



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 17652

**To cite this version:** Lachaud, Frédéric and Piquet, Robert and Paroissien, Eric and Huet, Jacques *Approche couplée essais-calculs pour l'analyse du comportement des assemblages boulonnés en composites stratifiés.* (2013) In: NAFEMS, 30 May 2013 (Paris, France). (Unpublished)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

## Approche couplée essais-calculs pour l'analyse du comportement des assemblages boulonnés en composites stratifiés

Frédéric LACHAUD – Robert PIQUET – Eric PAROISSIEN\* – Jacques HUET

*Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE)*

*Département de Mécanique des Structures et des Matériaux (DMSM)*

*Institut Clément Ader (ICA)*

*Groupe Matériaux et Structures Composites*

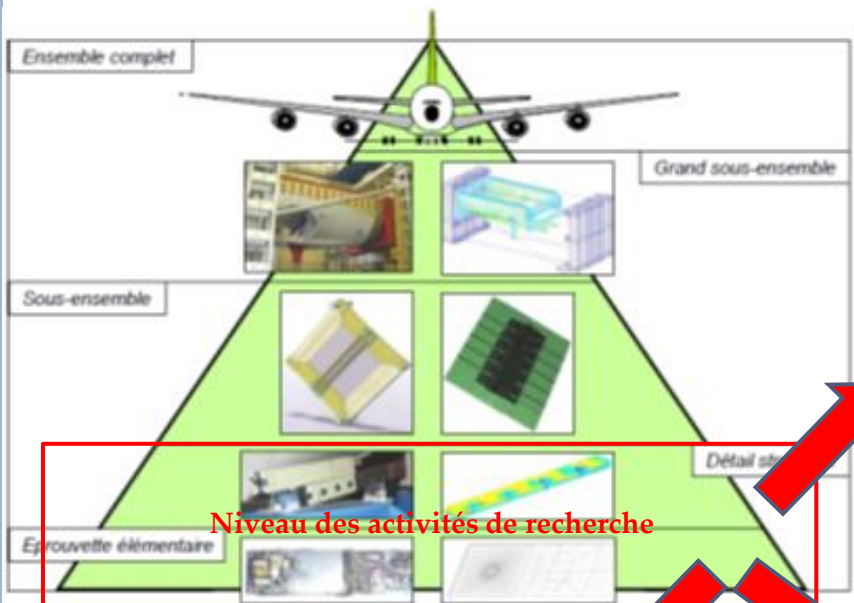
*\*SOGETI High Tech*

*TOULOUSE*

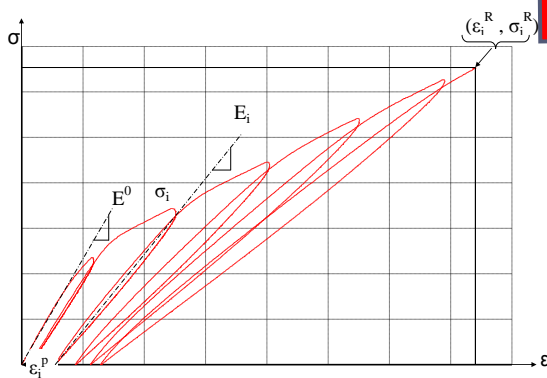
# Introduction-Contexte

**Objectifs :** Comprendre et Modéliser les phénomènes d'endommagement dans les structures composites aéronautiques

**Niveau des études :** Multi échelle; de l'éprouvette aux détails technologiques



(source Institut CARNOT FEMTO, Besançon)

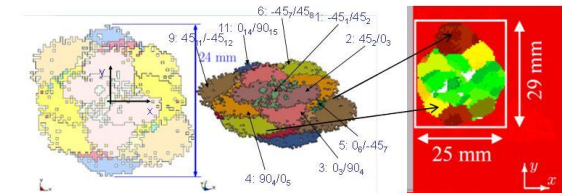
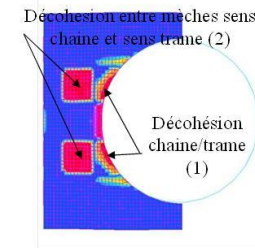
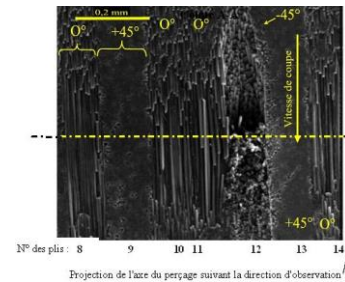


Epreuve élémentaire

➤ Usinage

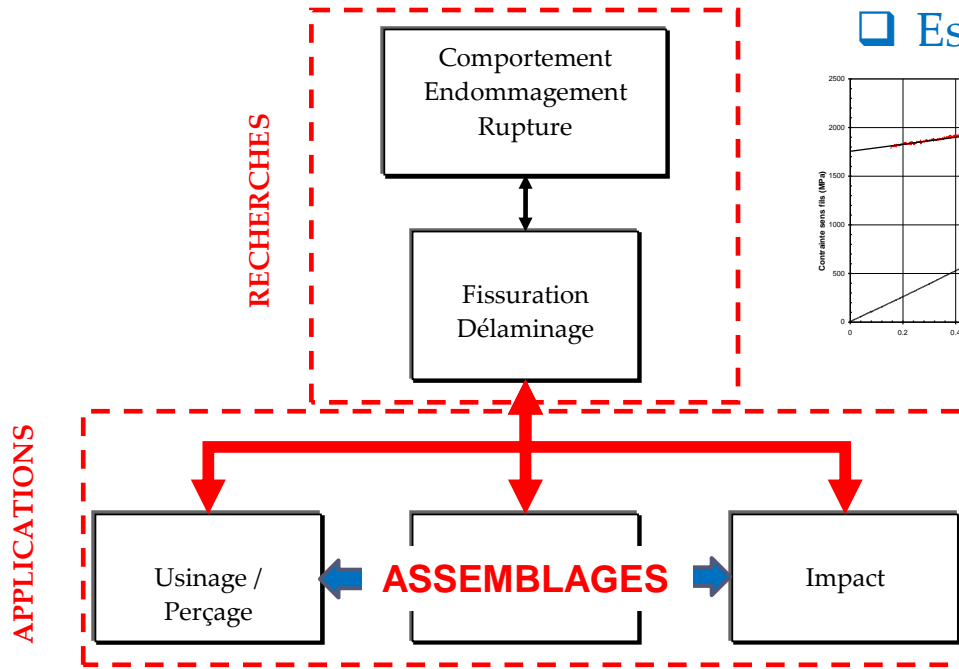
➤ Assemblages

➤ Impact

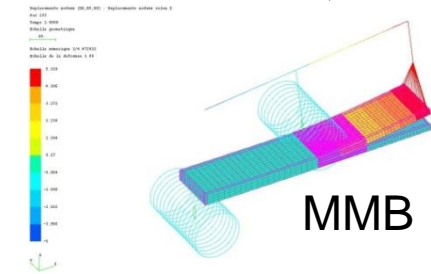
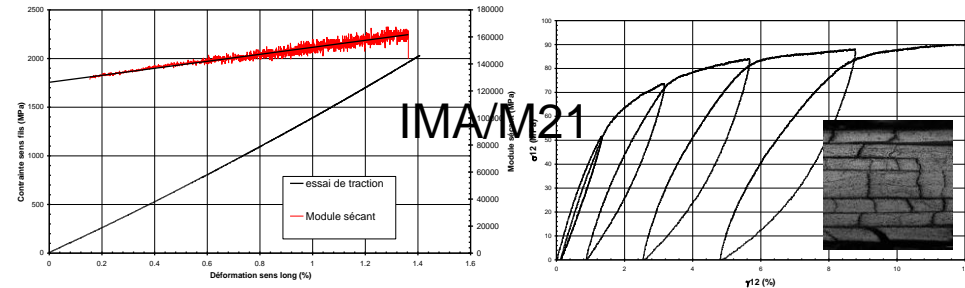


