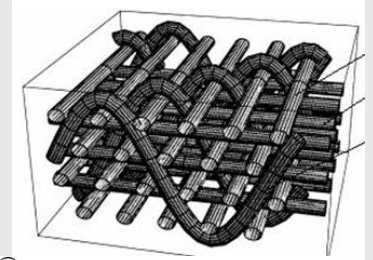
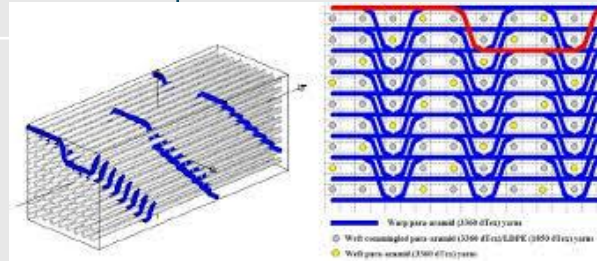
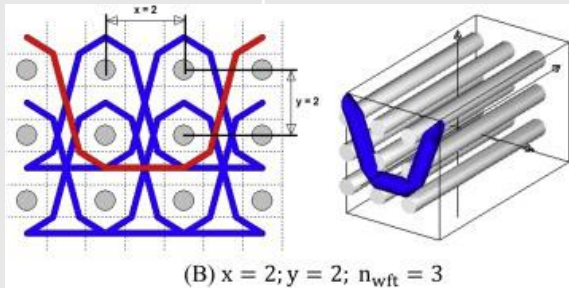


Loi de
comportement

Modélisation des renforts

Constat

Beaucoup d'architectures possibles (2D, 3D...)

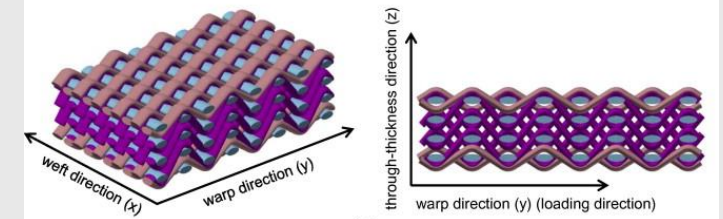
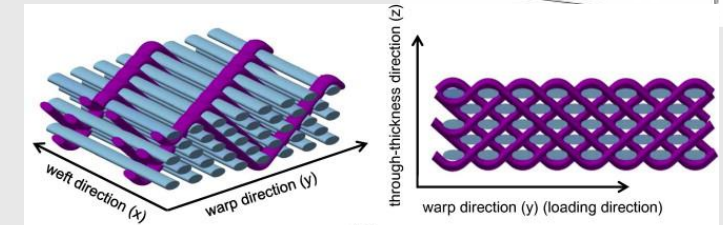
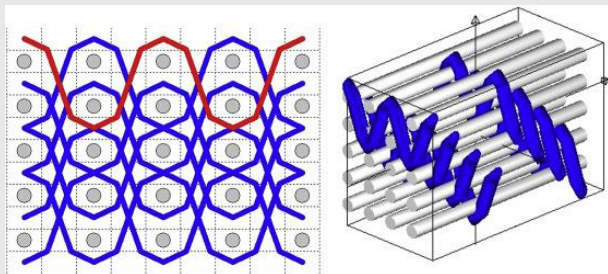
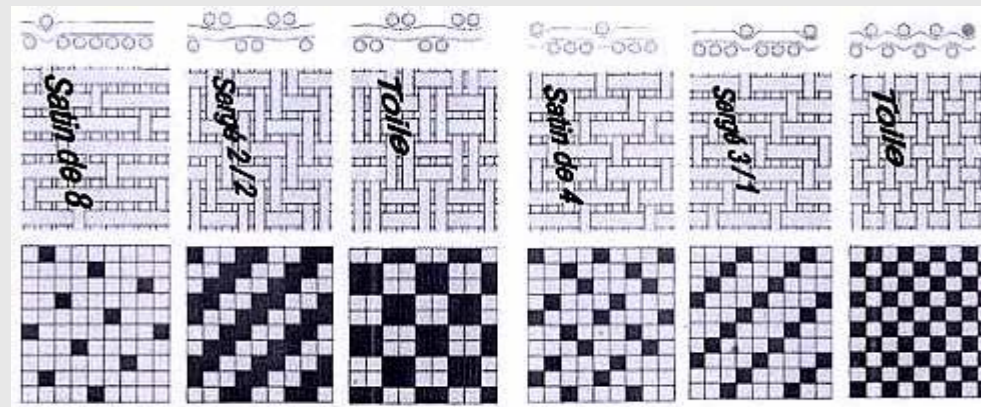
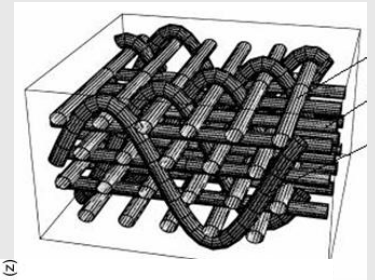
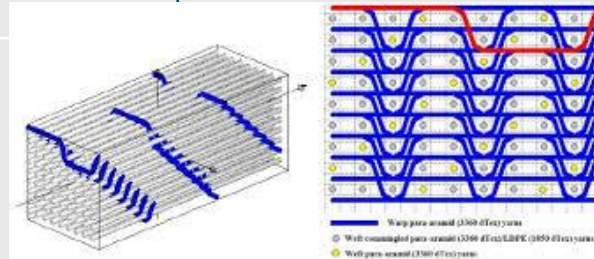
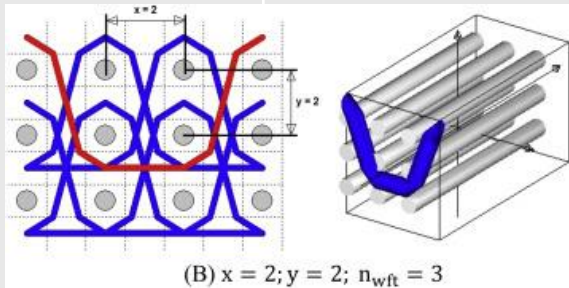


B. Yu & al., 2D and 3D of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites, Comp. Part A, 2015

Modélisation des renforts

Constat

Beaucoup d'architectures possibles (2D, 3D...)



B. Yu & al., 2D and 3D of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites, Comp. Part A, 2015

Modélisation des renforts

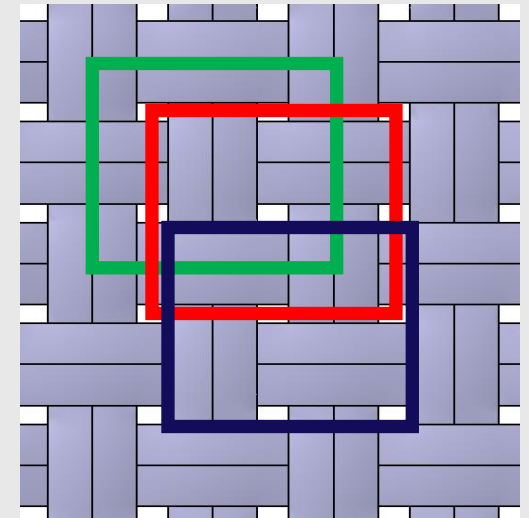
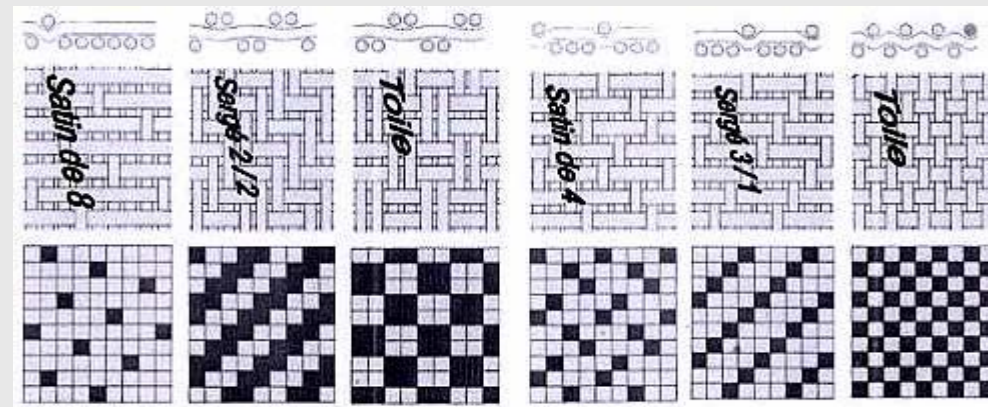
Constat

Beaucoup d'architectures possibles (2D, 3D...)

Majorité des renforts fabriqués pour être périodiques



- ➔ Répétition d'un motif : CER (cellule élémentaire représentative)
- ➔ Modéliser la CER de tous les types d'architectures



Modélisation des renforts : enjeux

But : pouvoir représenter toutes les CER

- A partir de données accessibles (data sheets fabricants, tomographie...)
- Etudes paramétriques
- Optimisation d'architectures
- Création de renforts « à la demande »

Existence de **variations** entre différentes cellules élémentaires d'un même renfort

- « Cellule Élémentaire **statistiquement Représentative** »
- Association de plusieurs CER **avec variabilité**

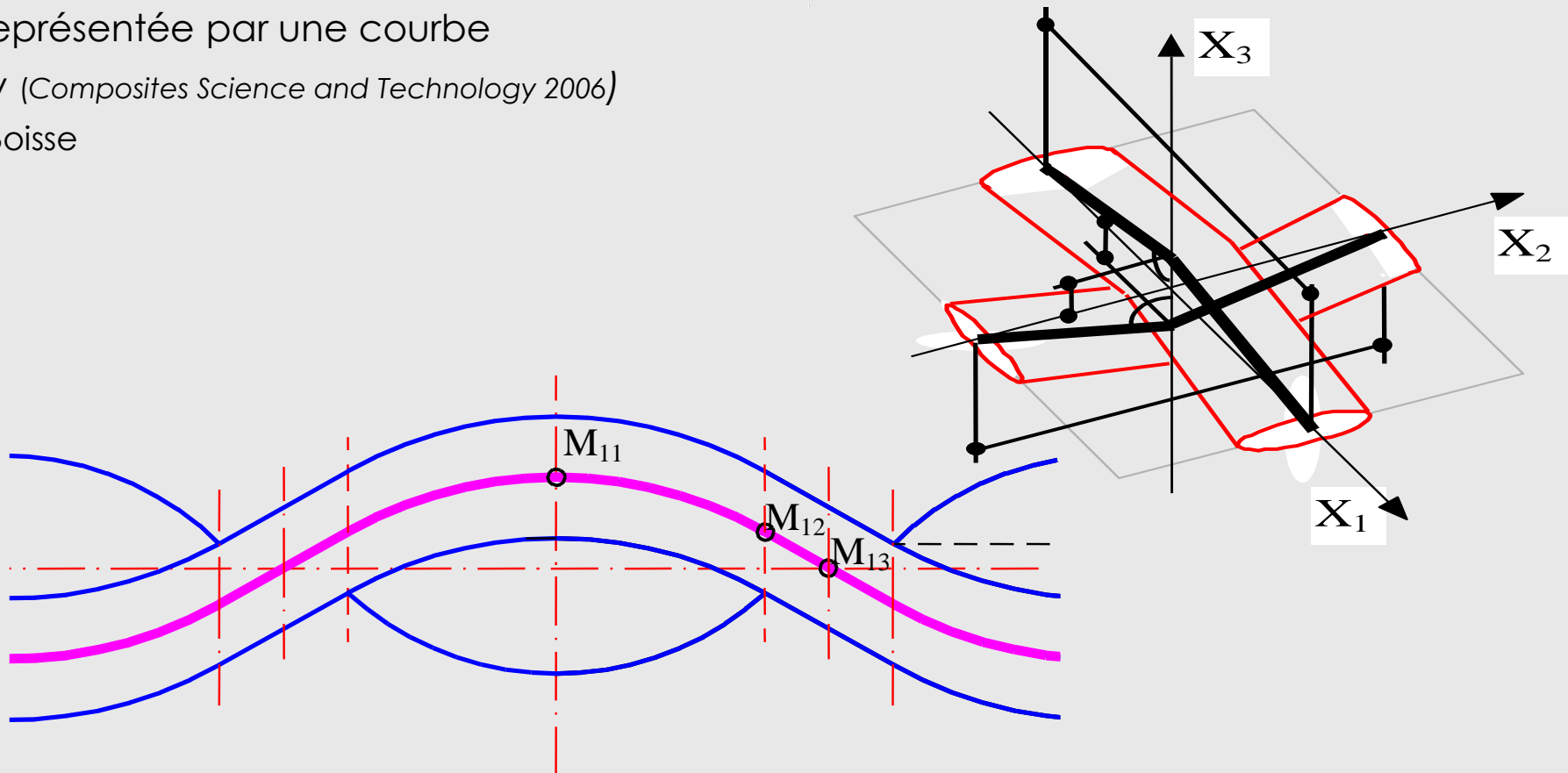


Une ou plusieurs CER modélisées

- Modifiables rapidement et facilement
- Maillables et utilisables pour les simulations

Analyse de l'existant

- **Modèles 1D « filaire »** : cohérent du fait de la prépondérance de la rigidité en traction
 - Mèche représentée par une suite de segments
 - Travaux originaux : Kawabatta (*J of Textile Institute* 1973)
 - Ganghoffer : barres + ressorts pour gérer les rigidités transverses
 - Mèche représentée par une courbe
 - Lomov (*Composites Science and Technology* 2006)
 - Hivet, Boisse



Analyse de l'existant

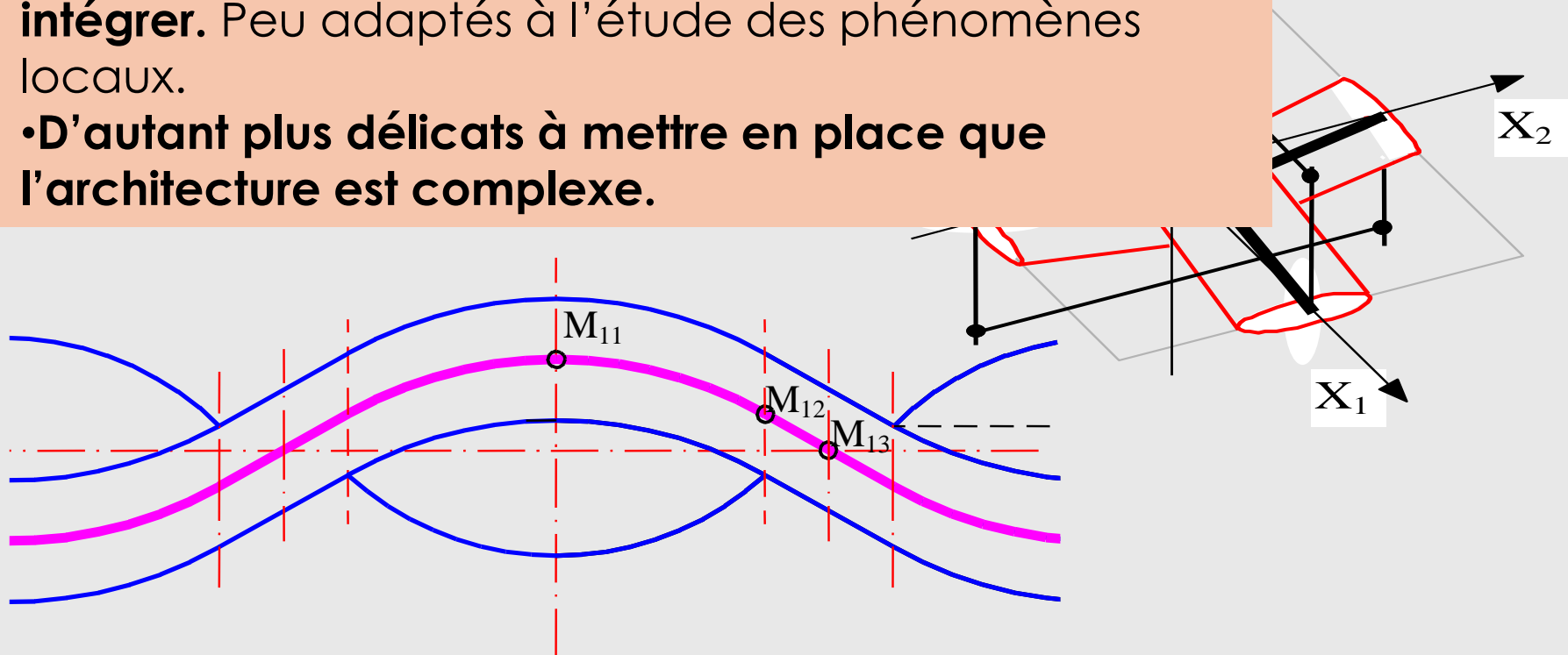
- **Modèles 1D « filaire »** : cohérent du fait de la prépondérance de la rigidité en traction

- Mèche représentée par une suite de segments
 - Travaux originaux : Kawabatta (*J of Textile Institute* 1973)
 - G
- Mèche
 - Lc
 - Hi

• **Très efficace numériquement**, avec une bonne identification des paramètres, résultats cohérents.