- Caractérisation
- Lois de comportement (1D, 2D, 3D)
- Micro-Méso-Macro
- Développement d'outils, méthodes, algorithmes, essais...

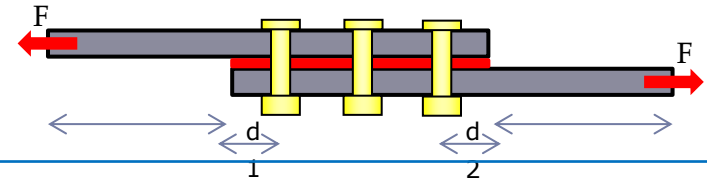
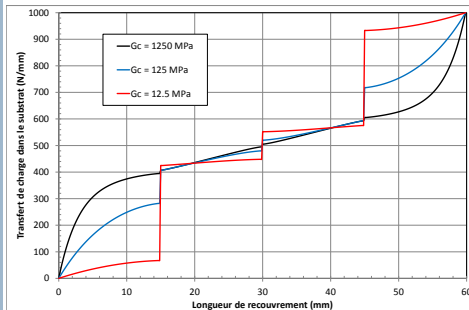
➤ **Méthode** : dialogue à plusieurs niveaux d'études



## Essais-Modèles-Méthodes Numériques



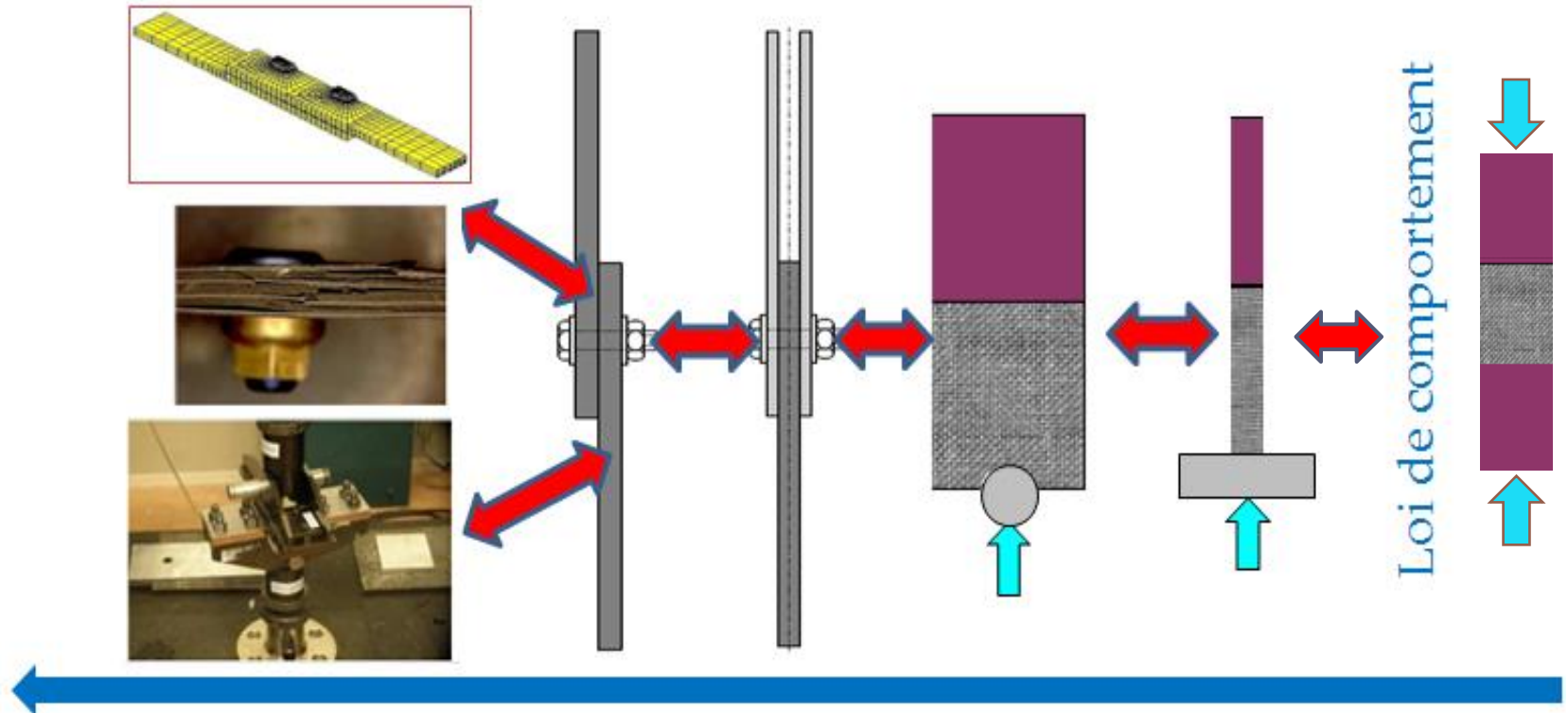
## Essais-Modèles-Méthodes Numériques



## Tolérance aux dommages dans les assemblages composites

- Dommages : Fabrication – Usinage – Impact
- Assemblages : Collés, Boulonnés, Boulonnés-Collés
- Composites : Stratifiés UD et Tissés, Fibres courtes...

## ➤ Comportement des assemblages



Applications : Assemblages, OHC, FHC, ...

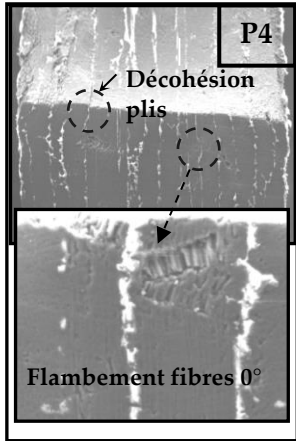
## ASSEMBLAGES

Multi-méthodes – Multi-échelles – Multi-Matériaux – Multi-Sollicitations

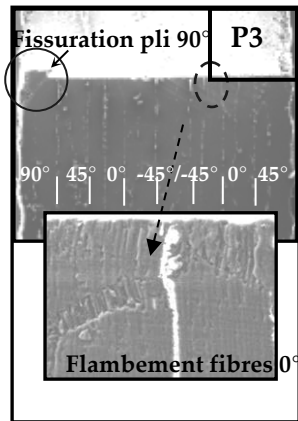
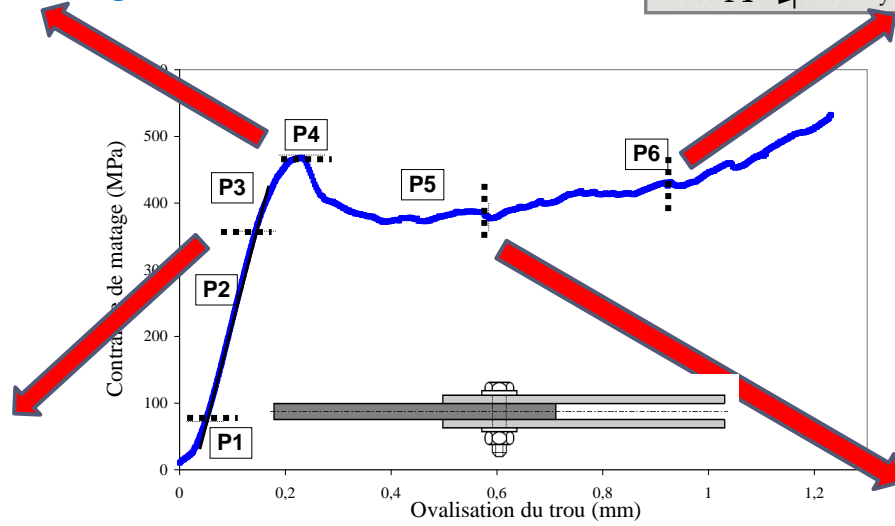
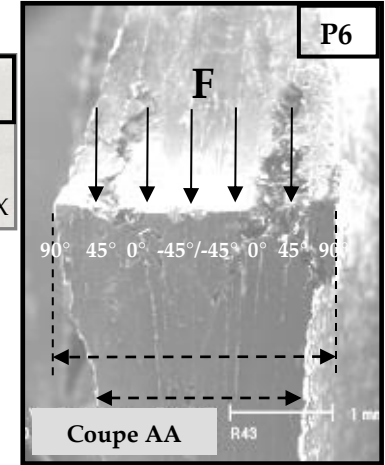
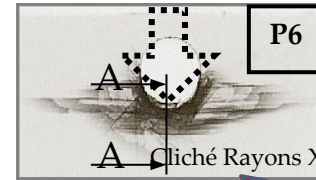
- ❑ **Matage dans les assemblages boulonnés composites à base d'UD**
  - Mécanismes de dégradation par matage
  - Lois de comportement inter et intra laminaire de composites UD
  - Quelques modèles numériques d'assemblages
  
- ❑ **Interaction défauts d'usinage – tenue au matage**
  - Les défauts d'usinage
  - Défaut d'écaillage / délaminage
  - Défaut de parois des alésages
  
- ❑ **Application aux composites stratifiés tissés**
  
- ❑ **Les assemblages hybrides boulonnés-collés**
  
- ❑ **Conclusion et perspectives**

# Assemblages boulonnés : la cinétique d'endommagement

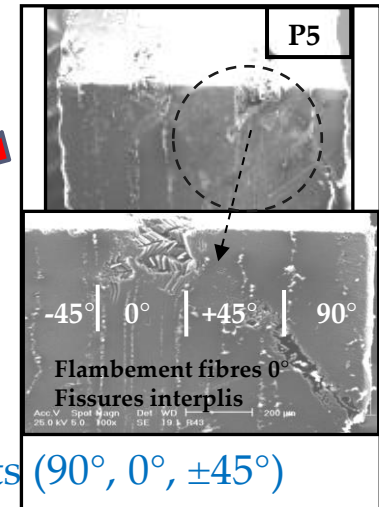
## Le matage « pur » en statique : assemblages à double recouvrement



**P4**  
Propagation des défauts plis à 90°  
Flambement fibres à 0° et à ±45°  
Délaminage +45°/0° et -45°/0°



**P3**  
- Fissuration hors plan des plis à 90°  
- Flambement fibres à 0°

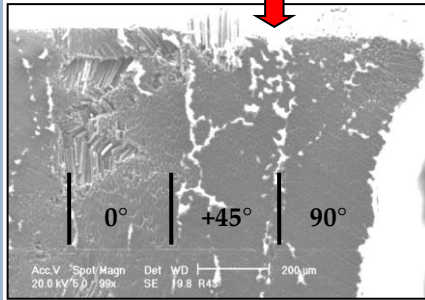
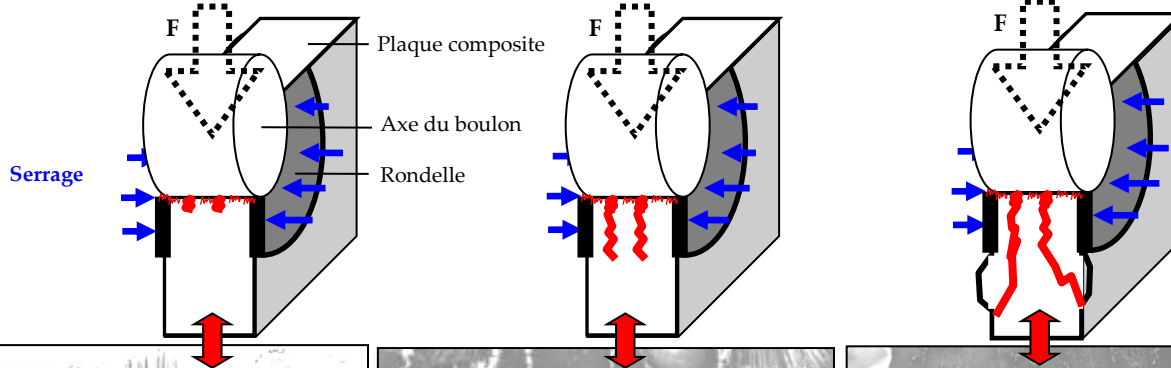


**P5**  
Propagation des défauts (90°, 0°, ±45°)  
Macro-fissures



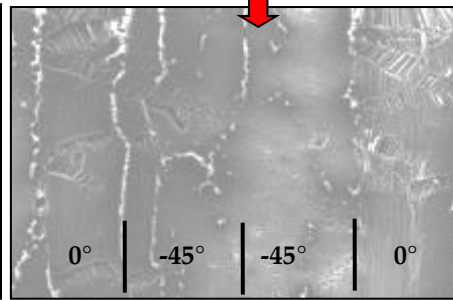
# Assemblages boulonnés : la cinétique d'endommagement