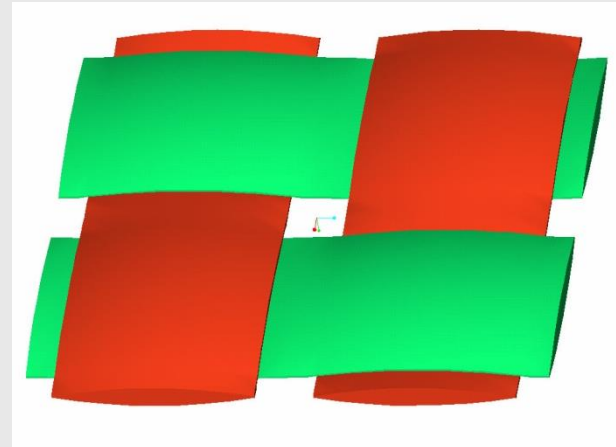
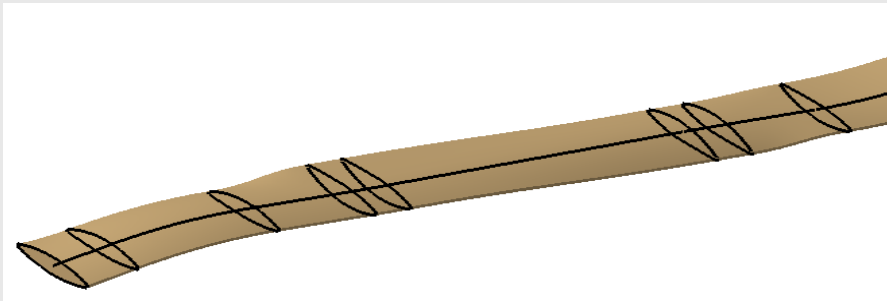
• Modèles simplifiés : **physique transverse difficile à intégrer**. Peu adaptés à l'étude des phénomènes locaux.

• **D'autant plus délicats à mettre en place que l'architecture est complexe.**



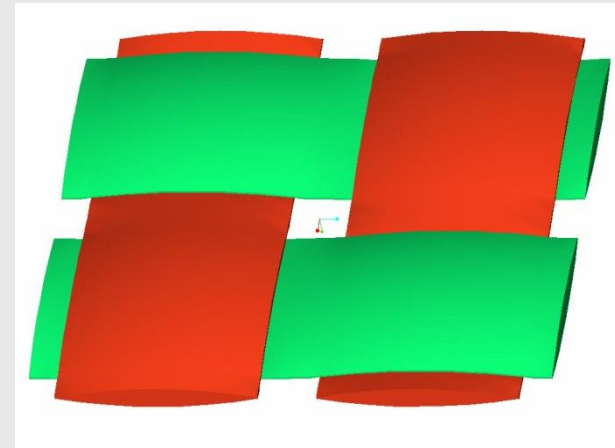
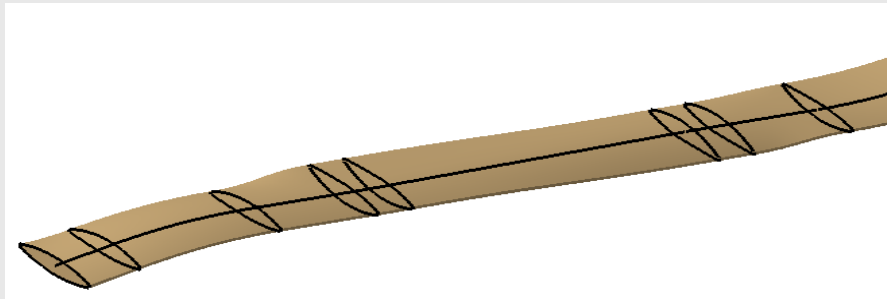
Analyse de l'existant

- **Modèles 3D** : La mèche est représentée par un solide homogène de type « tuyau ».
 - Représentation la plus fine à l'échelle mésoscopique
 - Prise en compte de la forme de la mèche et de son évolution transverse
 - Couplée avec des éléments finis 3D ou des voxels permet d'obtenir des résultats globaux et locaux
 - Mécanique de la cellule élémentaire composite ou renfort
 - Injection, perméabilité



Analyse de l'existant

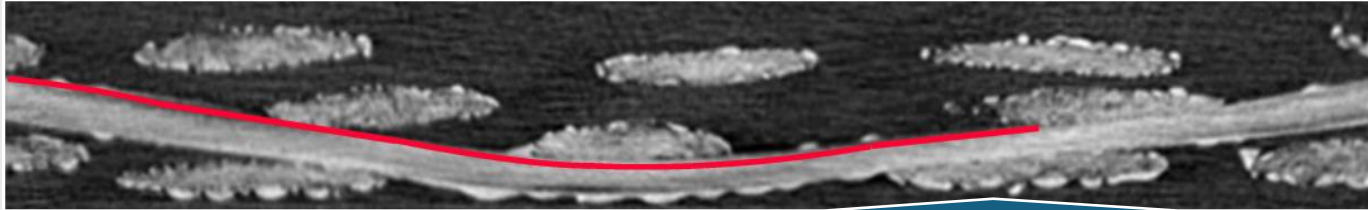
- **Modèles 3D** : La mèche est représentée par un solide homogène de type « tuyau ».
 - Représentation la plus fine à l'échelle méso
 - Prise en compte de la forme de la mèche et de son évolution transverse.
 - Couplée avec des éléments finis 3D ou des voxels permet d'obtenir des résultats globaux et locaux
 - Mécanique de la cellule élémentaire composite ou renfort
 - Injection, perméabilité
- Nécessitent de modéliser :
 - la forme de la section
 - la trajectoire des tuyaux



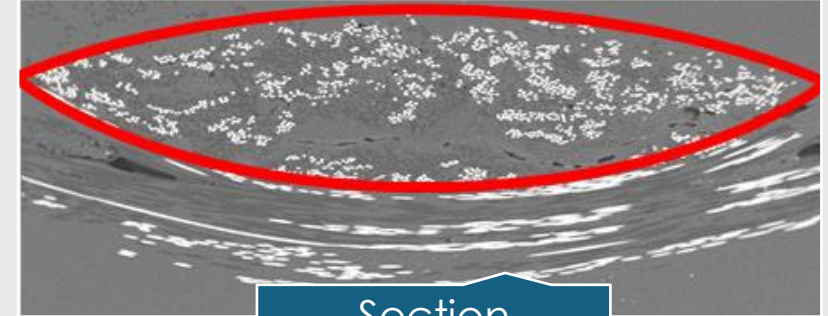
Analyse de l'existant

- **Modèles 3D** : La mèche est représentée par un solide homogène de type « tuyau ».
 - Représentation la plus fine à l'échelle méso
 - Prise en compte de la forme de la mèche et de son évolution transverse.
 - Couplée avec des éléments finis 3D ou des voxels permet d'obtenir des résultats globaux et locaux
 - Mécanique de la cellule élémentaire composite ou renfort
 - Injection, perméabilité
 - Nécessitent de modéliser :
 - la forme de la section
 - la trajectoire des tuyaux
 - Solution
 - Modéliser la mèche a posteriori dans son environnement tissé
 - ➔ Observer, analyser, identifier la géométrie de la mèche après tissage

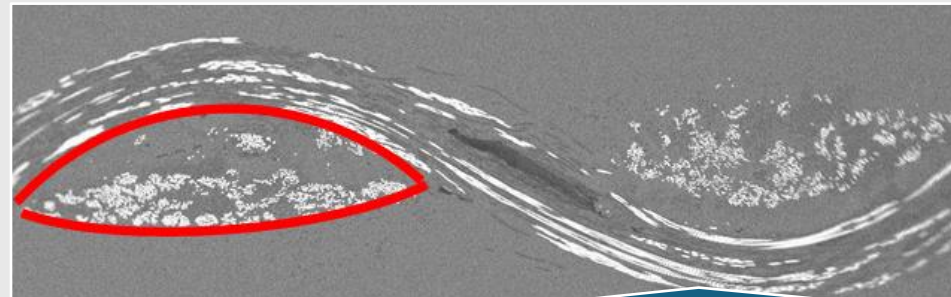
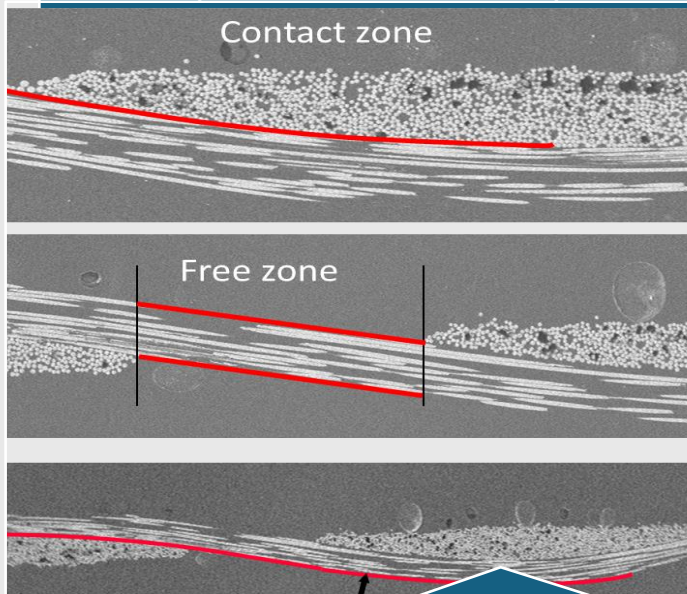
Caractéristiques du modèle géométrique



La trajectoire peut être décomposée en une **série de courbes** (zone de contact) et de **droites** (zone libre) **tangentes**

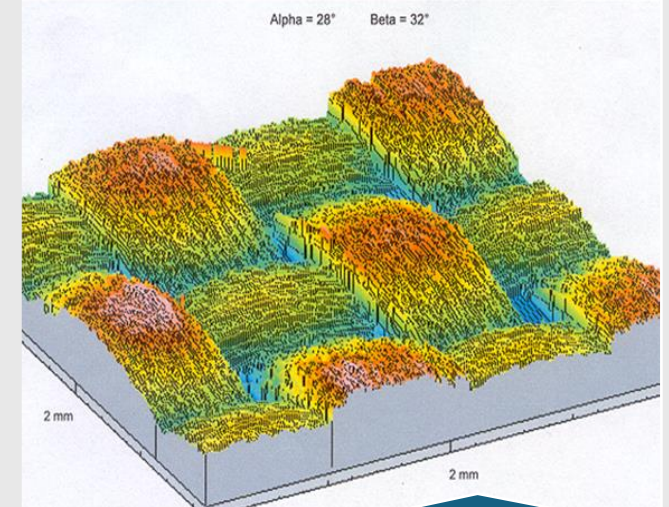


Section **lenticulaire**



Forme de la section variable : entre lenticulaire, elliptique, aplatie sur le bords...

Altitude différente



les plans tangents aux deux directions des mèches ne sont pas au même niveau

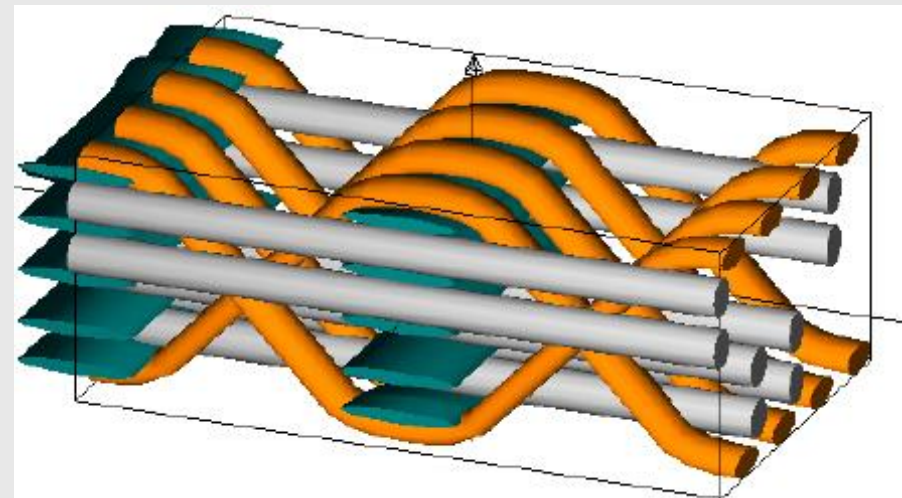
Contact surfacique au niveau des croisements

Section **dissymétrique** : zone de contact, différente de la zone libre

Observations de mèches

Softs et approches existants

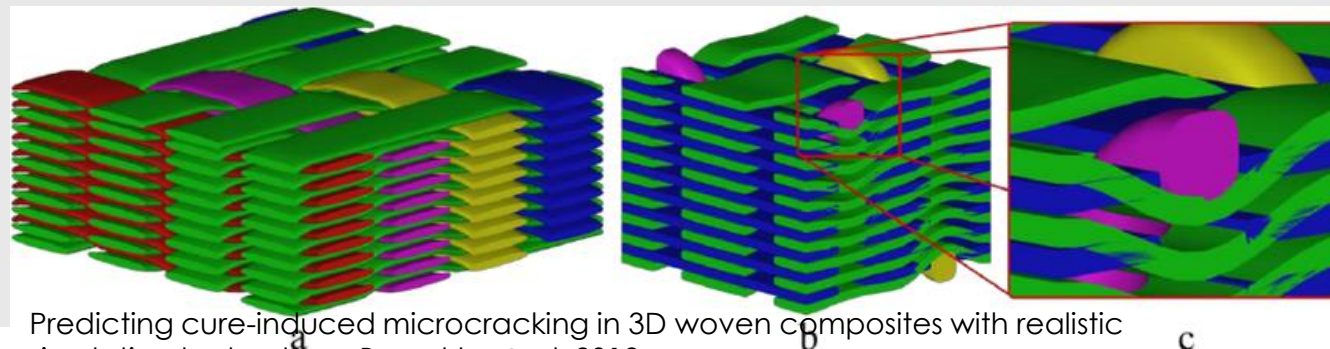
- Wise Tex :
 - Développé à l'université KUL (Lomov et al)
 - (Wisetex, on line, <http://www.mtm.kuleuven.be/onderzoek/composites/software/wisetex>.)
 - Permet de représenter tout type de renfort : tissés (2D, 3D), tressés, NCF,....
 - Logiciel extrêmement complet qui propose beaucoup d'applications et de calculs associés aux renforts tissés
 - Au niveau modèle géométrique :
 - Extrêmement répandu dans l'industrie
 - Famille de produits :
 - Tuyaux à section constante avec trajectoire courbe (polynôme ordre 5).
 - Outil spécifique dédié textile



Meso-Fe models of tight 3D woven structures, Ivanov & al, 2012

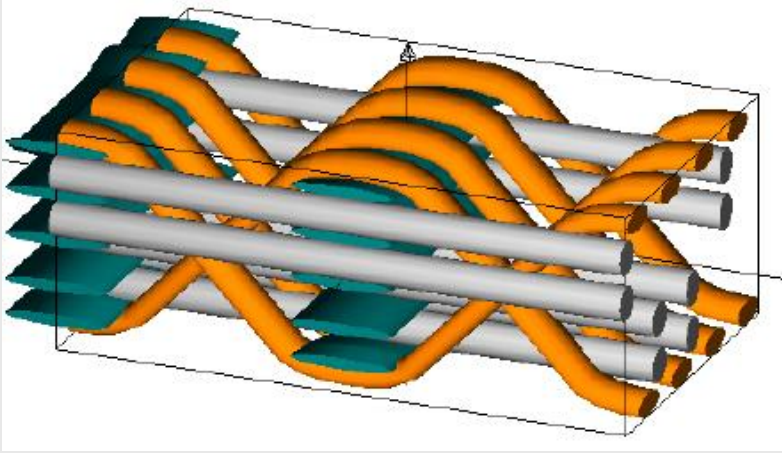
Softs et approches existants

- Tex Gen :
 - Développé à l'université de Nottingham (Robitaille et al...)
 - M. Sherburn. Texgen open source project, online, http://texgen.sourceforge.net/index.php/main_page.
 - Permet de représenter tout type de renfort : tissés (2D, 3D), tressés, NCF,....
 - Logiciel open source assez répandu notamment dans la communauté universitaire (Nottingham, ENSAIT,...).
 - Famille de produits :
 - Tuyaux à section variable avec trajectoire courbe : splines cubiques passant par des points de contrôle..
 - Formes de sections complexes et diverses accessibles (disymétriques dans les deux plans, lenticulaires, plates, elliptiques,....)
 - Outil spécifique dédié textile

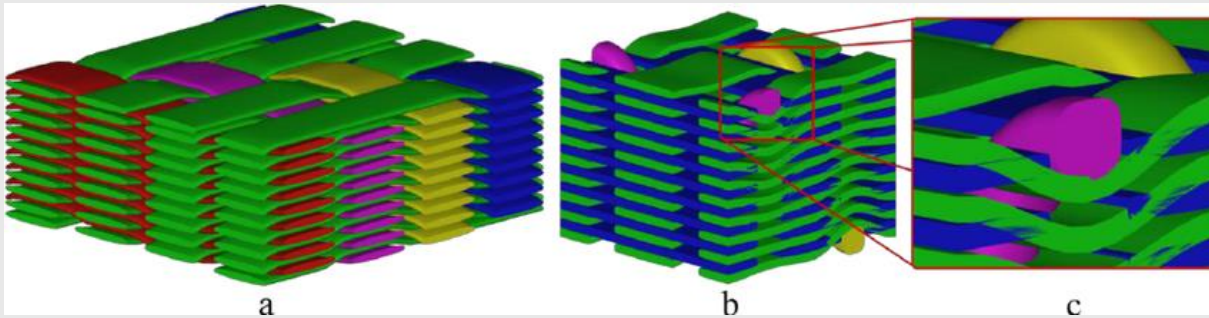


Predicting cure-induced microcracking in 3D woven composites with realistic simulation technology, Bayraktar & al, 2012

Softs et approches existantes



Meso-FE models of tight 3D woven structures, Ivanov & al, 2012



Predicting cure-induced microcracking in 3D woven composites with realistic simulation technology, Bayraktar & al, 2012

- En général, pas de gestion des entrelacements :
 - Contact surfacique entre les mèches n'est pas géré
 - Conséquences sur le modèle géométrique :
 - Interpénétrations entre les mèches au niveau du contact
 - Espaces vides entre les mèches en lieu et place du contact.
- ➔ Peut perturber les calculs
- ➔ Faire de la **cohérence** au niveau de l'entrelacement une **propriété naturelle** du modèle géométrique en imposant un contact surfacique parfait entre les mèches au niveau du contact.
- ➔ **Modèle géométriquement cohérent**
- ➔ Utilisation des outils de la CAO 3D (Catia V5)