## Le matage statique avec serrage du boulon : double recouvrement



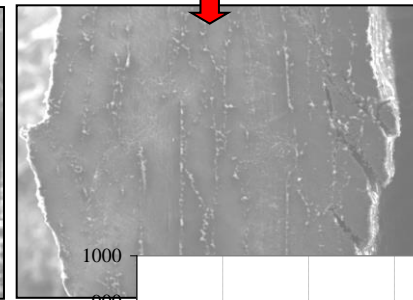
a)

Rupture fibre



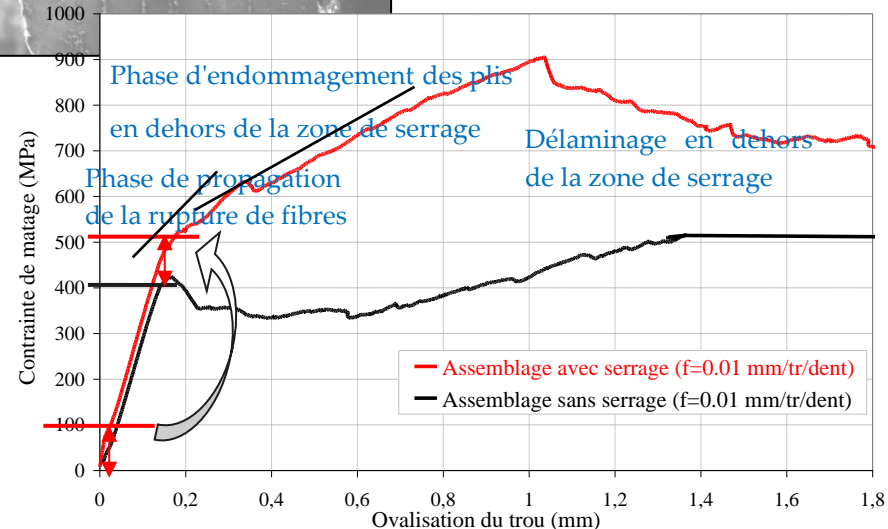
b)

Rupture fibre  
Confinement



Rupture hors plan  
en dehors de la zone  
de serrage

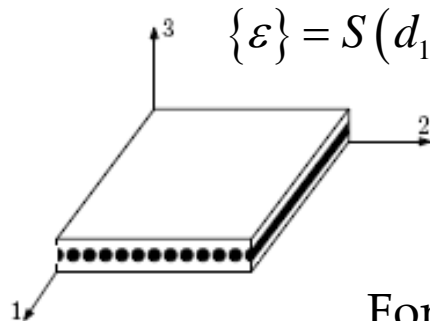
- « Il faut un serrage du boulon »
- Initiation quasi identique (frottement)





# Comportement mécanique non linéaire : Mat. Stand. Gén.

## ➤ Loi de comportement générique : endommagement du pli



$$\{\varepsilon\} = S(d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6)\{\sigma\}$$

### ☐ Fonction seuil d'endommagement

$$F_d(Y, d) = f_d(Y, d, \sigma) - g_d(Y, d, \sigma) \quad \dot{d} = \dot{\lambda}_d \frac{\partial F_d}{\partial Y}$$

Forme du critère d'endommagement  
Modèle

Fonction à identifier  
Essais

## ➤ Loi de comportement générique : déformation résiduelle

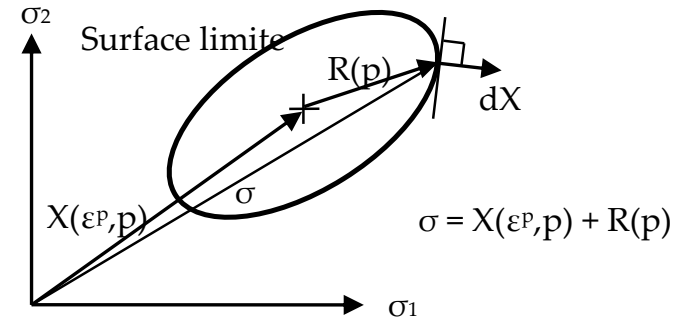
$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

### ☐ Fonction seuil de plasticité (associée)

$$F_p(\tilde{\sigma}, \tilde{R}, \tilde{X}) = f_p(\tilde{\sigma} - \tilde{X}) - g_p(\tilde{R}, R_0, k_0) \quad \dot{\varepsilon}_p = -\dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial \sigma}$$

Forme du critère de plasticité  
Modèle

Fonction à identifier  
Essais



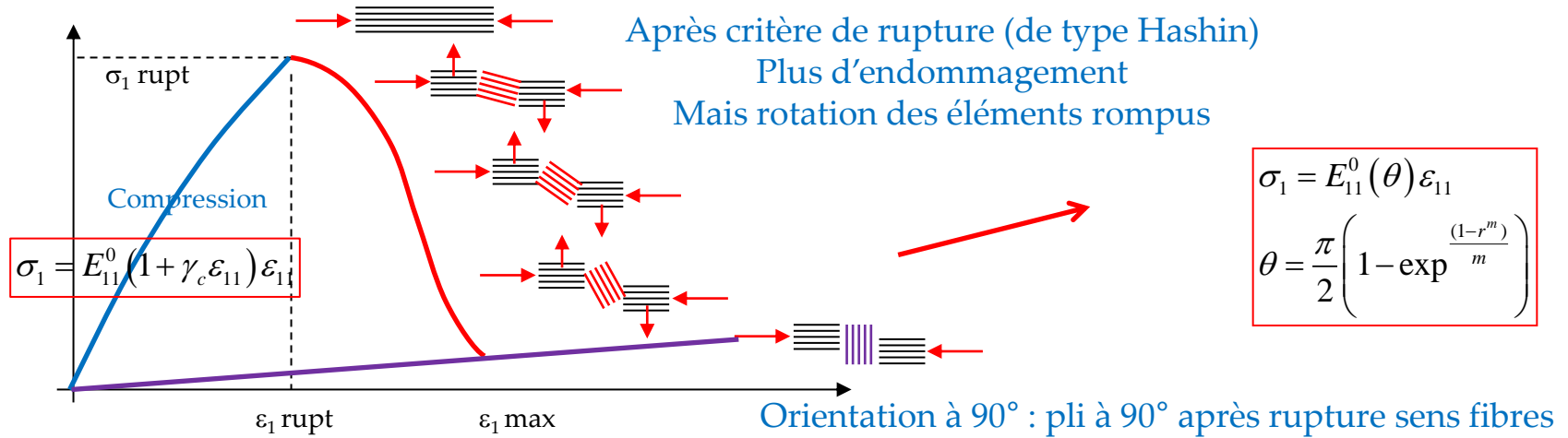
Direction de l'écoulement  $\frac{\partial F_p}{\partial \sigma}$

Direction des var. écroui.  $\frac{\partial F_p}{\partial A_i}$

Lois indépendantes mais couplées par  $\tilde{\sigma}$

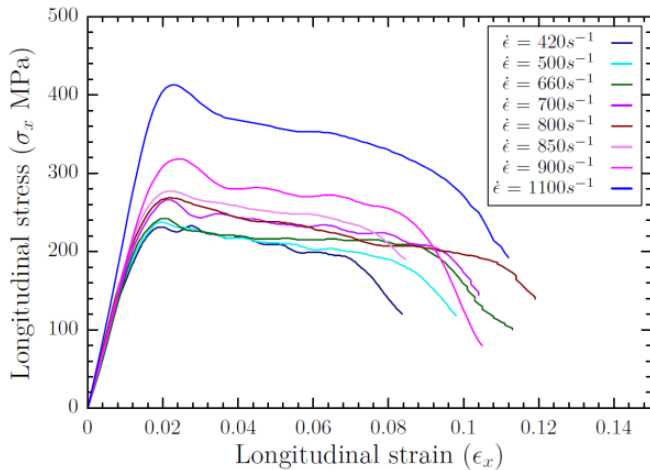
# Comportement mécanique non linéaire : spécificités

## ➤ Modélisation des ruptures de fibres en compression

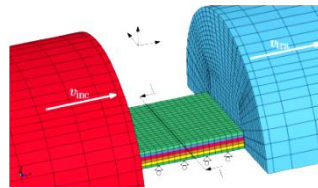


## ➤ Effet de vitesse de déformation

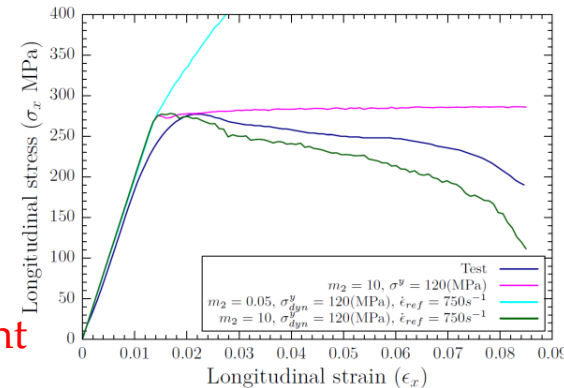
## ➤ Identification en dynamique



- Essais rapides sur machine hydraulique
- Essais sur banc de Hopkinson

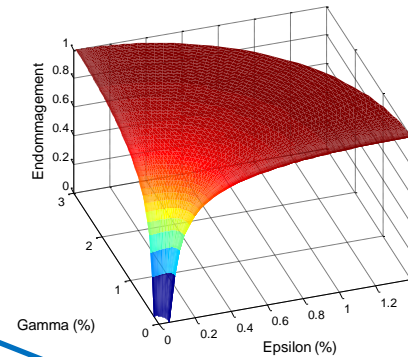
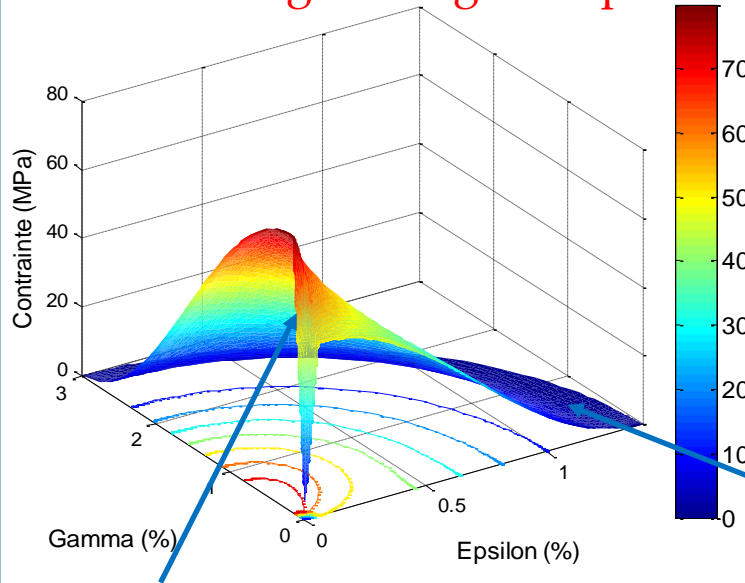


- Pas/Peu d'effet sens fibres
- Peu d'effet sens travers
- Effet important en cisaillement



# Comportement non linéaire matériau : délaminage

## ➤ Délaminage : Loi générique en statique, dynamique



$$\begin{cases} \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{cases} = \begin{cases} (1-d) K_{33} \langle \delta_{33} \rangle_+ + K_{33} \langle \delta_{33} \rangle_- \\ (1-d) K_{13} \delta_{13} \\ (1-d) K_{23} \delta_{23} \end{cases}$$

élément cohésif

$$d = 1 - \frac{\delta_0}{2\delta} \left[ 1 - \cos \left( \frac{\pi(\delta - \delta_0)}{\delta_m - \delta_0} \right) \right]$$

endommagement

### □ Initiation

$$\sqrt{\left( \frac{\langle \sigma_{33} \rangle_+}{\sigma_{33}^{RD}} \right)^2 + \alpha^2 \left( \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13}^{RD} (1 + \langle \sigma_{33} \rangle_- \tan(\varphi))} \right)^2} = 1$$

$$\begin{cases} \alpha^2 \cdot \beta^2 = \frac{G_{II}}{G_I} \\ \sigma_{ij}^{RD} = \sigma_{ij}^{RS} (1 + f(\dot{\epsilon})) \end{cases}$$

$$\delta_0 = \delta_{33}^{0D} \cdot \delta_{13}^{0D} (1 + \langle \epsilon_{33} \rangle_- \cdot \tan(\varphi)) \sqrt{\frac{1 + \alpha^2 \cdot \beta^2}{(\delta_{13}^{0D} (1 + \langle \epsilon_{33} \rangle_- \cdot \tan(\varphi)))^2 + (\alpha \beta \delta_{33}^{0D})^2}}$$

- Coefficients de couplage modifiés
- Règle sur les Raideurs indispensable
- Fonction des critères d'initiation et de propagation

### □ Propagation

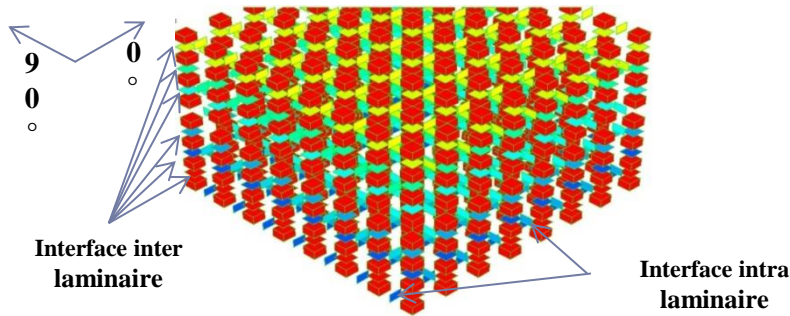
$$\left( \frac{G_I}{G_{Ic}} \right)^\eta + \left( \frac{G_{II}}{G_{IIc}} \right)^\eta = 1$$

$$\delta_m = \frac{2(1 + \alpha^2 \beta^2)}{\delta_0} \left[ \left( \frac{K_{33}}{G_{Ic}(\theta)} \right)^\eta + \left( \frac{K_{13} \alpha^2 \beta^2}{G_{IIc}(\theta)} \right)^\eta \right]^{-\frac{1}{\eta}}$$

- Plasticité implémentée
- GIc, GIIc fct de θ
- Version 3D, GIIIc ≠ GIIc

# Couplage cohésif-pli

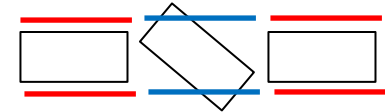
- Principe : Dialogue entre loi pli et loi cohésive (Modèle non local Impl./Expl.)