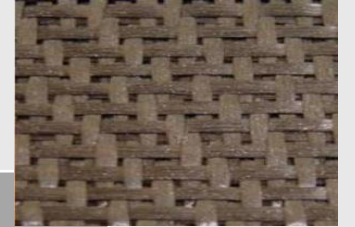
Respect de la cohérence



Renforts 2D

Contacts = ceux définis par
l'architecture (contact de
tissage)

Interlocks



Plus spécifique et complexe

Il existe une infinité de tissages
possibles

Renforts souvent denses

Contacts entre mèches plus
difficiles à identifier a priori

Pour tous les renforts (2D, interlock, 3D), ce sont les
contacts de tissage qui définissent l'architecture

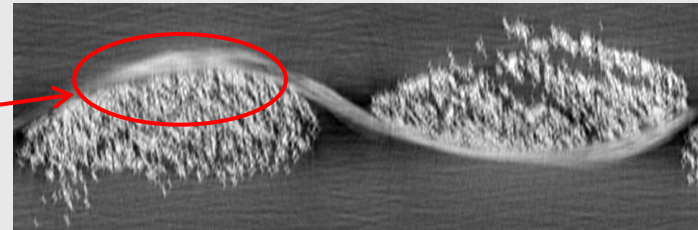
Respect de la cohérence

Contacts de tissage

- Liés au processus d'entrelacement des mèches
- Ne dépendent que de l'armure du renfort → bien localisés
- Les seuls existant dans les mailles à faible densité de mèches



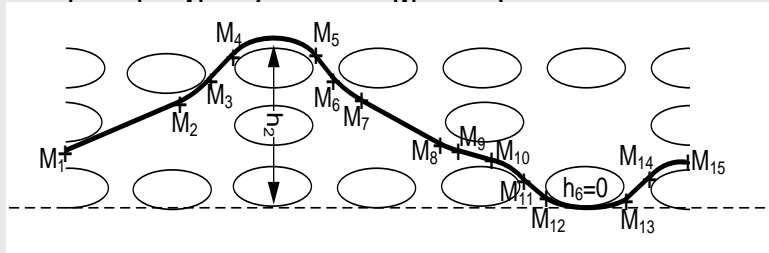
Contacts de
tissage



Définition d'un modèle cohérent

Modèle géométrique

- Géométrie paramétrée composée de la succession de paraboles (zones de contact) et de segments



- n : nombre de zones de contact de la mèche i du réseau α
- Système d'équations

- ✓ Conditions de périodicité et de tangence
- ✓ Hauteur d'ondulations (définie par l'utilisateur)
- ✓ Abscisses des zones de contact (définies par l'utilisateur)



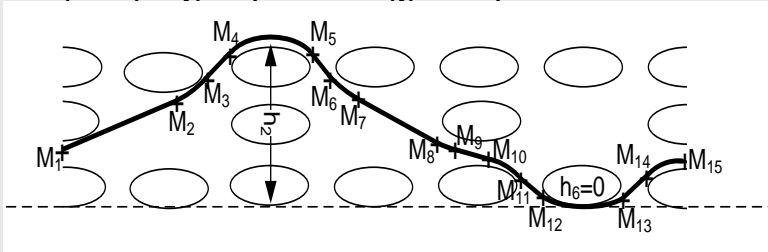
$5n_{cai} + 4$ paramètres

$2n_{cai} + 2$ équations non linéaires résolues avec Scilab

Définition d'un modèle cohérent

Modèle géométrique

- Géométrie paramétrée composée de la succession de paraboles (zones de contact) et de segments



- n : nombre de zones de contact de la mèche i du réseau α
- Système d'équations

- ✓ Conditions de périodicité et de tangence
- ✓ Hauteur d'ondulations (définie par l'utilisateur)
- ✓ Abscisses des zones de contact (définies par l'utilisateur)

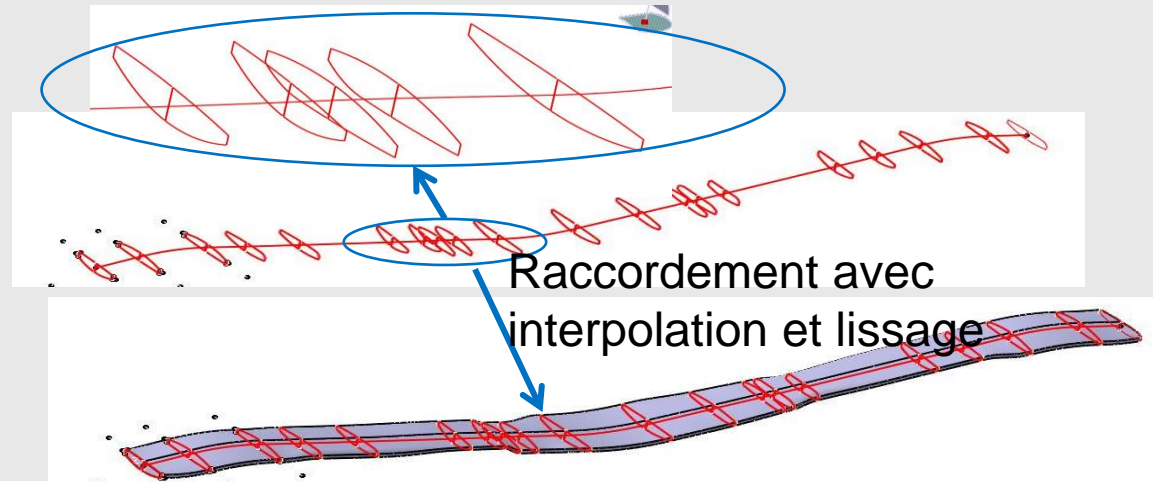


$5n_{cai} + 4$ paramètres

$2n_{cai} + 2$ équations non linéaires résolues avec Scilab

Géométrie des mèches

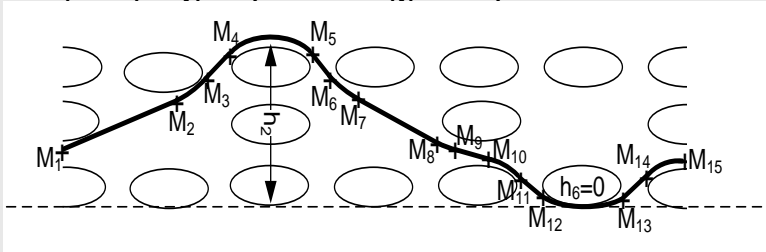
- Variation de la forme des sections le long de la trajectoire
- Tuyau avec raccordement à sections variables le long de la trajectoire calculée → définition du volume de la mèche



Définition d'un modèle cohérent

Modèle géométrique

- Géométrie paramétrée composée de la succession de paraboles (zones de contact) et de segments



- n : nombre de zones de contact de la mèche i du réseau α
- Système d'équations

- ✓ Conditions de périodicité et de tangence
- ✓ Hauteur d'ondulations (définie par l'utilisateur)
- ✓ Abscisses des zones de contact (définies par l'utilisateur)



$5n_{cai} + 4$ paramètres

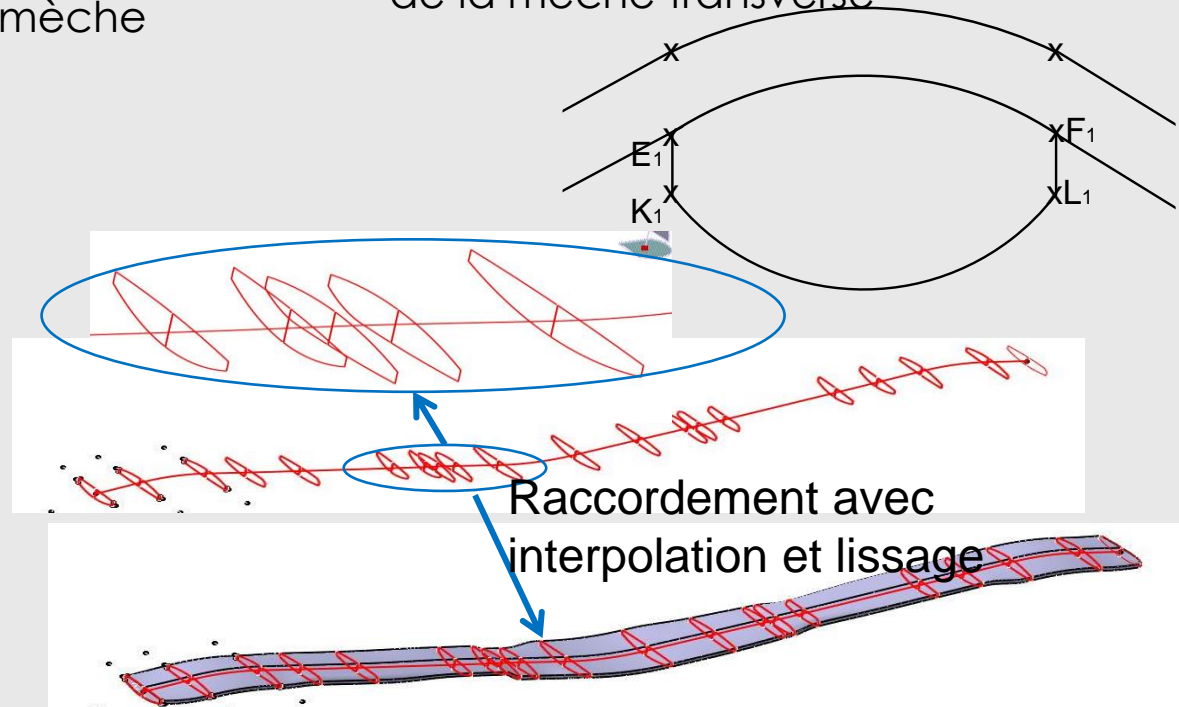
$2n_{cai} + 2$ équations non linéaires résolues avec Scilab

Géométrie des mèches

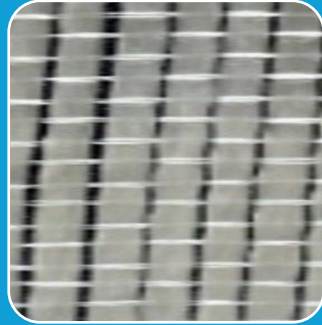
- Variation de la forme des sections le long de la trajectoire
- Tuyau avec raccordement à sections variables le long de la trajectoire calculée → définition du volume de la mèche

Sections

- Surfaces identiques des mèches en contact au niveau de la zone de contact → tangence stricte → respect de la cohérence
- **2D** : 2 segments et 2 paraboles dont la même que celle de la trajectoire de la mèche transverse



Application aux renforts



Taffetas

- Quasi-UD de verre
- Fraction volumique de fibres : 44%
- **Mèches de tailles très différentes**
- **Architecture apparentée à un taffetas avec double trame**
- **Forte variabilité des motifs et mesures**



G1151

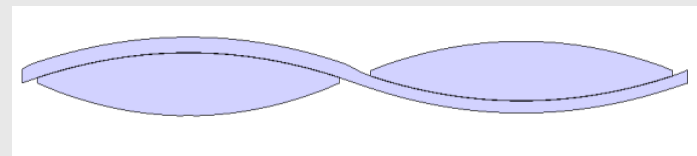
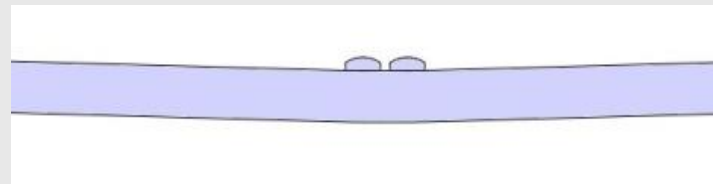
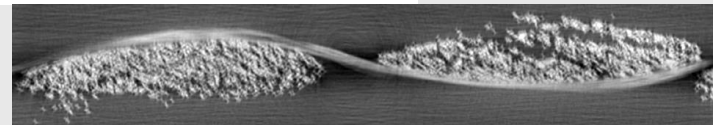
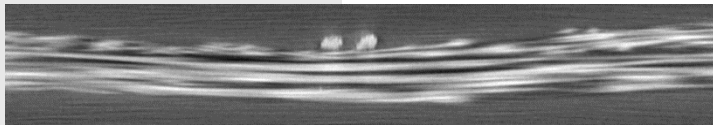
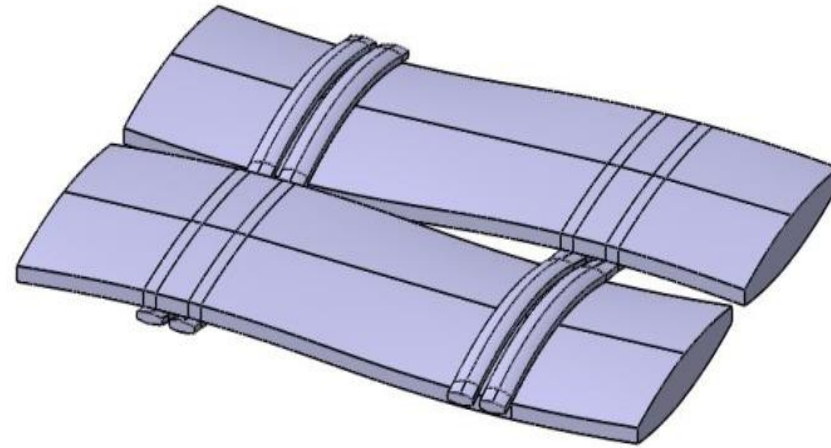
- Renfort de type interlock : 3 couches de trame liées par des mèches de chaîne
- Fraction volumique de fibres : 51%
- **Architecture complexe**
- **Forte densité de mèches de trame**
- **Intéressant pour la modélisation**

Application aux renforts



Taffetas

- Obtention d'un modèle cohérent en seulement quelques minutes

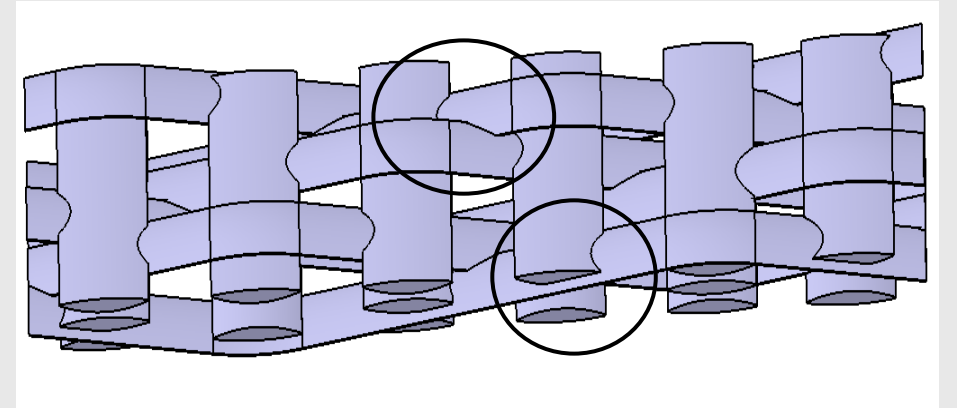
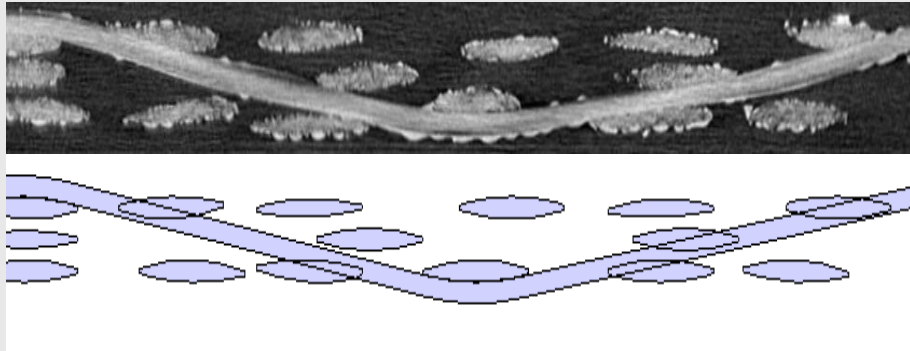


Application aux renforts

G1151



- Interférences → contacts spécifiques aux interlocks et 2D très denses qui ne sont pas des contacts de fissage
- But : modéliser ces contacts et leurs conséquences sur l'architecture



Respect de la cohérence

Contacts intermédiaires

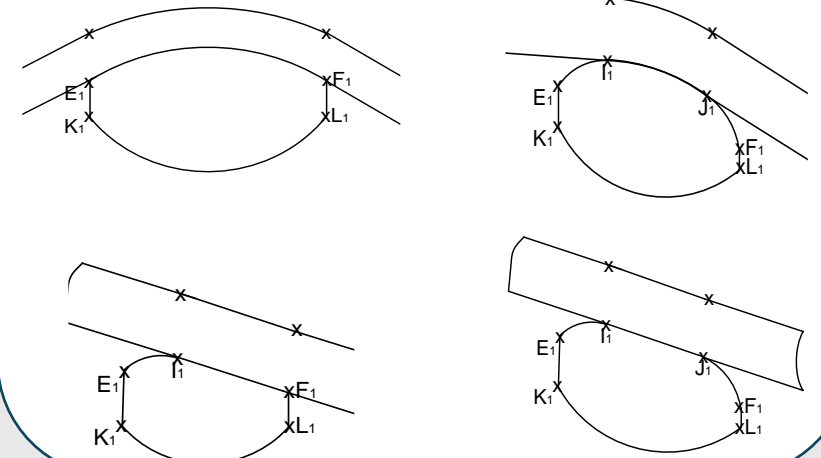
- Spécificité des interlocks
- Organisation et espacement des mèches de trame ne permettent pas à la mèche de chaîne de traverser la cellule sans contacts