Ex. : Maillage [(0,90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>

- Méthode : les critères des plis « déclenchent » l'initiation des éléments cohésifs

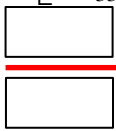
$$f_1(\sigma, d, r) = \left[ \frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{\sigma_{11}^{RC}} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^S + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan \varphi} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13}^S + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan \varphi} \right]^2 - r_1^2 = 0$$



$$f_4(\sigma, d, r) = \left[ \frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{\sigma_{22}^{ST}} \right]^2 + \left[ \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle}{\sigma_{22}^{SC}} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^S + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan \varphi} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23}^S + \langle -\sigma_{22} \rangle \tan \varphi} \right]^2 - r_4^2 = 0$$

pli i  **f interface** = moyenne f4(j), f4(j+1)

$$f_5(\sigma, d, r) = S^2 \cdot \left[ \frac{\langle \sigma_{33} \rangle}{\sigma_{33}^S} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13}^S + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan \varphi} \right]^2 + \left[ \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23}^S + \langle -\sigma_{33} \rangle \tan \varphi} \right]^2 - r_5^2 = 0$$

pli i+1  **f interface** = moyenne f5(i), f5(i+1)

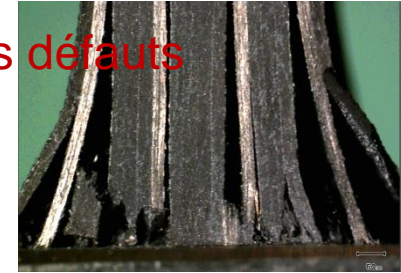
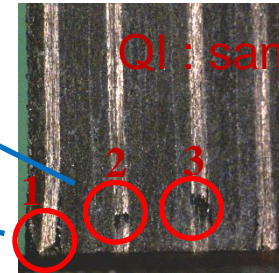
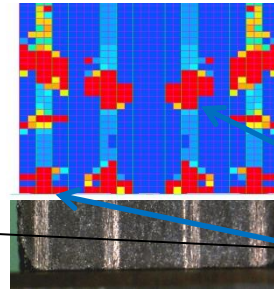


# Assemblages boulonnés : modèle numérique

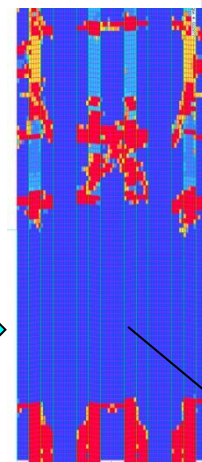
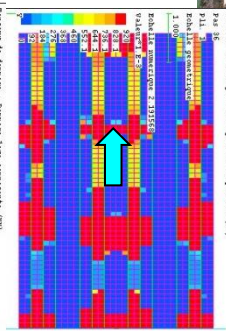
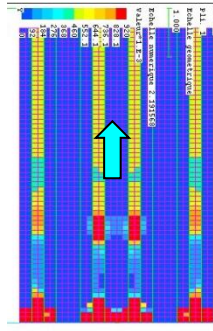
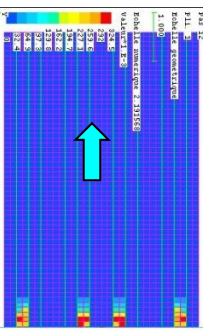
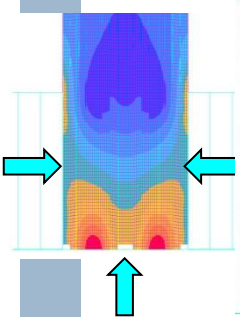
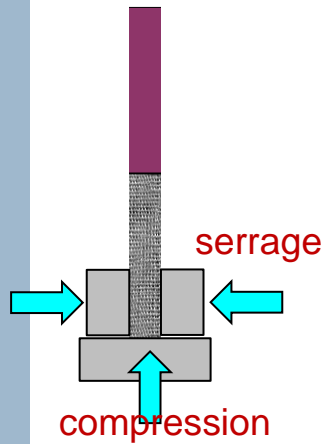
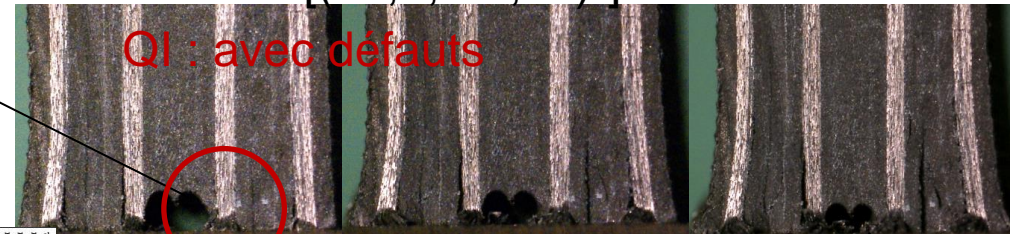
## ➤ Ecrasement :