➔ Introduction de sections plus complexes

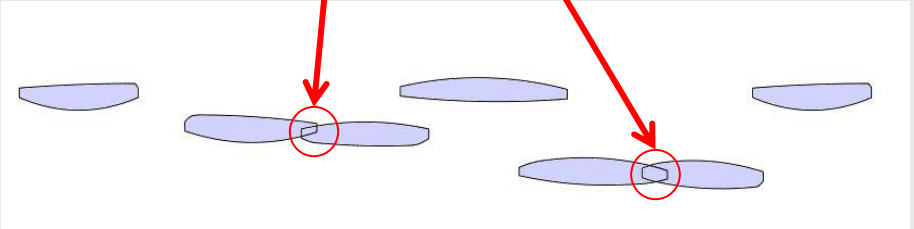
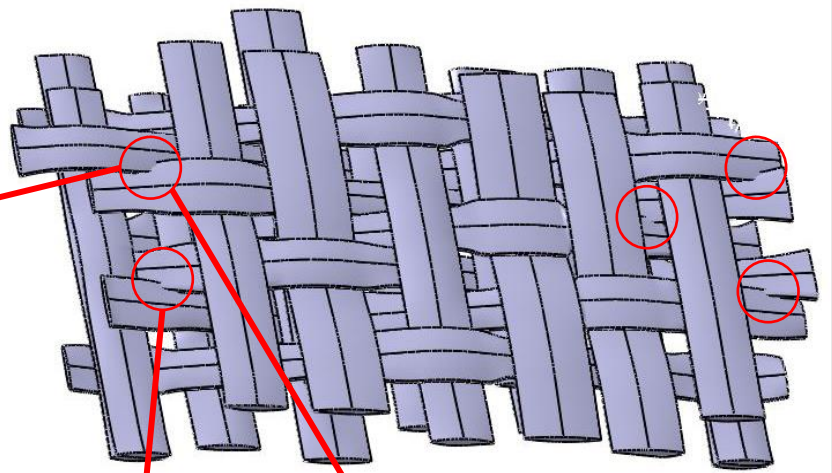
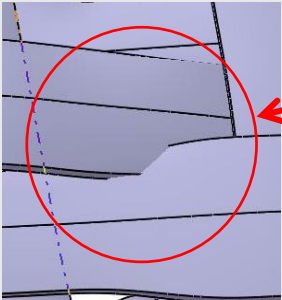
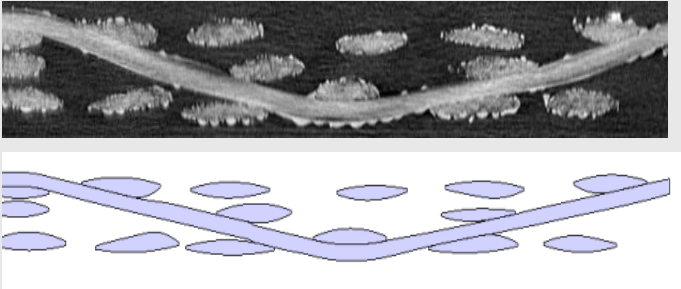
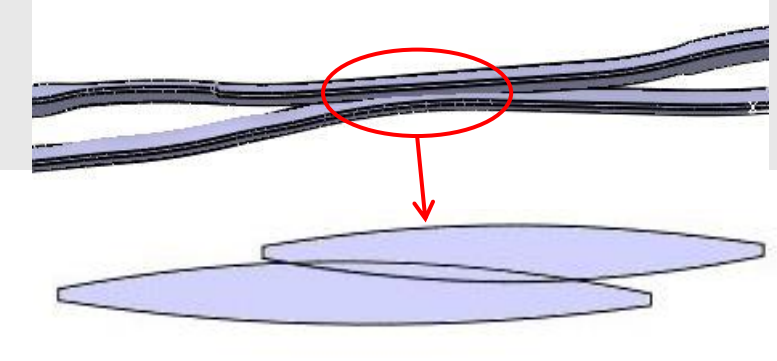


Contacts
intermédiaires

Sections plus complexes : 2 à 4
coniques (1 à 3 de type différent pour
la zone de contact) et 2 segments de
droite



Second modèle de G1151



Respect de la cohérence

Contacts latéraux

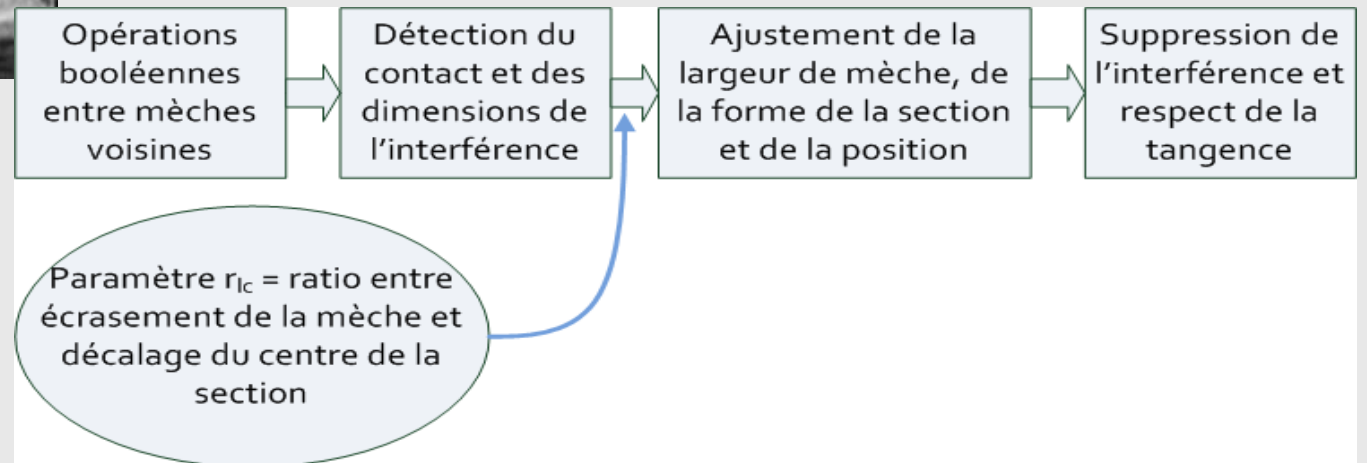
- Entre mèches d'un même réseau
- Renforts à forte densité de fibres

➔ Modification de la section

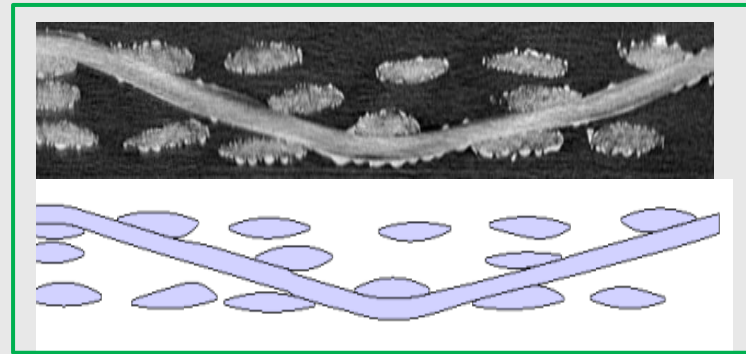
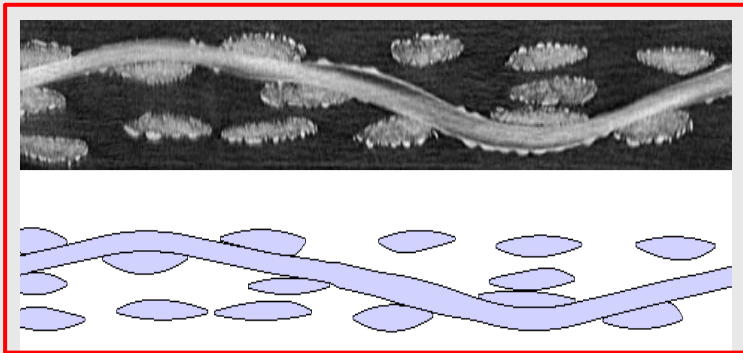
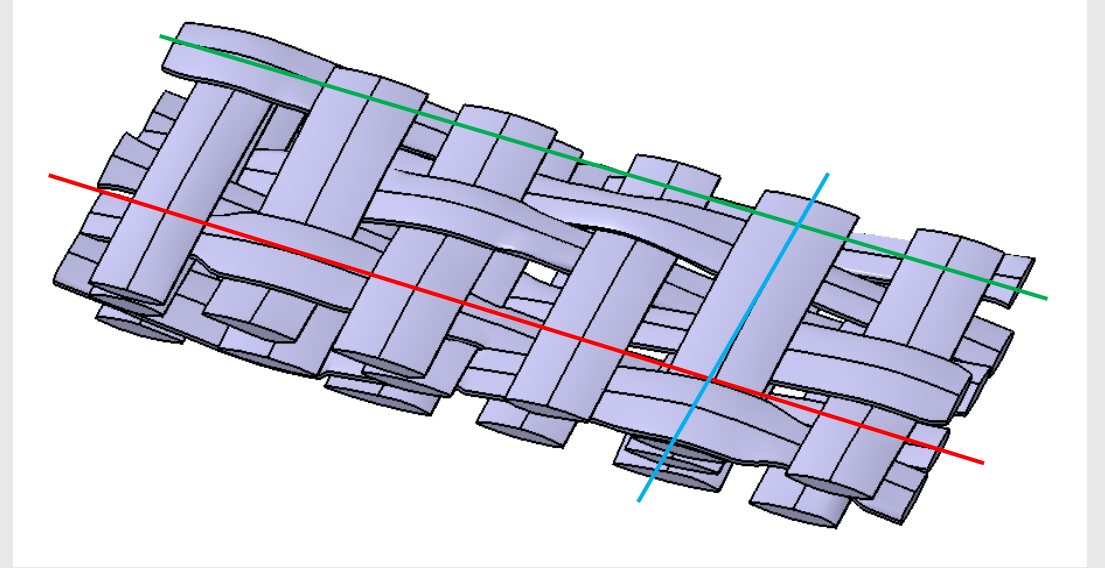
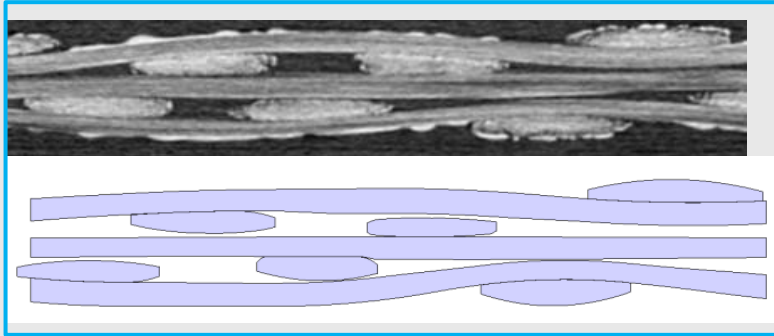
+ Déplacement local de la mèche



Contacts latéraux



Modèle final de G1151



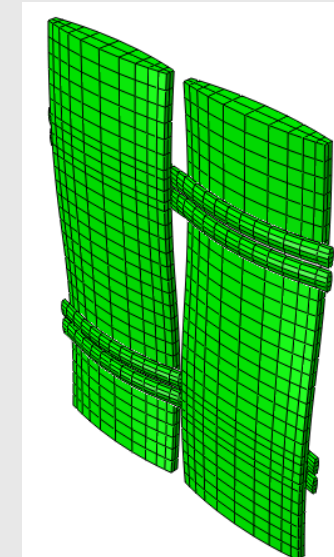
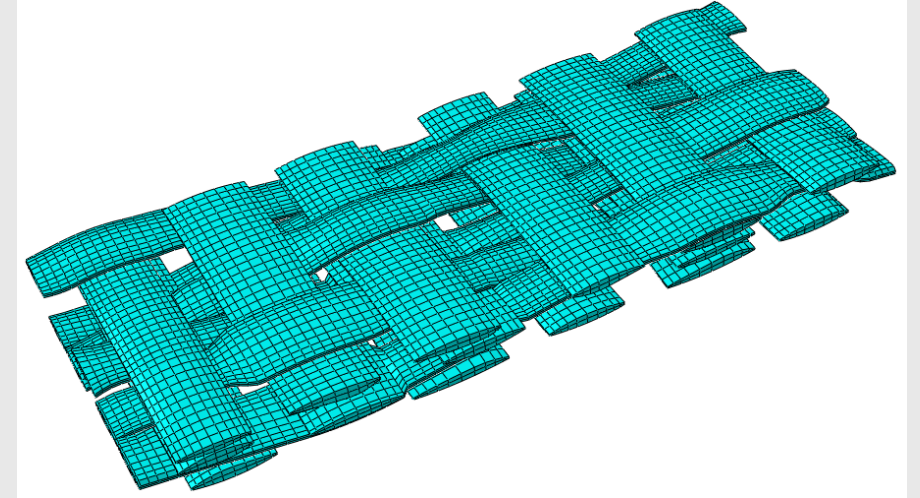
Modèles géométriques maillés

Création de tous types de cellules élémentaires de renforts 2D et interlock

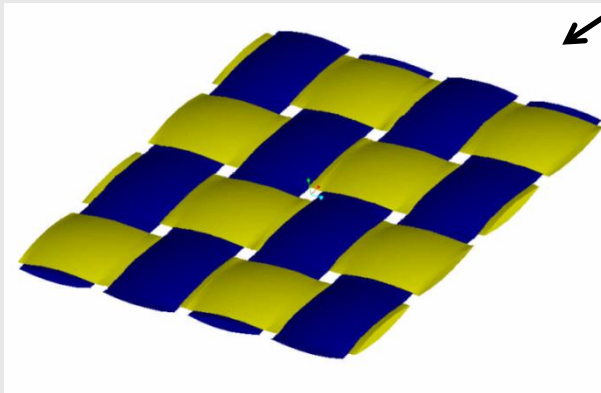
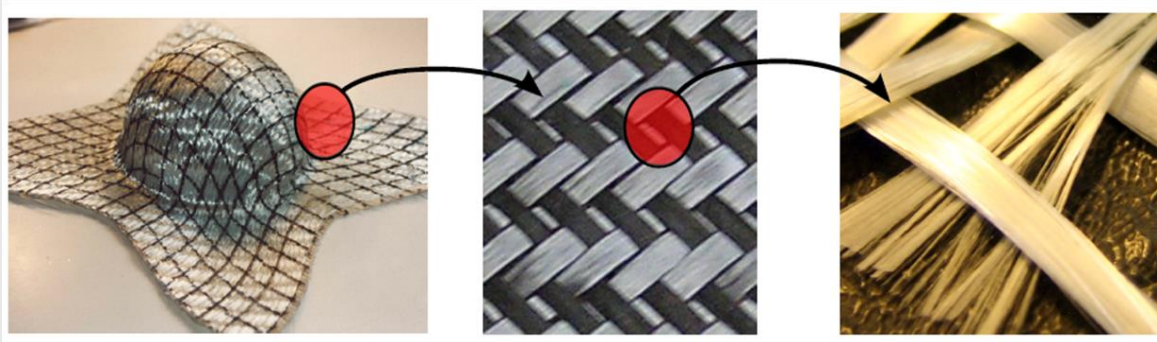
- Avec gestion des interférences
- A partir de données simples définies par l'utilisateur : data sheets fabricants, tomographie...
- Complètement automatisée
- Seulement quelques minutes (2D) → quelques heures (renforts complexes) sans intervention de l'utilisateur après mise en données
- Directement exploitables pour les simulations

GeoFab

- Pack de routines Scilab et VBA
- Permet la modélisation de tout type de CER de renforts à 2 réseaux

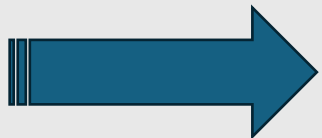


Echelle de simulation : approches mésoscopiques



Modèle méso : entrelacement de mèches supposées homogènes

- ✓ Permet d'obtenir des résultats globaux et locaux : déformation des mèches, variation de forme des sections, renfort à l'état déformé
- ✓ Bon compromis entre réalité et complexité



Géométrie

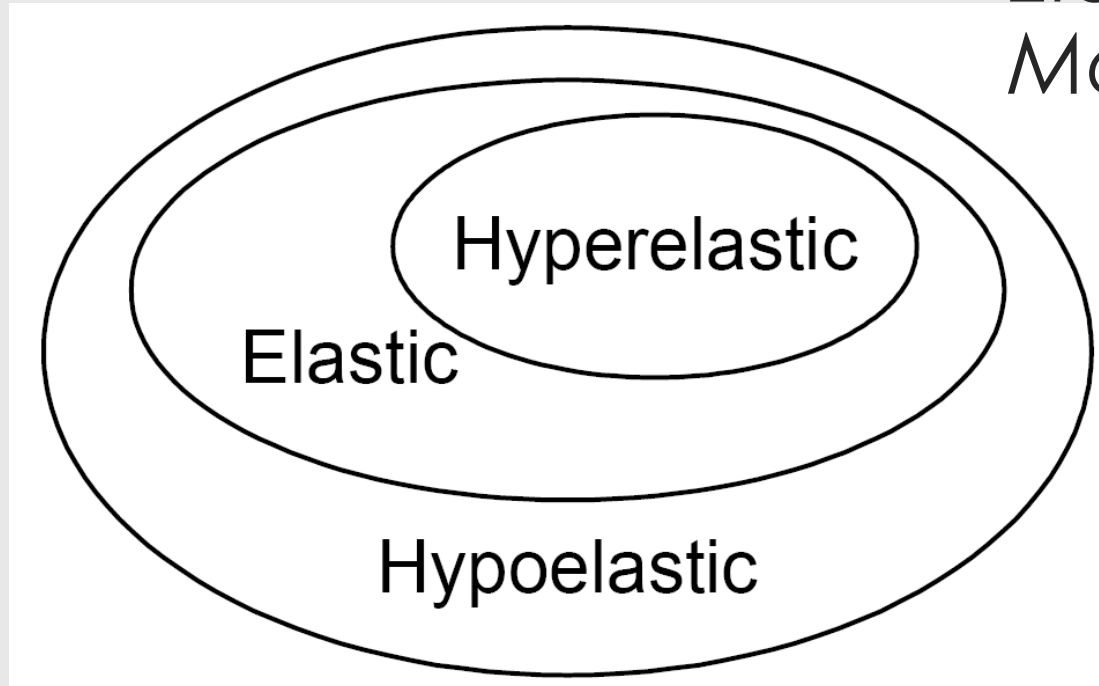


Loi de
comportement

Lois de comportement

Approches continues

Elastic Continua-Based Macro-scale Models



Harrison P, ESAFORM 2010, University of Brescia
Brescia - Italy - April 7-9, 2010

Elasticité

Fung : Les contraintes sont uniquement fonction des déformations, sans dissipation d'énergie et les déformations sont réversibles.

La forme incrémentale d'un matériau élastique peut être écrite de la façon suivante

$$\sigma_{ij} = f_{ij}(\varepsilon_{ij})$$

La dérivée est une dérivée objective : $\dot{\sigma}_{ij} = \frac{\partial f_{ij}(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{kl}} \dot{\varepsilon}_{kl}$

*Fung, Y.C., Foundations of solid mechanics.
1965, Prentice-Hall.*

Hypoélasticité

Un matériau est décrit comme hypoélastique si la loi de comportement est exprimée sous la forme incrémentale suivante :

$$\dot{\sigma}_{ij} = f_{ijkl}(\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}) \dot{\varepsilon}_{kl}$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{\partial f_{ij}(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{kl}} \dot{\varepsilon}_{kl} = f_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl}$$

Ainsi un matériau élastique est hypoélastique, par contre,

L'inverse n'est vrai que si les fonctions f_{ijkl} sont des fonctions des déformations.

*Fung, Y.C., Foundations of solid mechanics.
1965, Prentice-Hall.*

Hyperélasticité

Si les contraintes dérivent d'un potentiel scalaire : l'énergie de déformation, conformément au second principe, le matériau est dit hyperélastique.

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial f(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}}$$

Tout matériau hyperélastique est élastique:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial f(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}} = f_{ij}(\varepsilon_{ij})$$

Pour qu'un matériau soit hyperélastique, les contraintes doivent dériver d'un potentiel, les fonctions f doivent être des fonctions des déformations.

*Fung, Y.C., Foundations of solid mechanics.
1965, Prentice-Hall.*

Modèle hyperélastique [Aimène et al, JCM 2010]

$$W = \bar{W}_1(I_1) + \bar{W}_2(I_2) + \bar{W}_s(I_{12})$$

Warp
tension

Weft
tension

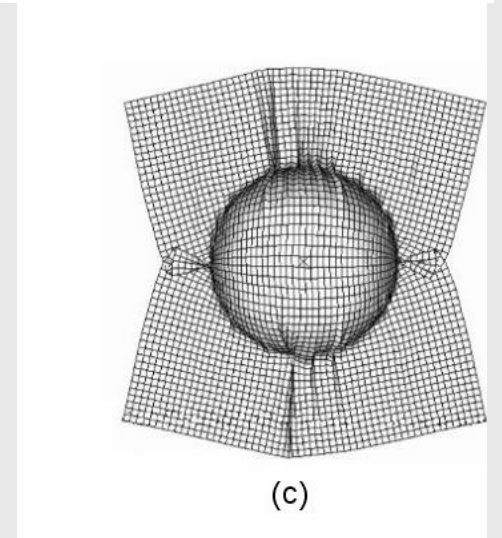
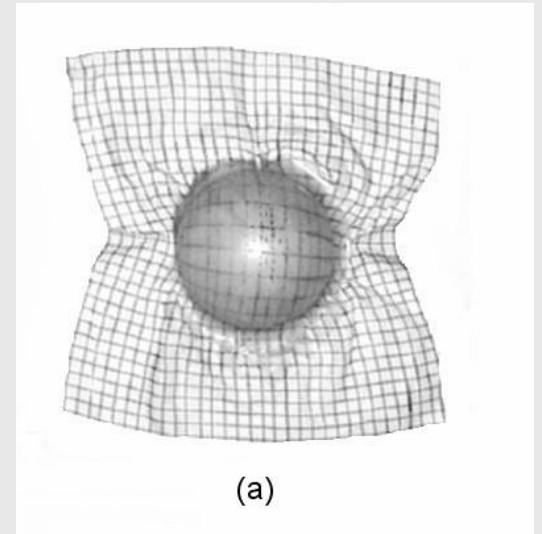
In plane shear

$$I_1 = \text{Tr}(\underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{L}}_{11}) = \lambda_1^2$$

$$I_{12} = \frac{1}{I_1 I_2} \text{Tr}(\underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{L}}_{11} \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{L}}_{22}) = \cos^2 \theta$$

$$W(\underline{\underline{C}}) = \sum_{i=0}^r \frac{1}{i+1} A_i (I_1^{i+1} - 1) + \sum_{j=0}^s \frac{1}{j+1} B_j (I_2^{j+1} - 1) + \sum_{k=1}^t \frac{1}{k} C_k I_{12}^k$$

$$\underline{\underline{S}} = 2 \frac{\partial W}{\partial \underline{\underline{C}}}$$



Simulation of the hemispherical forming of an unbalanced fabric

Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

Echelle mésoscopique

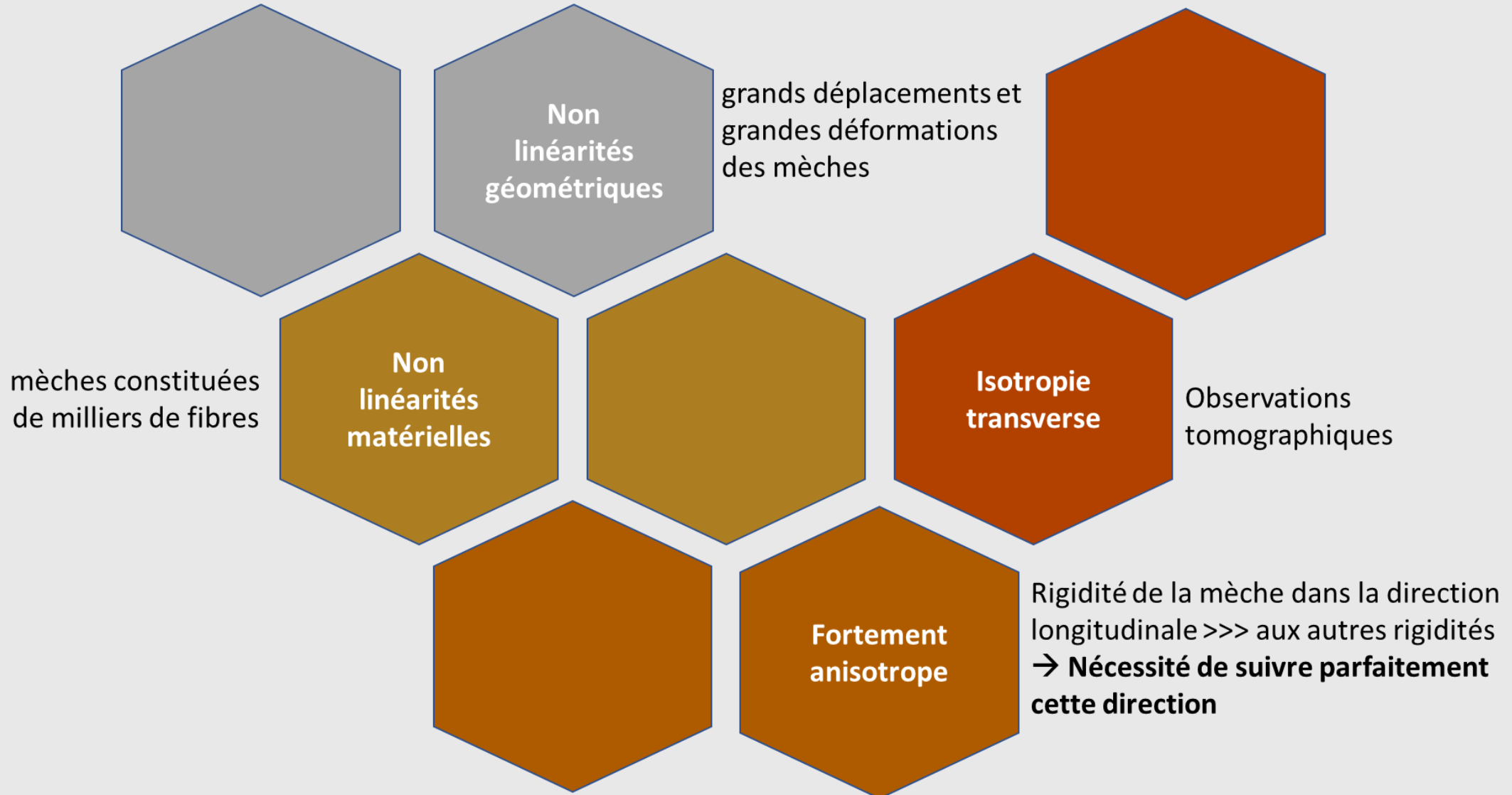
→ Définition d'un matériau homogène équivalent :

Hérite du **comportement des fibres seules**

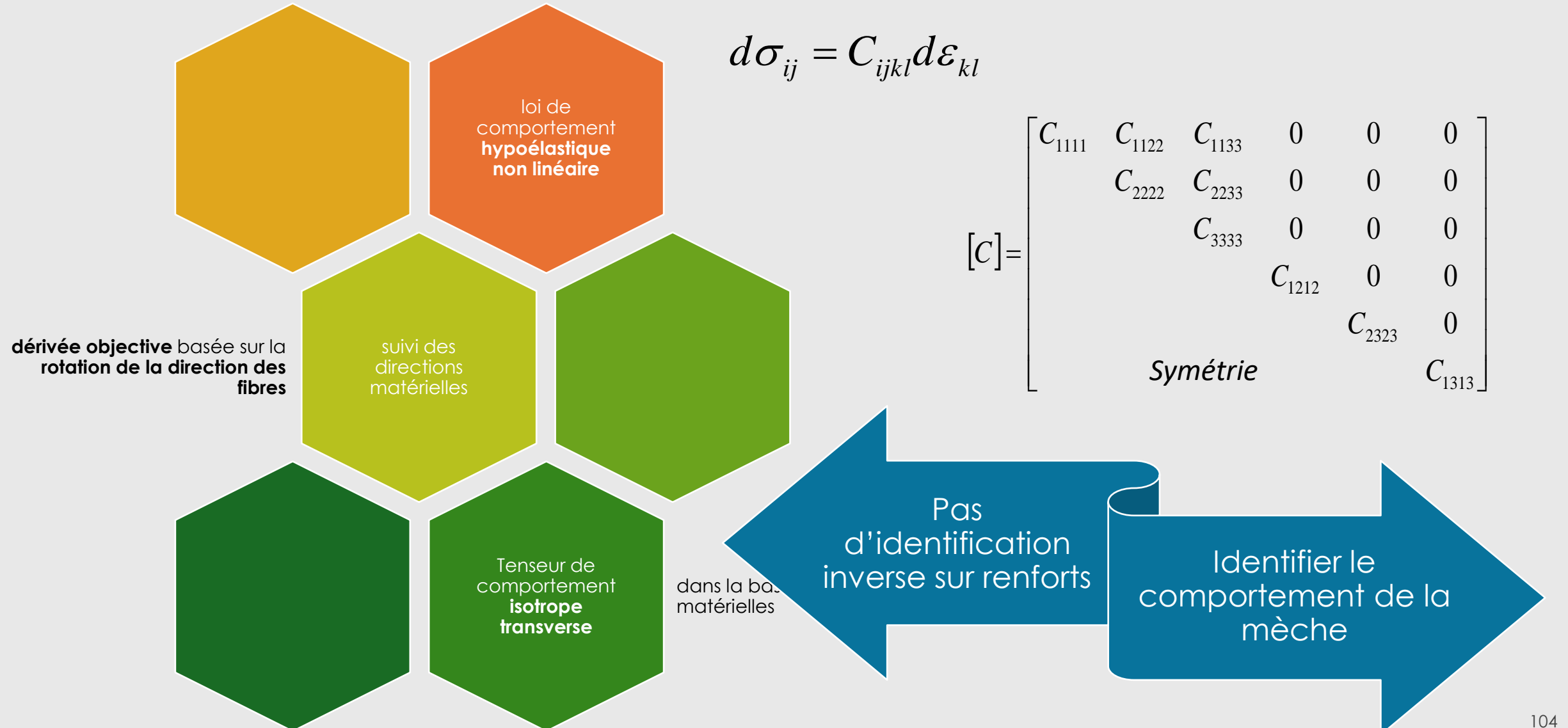
+ caractéristiques liées à l'**assemblage** de ces fibres sous forme de mèche



Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

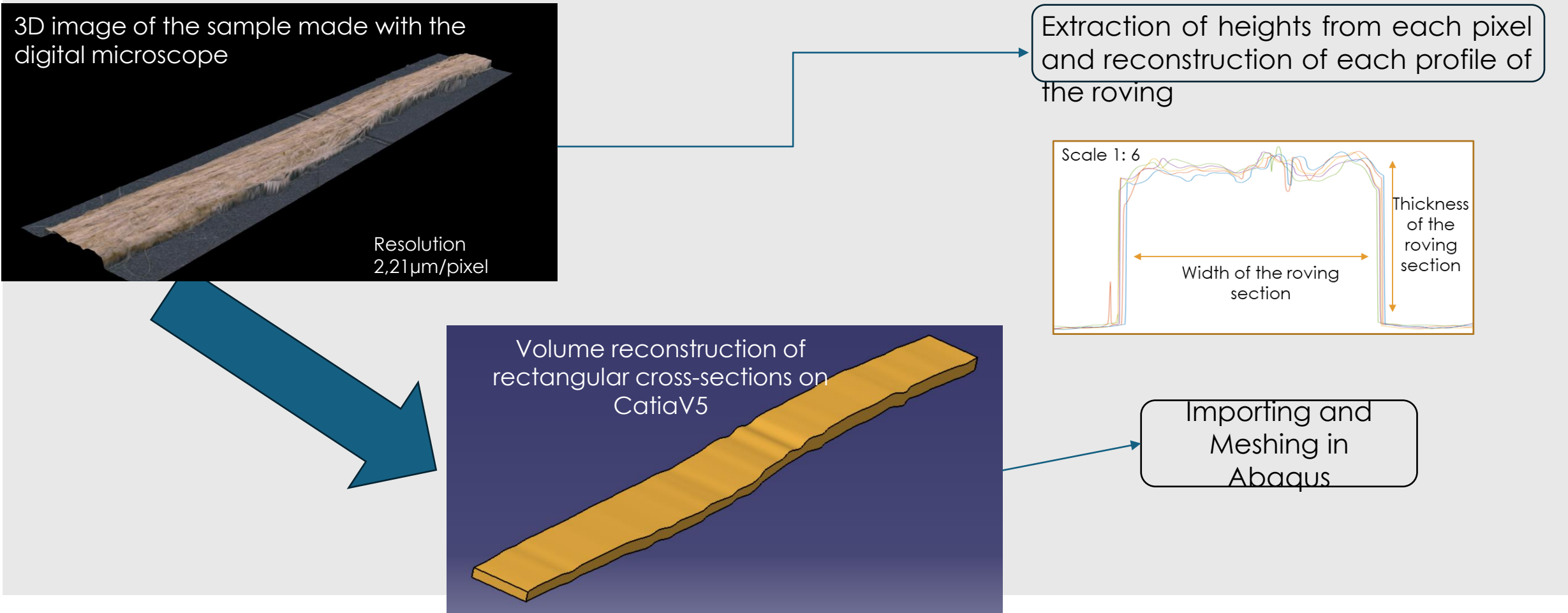


Modèle de comportement du matériau homogène équivalent



Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

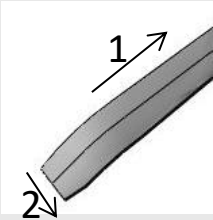
- Identifié sur la mèche → reconstruction et validation



Comportement des mèches de roving

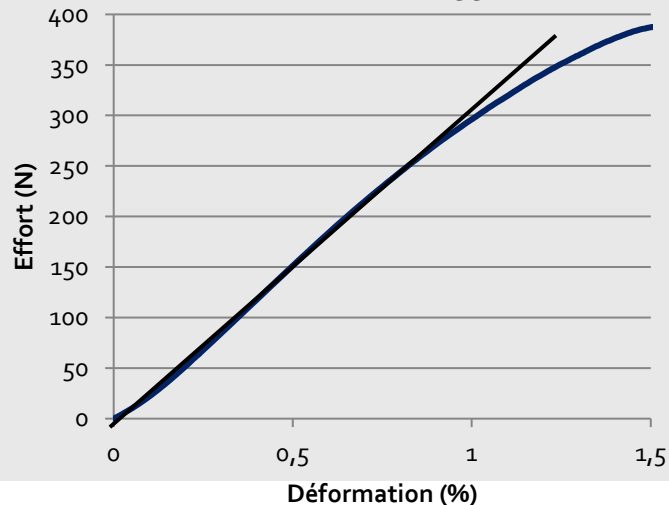
TRACTION

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)

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

Comportement des mèches de roving

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 aux fibres
 - ⇒ réorganisation des fibres
 - ⇒ réduction des espaces entre fibres



Influence sur la perméabilité du renfort



Caractérisation nécessaire

Comportement des mèches de roving

COMPRESSION/COMPACTION

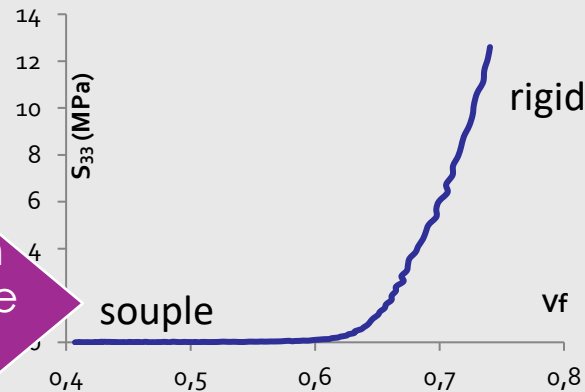
1. Gouvernée par la densité de fibres

réduction des vides entre fibres

augmentation de la fraction volumique

augmentation de la rigidité de compaction

2. Comportement non linéaire en plusieurs étapes

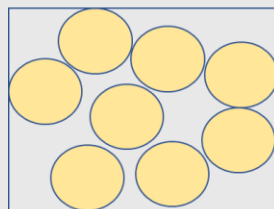
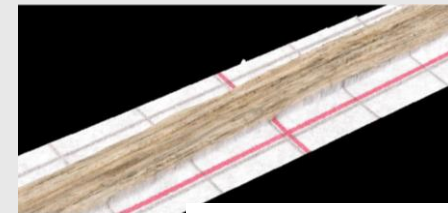