Ruptures sens fibres internes / externes  
Fragmentation

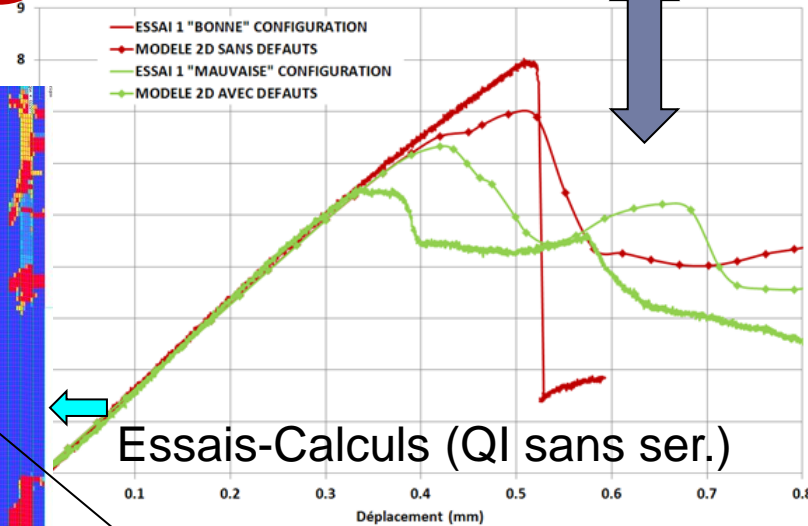
Rupture sens fibres Proche des défauts



[(45,0,-45,90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub> à 0.52 mm



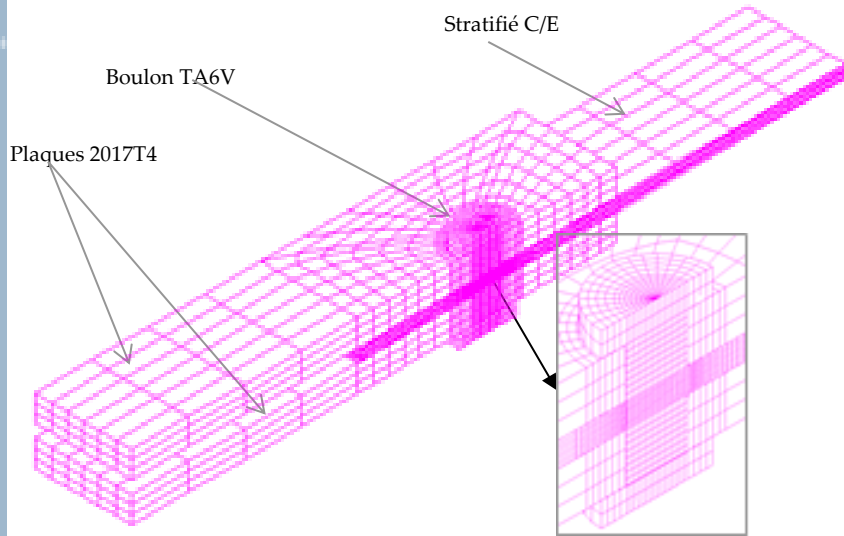
Fragmentation  
[(45,0,-45,90)<sub>2</sub>]<sub>s</sub>



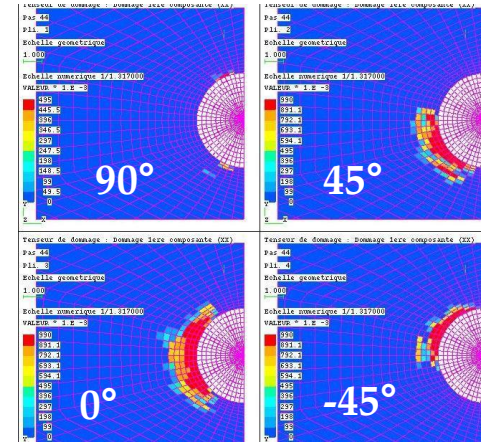
Essais-Calculs (QI sans ser.)

# Assemblages boulonnés : modèle numérique

## ➤ Modèle EF 3D

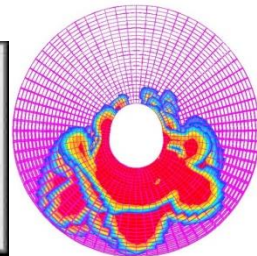
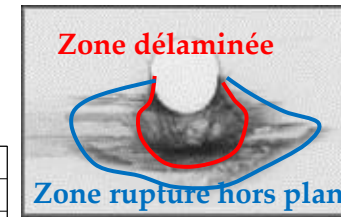
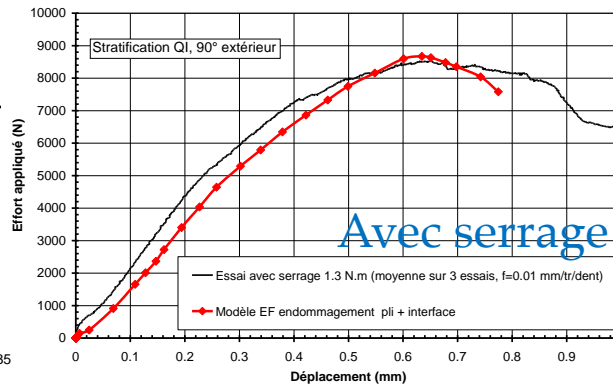
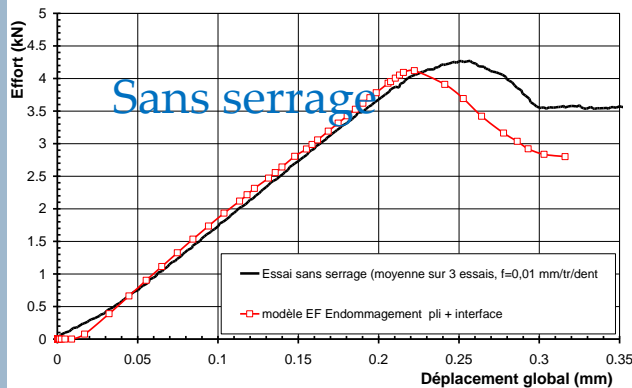


- Endommagement pli
- Rupture sens fibres
- Décohésion plis
- Serrage du boulon



Rupture sens fibres

## ➤ Comportement Effort-Déplacement

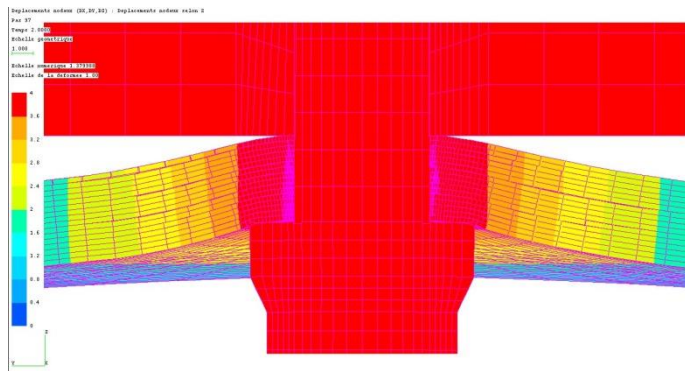
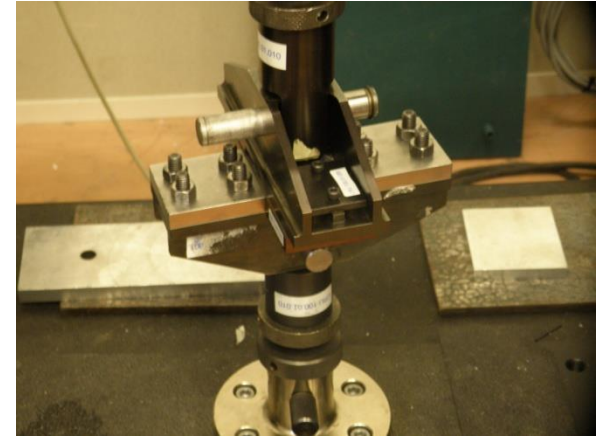
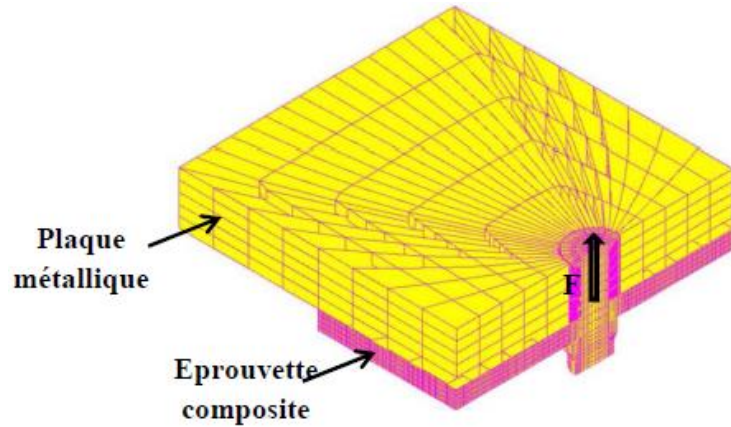