3. Pression de compaction uniaxiale = $f(v_f)$ (Toll 1998, Latil 2011)

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

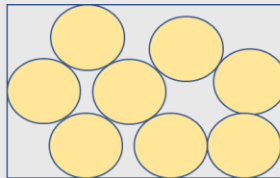
4. Section des mèches rectangulaire en sortie de bobine (Nauman 2011 + Larquemin 2021)

⇒ Hypothèse de répartition uniforme de



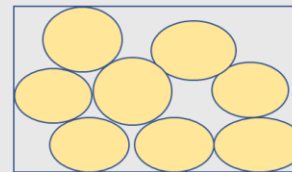
Etape 1
Etat initial

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



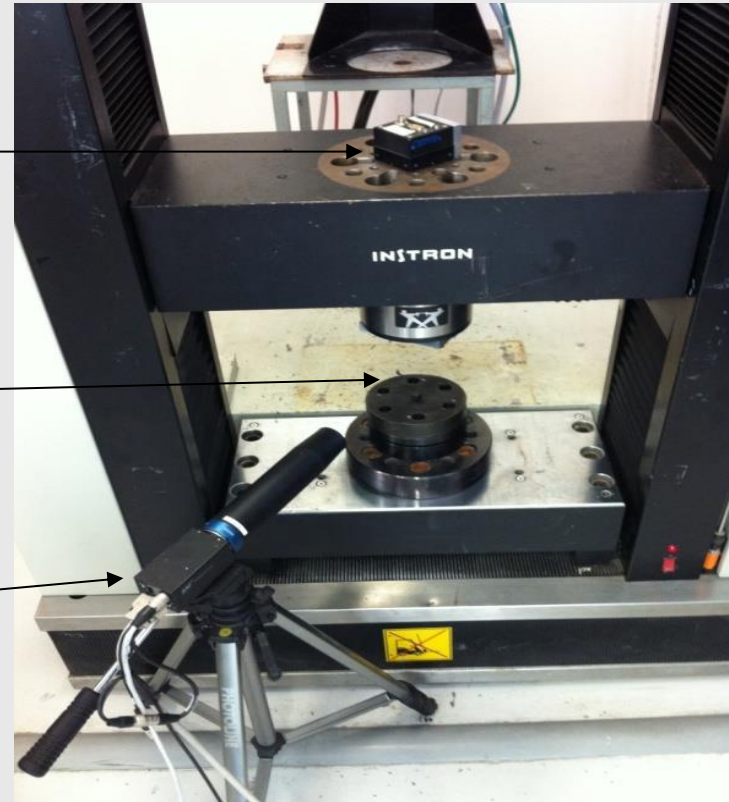
Comportement des mèches de roving

COMPRESSION/COMPACTION

Caméra en vue de
dessus

Emplacement de l'échantillon

Caméra en vue de côté



Comportement des mèches de roving

COMPRESSION/COMPACTION

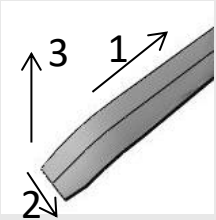
Identification des coefficients K_c et γ

Comparaison aux résultats de la littérature (Toll) :
exemple du taffetas

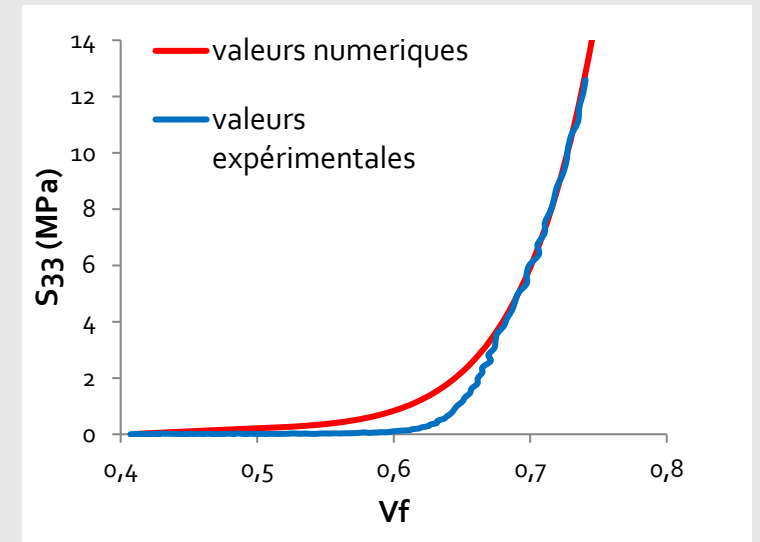
Expé $\rightarrow K_c=850, \gamma=14$

Toll $\rightarrow K_c=700, \gamma=15.5$

Direction 3



Possibilité d'utiliser les valeurs de la littérature



Comportement des mèches de roving

COMPRESSION/COMPACTION

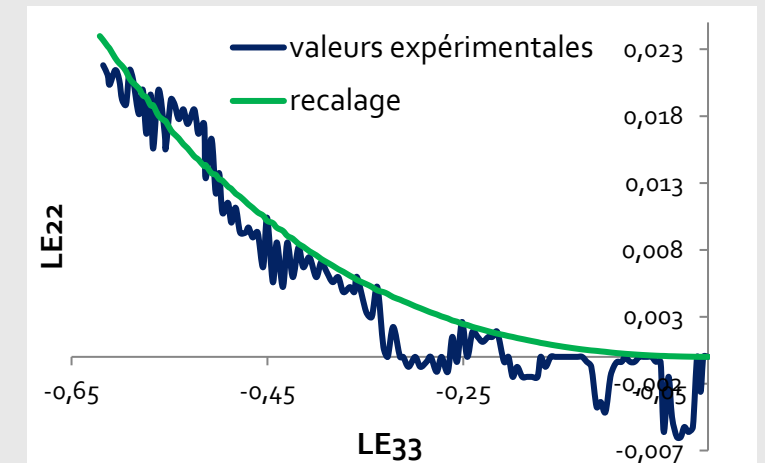
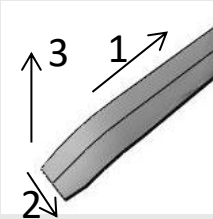
Augmentation de la pente au cours de la compaction

Direction 2

Faibles taux de fibres → rapport des déformations transverses $R_{23} \approx 0$

Vf tend vers 1 → R_{23} tend vers le **coefficient de Poisson du matériau**

$$\Rightarrow R_{23} = -\frac{V_{23mat}}{n} (V_f^n - V_{f_0}^n)$$



Comportement des mèches de roving

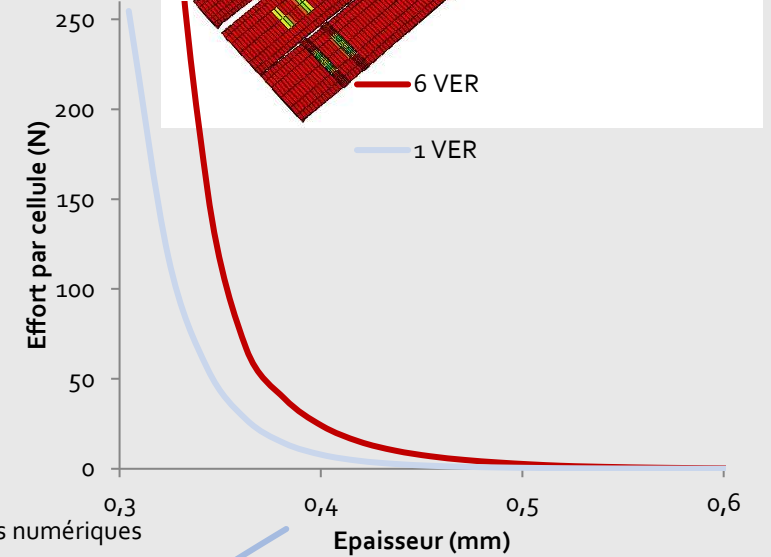
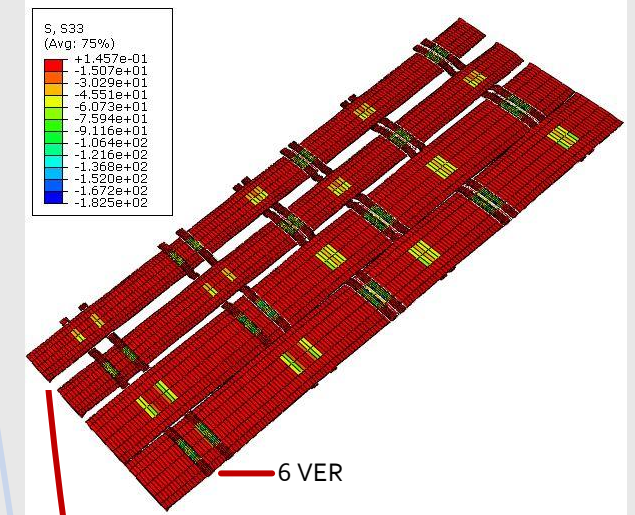
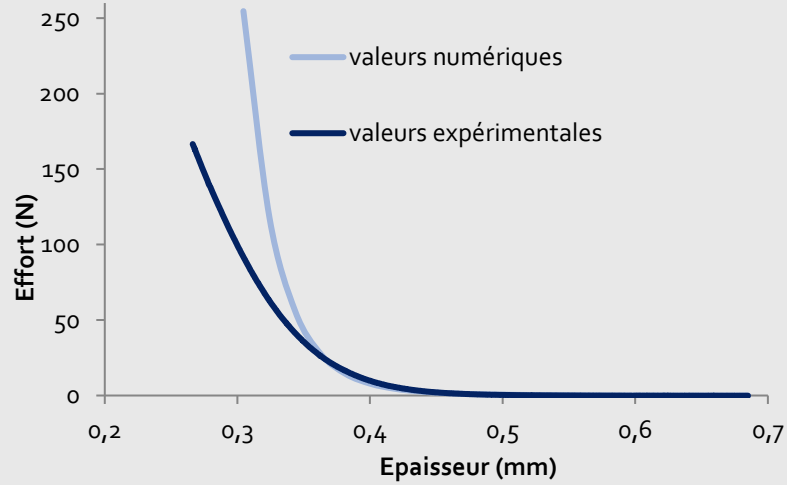
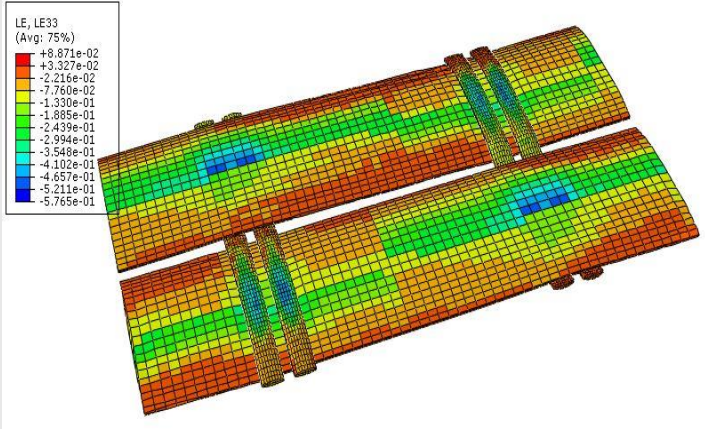
COMPRESSION/COMPACTION

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{2222} = C_{3333} = \frac{K_c \mathcal{W}_f^\gamma}{1 + \nu_{23mat} V_f^{n-1}} \\ C_{2233} = \frac{\nu_{23mat} K_c \mathcal{W}_f^{n-1+\gamma}}{1 + \nu_{23mat} V_f^{n-1}} \end{array} \right.$$

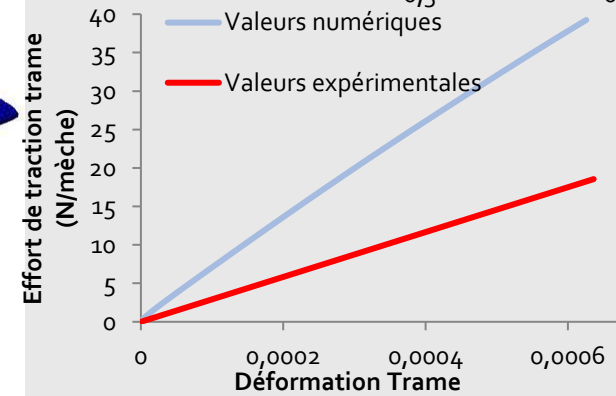
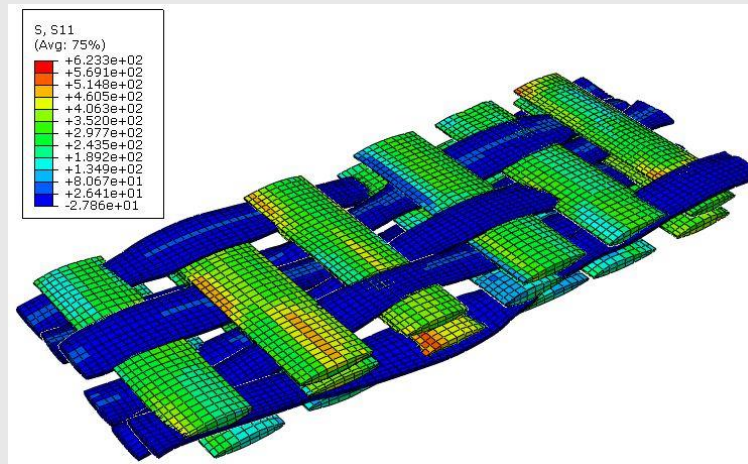
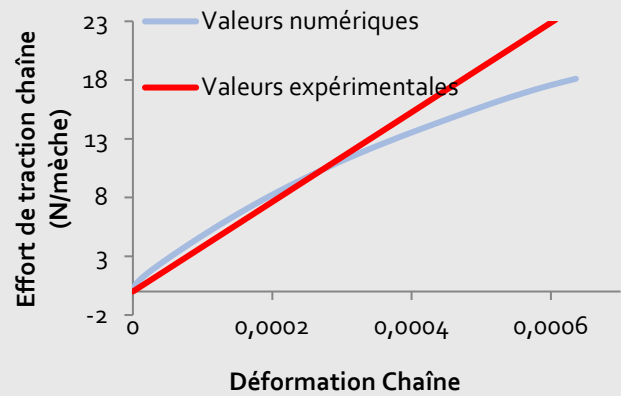
$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & \cancel{C_{1122}} & \cancel{C_{1133}} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & C_{2323} & 0 \\ & & & & & C_{1313} \end{bmatrix}$$

Symétrie

Quelques résultats



Calculs en dynamique explicite



Approches mésoscopiques

Conclusion

Approche très intéressante qui révèle pas mal de complexité

Temps de calculs encore longs

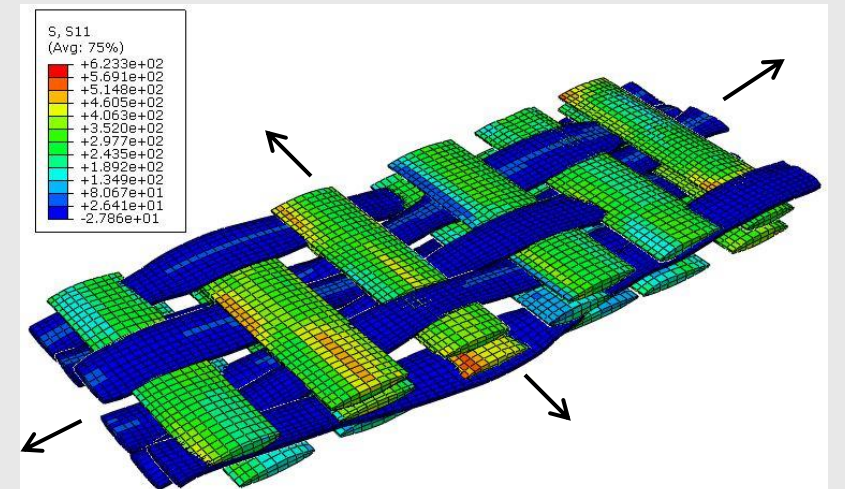
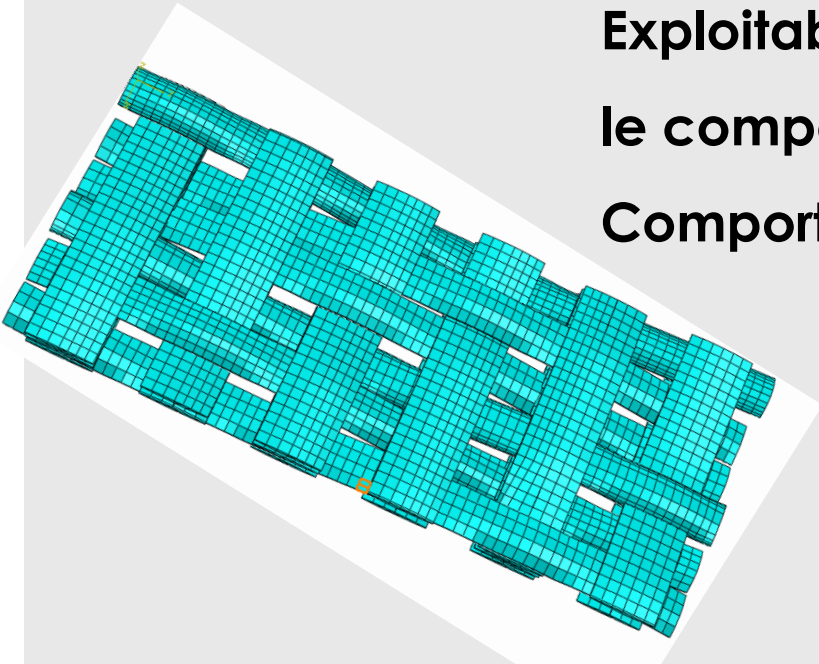
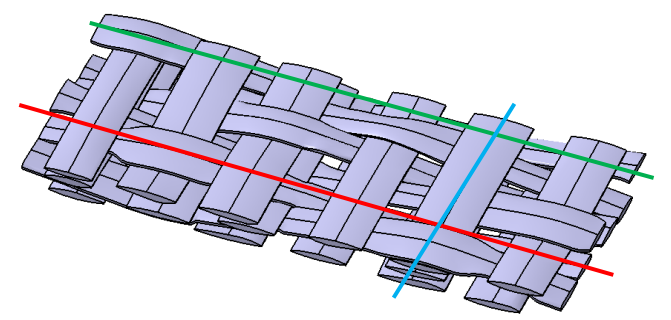
Pas réellement exploitables à l'échelle de la préforme

MAIS

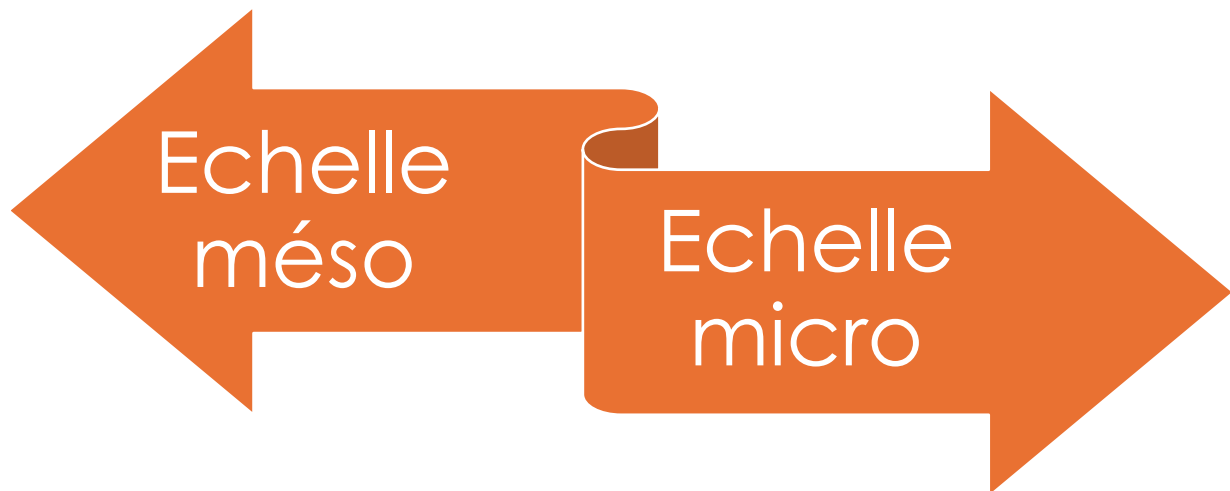
Exploitable pour du virtual testing, pour comprendre et définir

le comportement mécanique des renforts

Comportement de la mèche à affiner



COMPRESSION COMPACTION



Modèle de comportement du matériau homogène équivalent

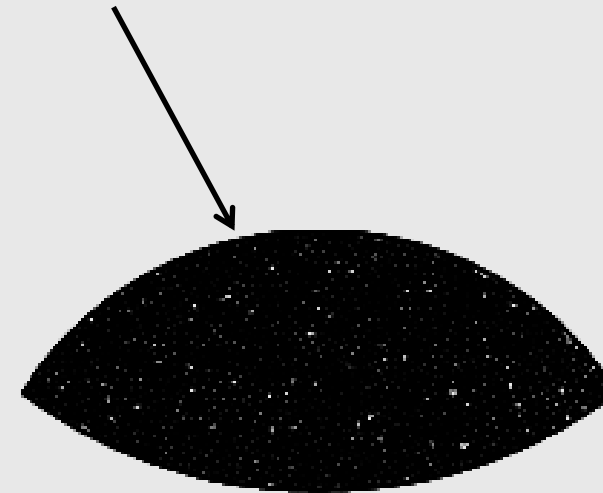
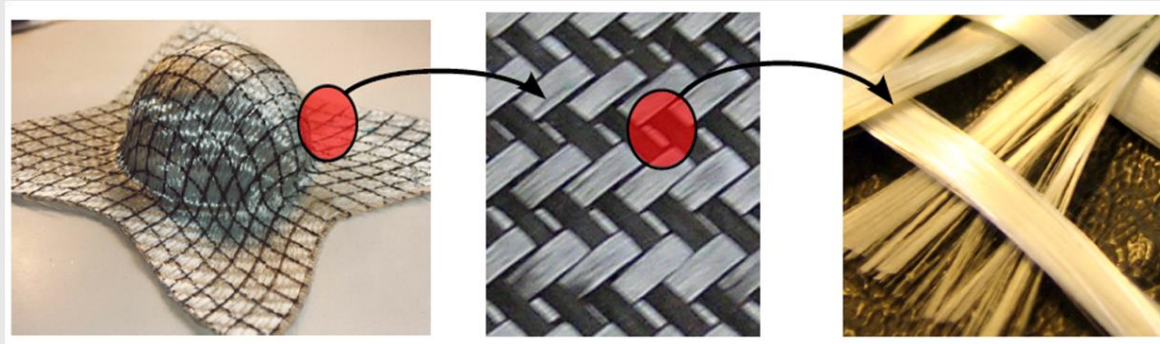
Echelle mésoscopique

→ Définition d'un matériau homogène équivalent :

Hérite du **comportement des fibres seules**
+ caractéristiques liées à l'**assemblage** de ces fibres sous forme de mèche



Echelle de simulation : approches microscopiques



Echelle microscopique

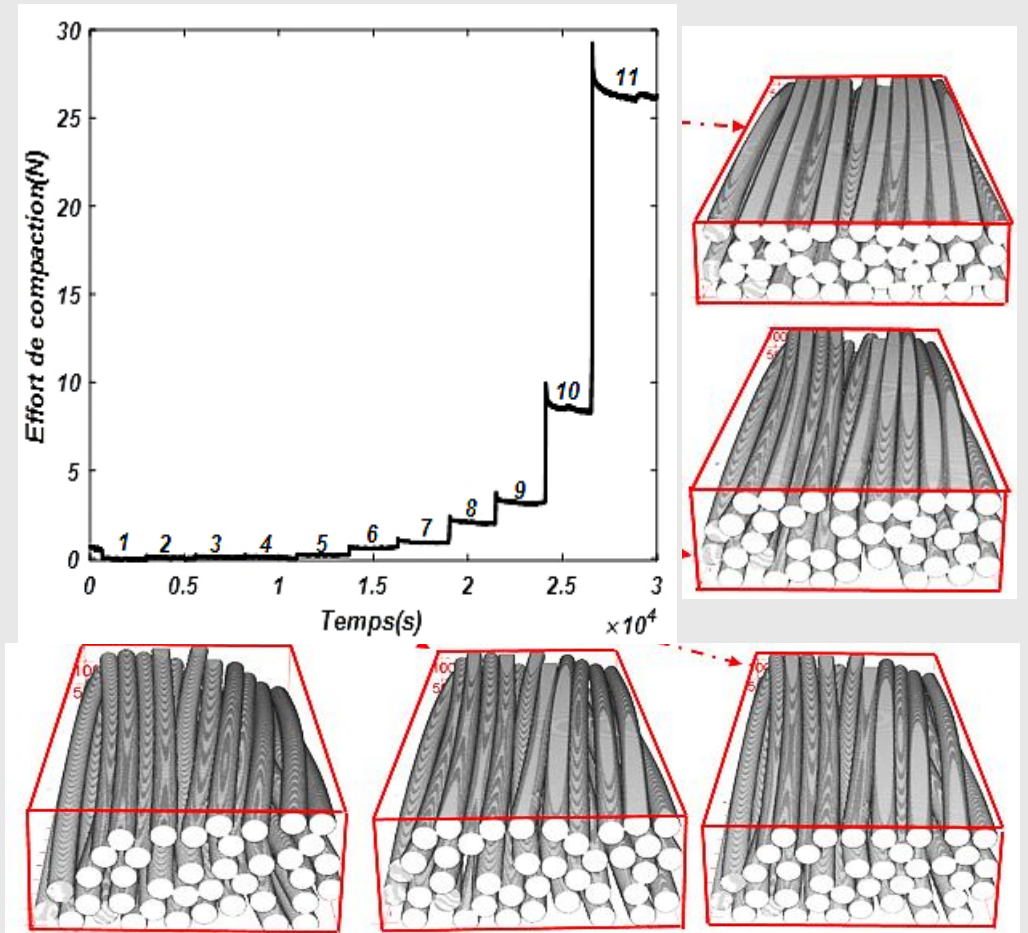
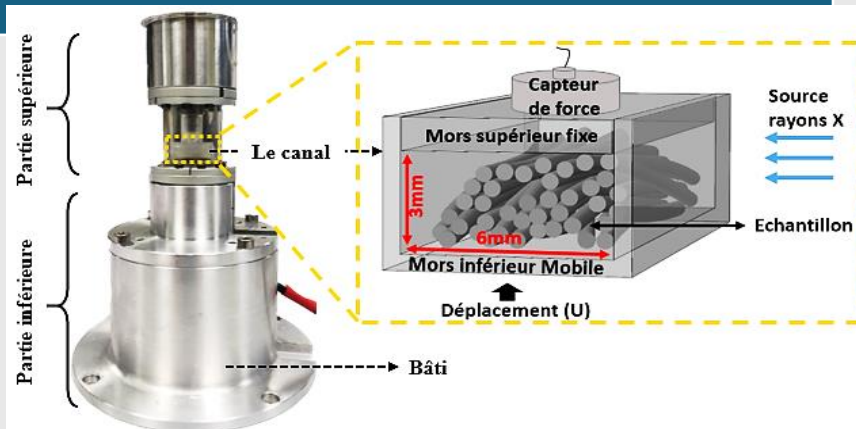
Thèses O. Haji (soutenue en 2018)
Thèse X. Song (soutenue en 2024)

Objectifs : Comprendre et simuler le comportement en compaction d'un enchevêtrement fibreux. Création d'un estimateur virtuel

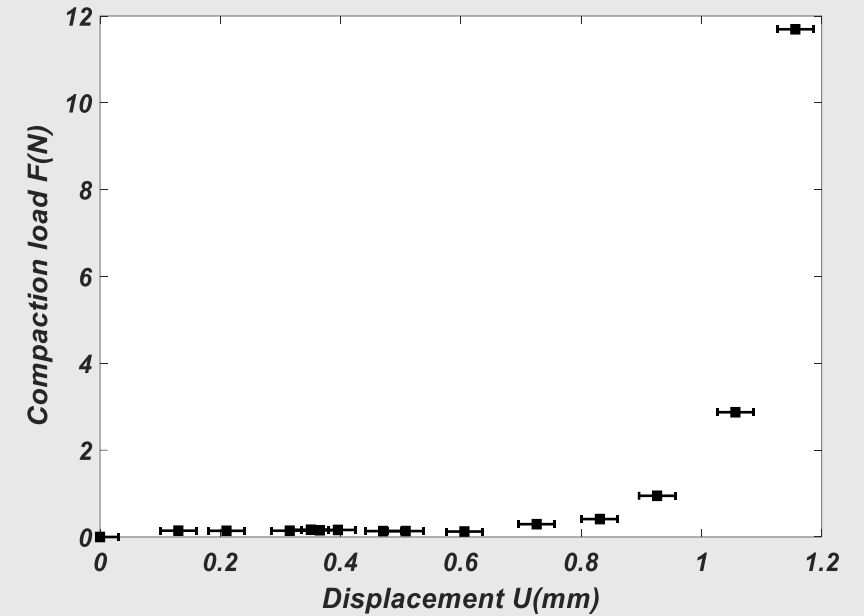
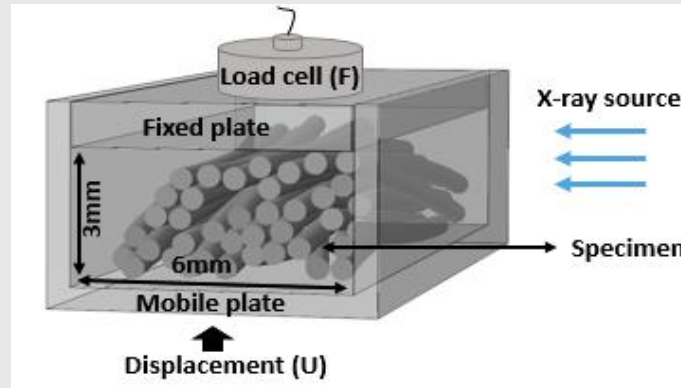
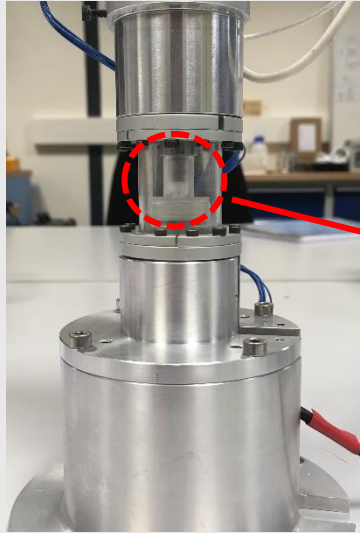
Création d'un milieu modèle

- 40 fibres
- quasi parallèles
- faiblement enchevêtrées
- diamètre 0,5mm

Essais de compaction confinée sous tomographe



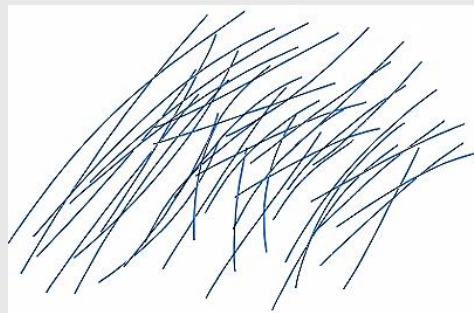
Echelle microscopique



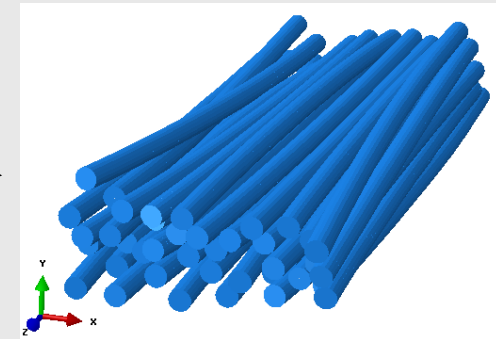
- ❑ Confined compaction of 40 polyester fibers initially curved
- ❑ Reconstruct the fibrous network geometry.



X-ray tomography scan



Skelton of the fibrous network

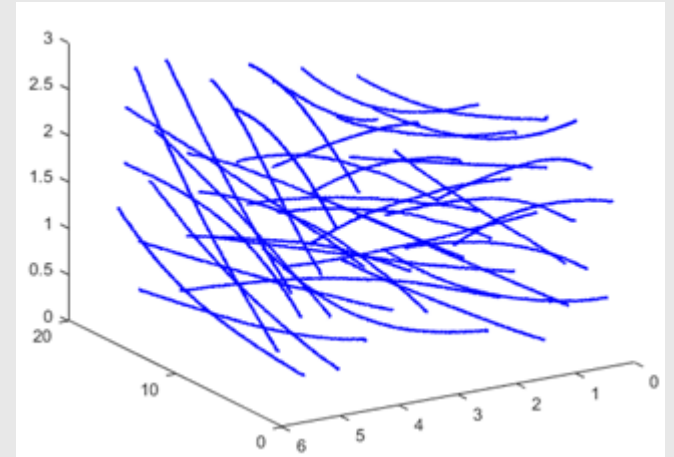
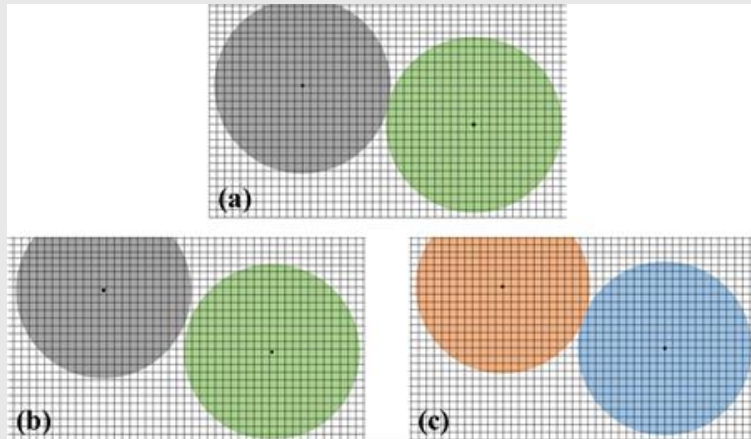


CAD model of the fibrous network

Echelle microscopique

Reconstruction de la géométrie numérique (Matlab)

- Calcul de la fraction volumique de fibres
- Calcul des longueurs de fibres
- Localisation des lignes moyennes
- Localisation précise des zones de contact

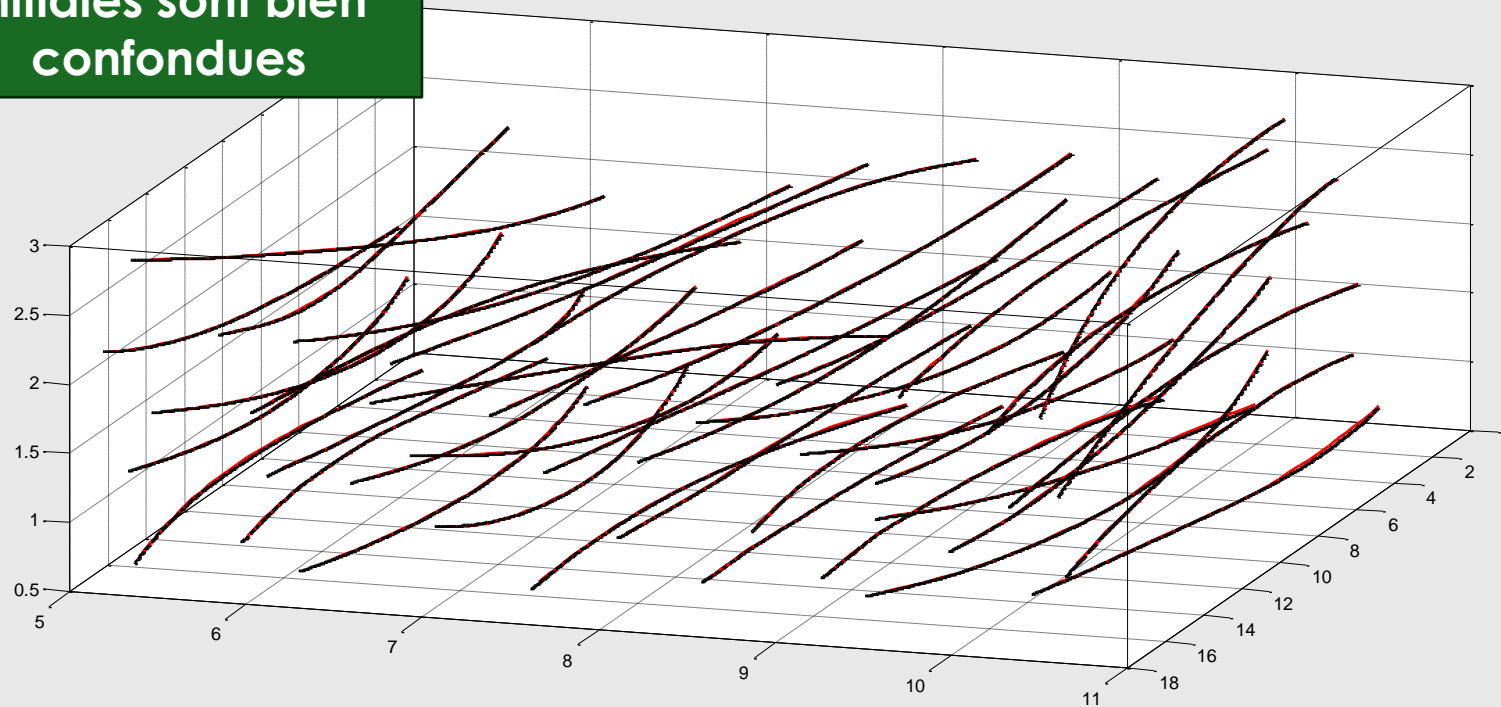


Echelle microscopique

Post-traitement de l'essai

- comparaison entre les deux microstructures initiales
- Microstructure expérimentale initiale (Taux de compression = 0%)
- Microstructure Numérique initiale (Taux de compression = 0%)

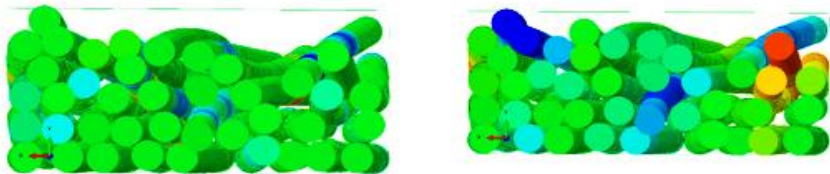
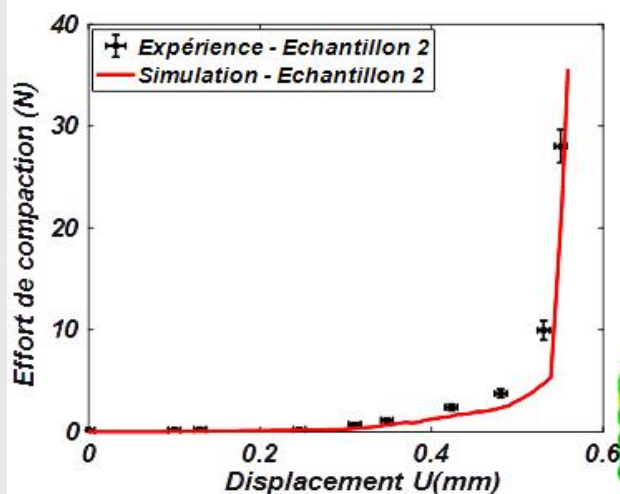
Les deux
microstructures
initiales sont bien
confondues



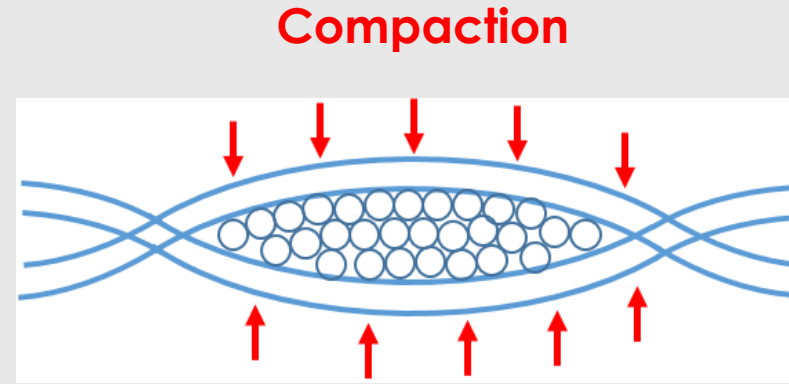
Echelle microscopique

Simulations

- matériaux homogènes de comportement linéaire élastique
- Simulation en dynamique explicite
- Éléments poutres (B31)



Orientation
+ Position des fibres

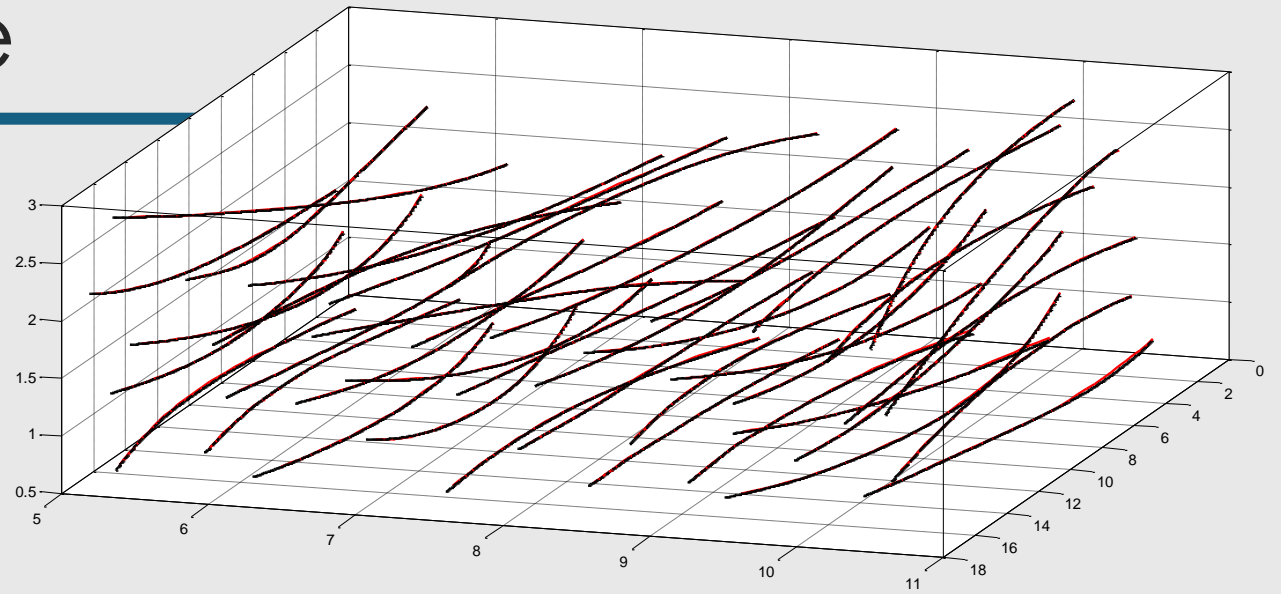
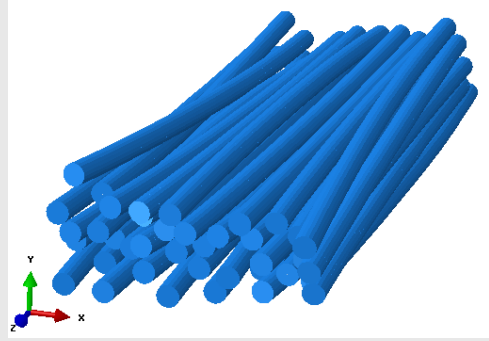


Comportement
de la fibre: E_f

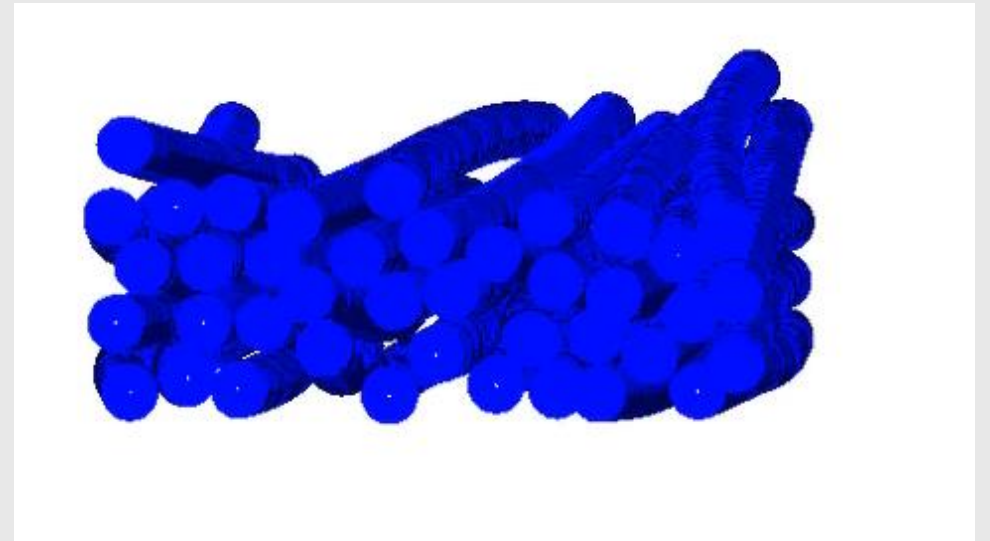
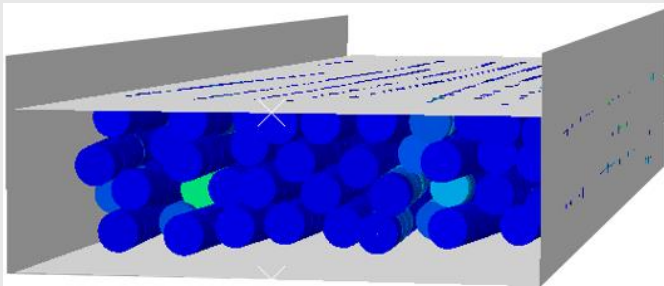
Réarrangement

Contact
fibre-fibre

Echelle microscopique



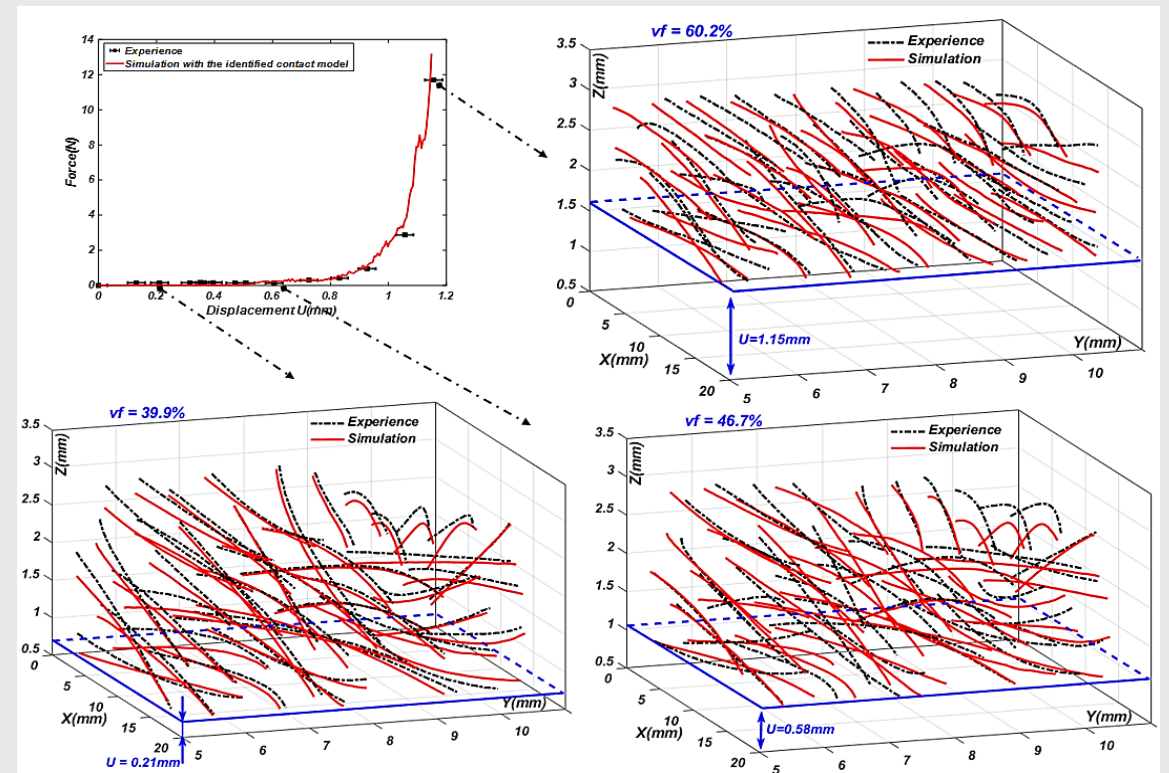
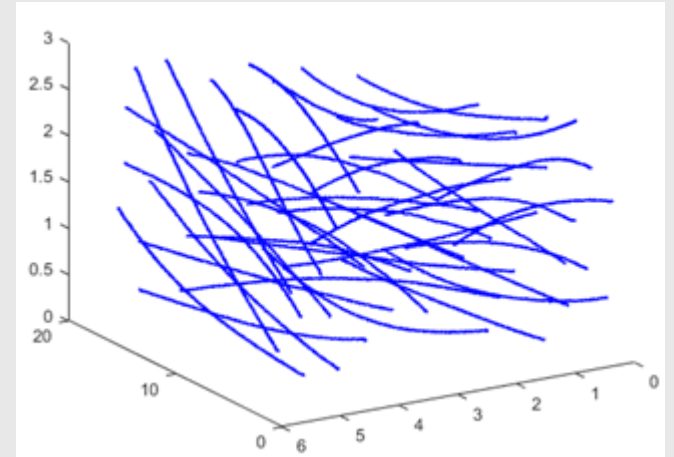
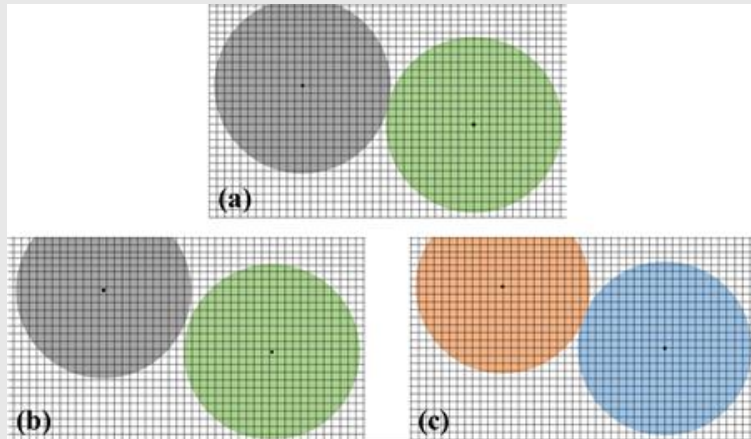
- ❑ Simulation par éléments finis éléments de poutres de Timoshenko (B31 avec contact Hertzien en dynamique explicite).



Echelle microscopique

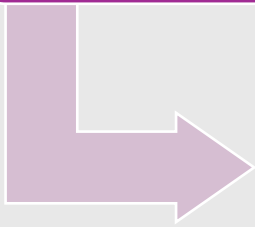
Reconstruction de la géométrie numérique (Matlab)

- Calcul de la fraction volumique de fibres
- Calcul des longueurs de fibres
- Localisation des lignes moyennes
- Localisation précise des zones de contact

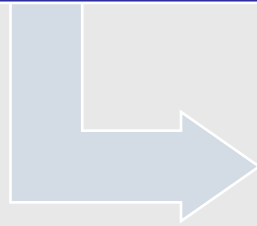


Echelle microscopique : conclusion

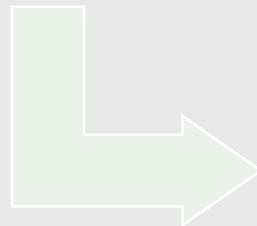
Création d'un
estimateur
virtuel



simulation de paquets de
fibres sous diverses
solllicitations et avec
différents trajets de
chargement




faire un pas de plus dans la
compréhension de la
mécanique de déformation
du réseau fibreux



d'alimenter la loi de
comportement à
l'échelle
mésoscopique

Conclusion



De nombreuses approches de modélisation/simulation existent et sont à considérer en fonction de l'investissement en : complexité, temps de calcul, logiciel présent, précision souhaitée, etc.

La simulation de la mise en forme peut être abordée par des approches continues, discrètes, semi-discrètes

Beaucoup de problèmes restent ouverts

- Au niveau expérimental pour caractériser et définir des lois de comportement de milieux fibreux adaptées et représentatives. Elles sont encore très phénoménologiques
- Au niveau numérique pour améliorer les performances des stratégies proposées

Il est ainsi fondamental pour la simulation de la mise en forme de continuer à développer les approches continues : en développant des approches et lois de comportement originales permettant de prendre en compte des milieux divisés dans des approches continues



MERCI DE
VOTRE
ATTENTION