Endommagement local (serrage)

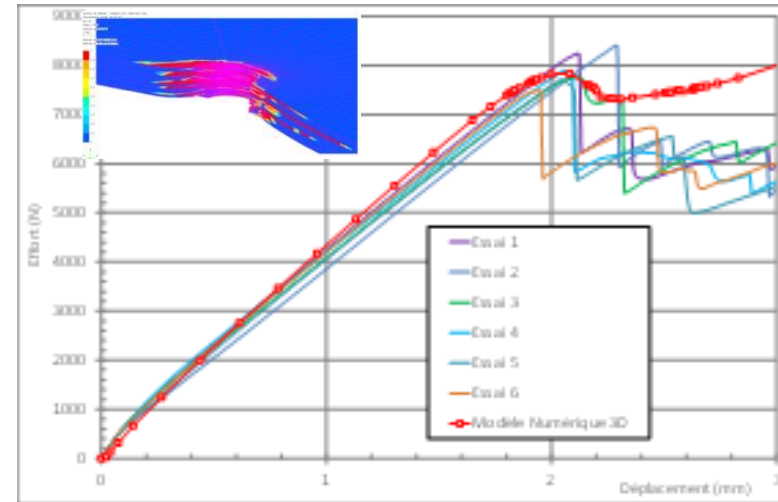


## Perspectives de Recherche : Assemblages / Assemblage et Impact

- Pull-Through : Couplage intra-inter avec serrage du boulon (implicite)



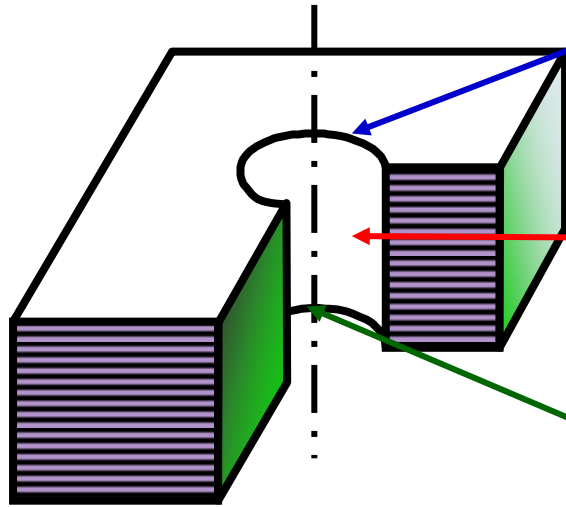
Pull-Through couplé  
Impact  
Modèle en cours





# Interaction défauts d'usinage / comportement des assemblages

## ➤ Les défauts de perçage



### Défauts d'entrée de trou

- Défaut de localisation
- Décohésion du premier pli

1

### Défauts sur la paroi du trou

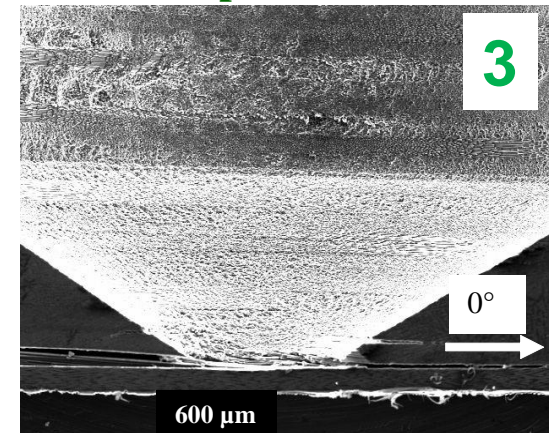
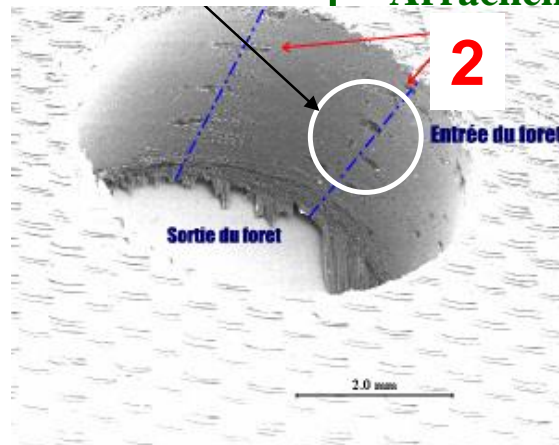
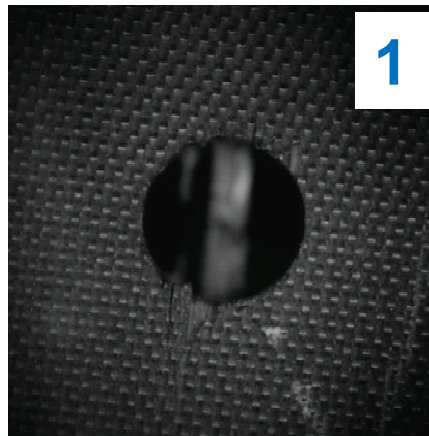
- Circularité
- Rugosité
- Arrachement de fibres et de matrice
- Dégradation de la matrice

2

### Défauts de sortie de trou

- Décohésion de la matrice
- Arrachement des derniers plis

3



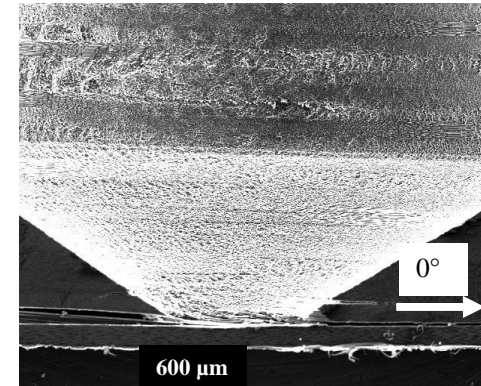
# Interaction défauts d'usinage / comportement des assemblages

## ➤ Délaminage en sortie de perçage : délaminage du/des dernier(s) pli(s)

Depuis 1997

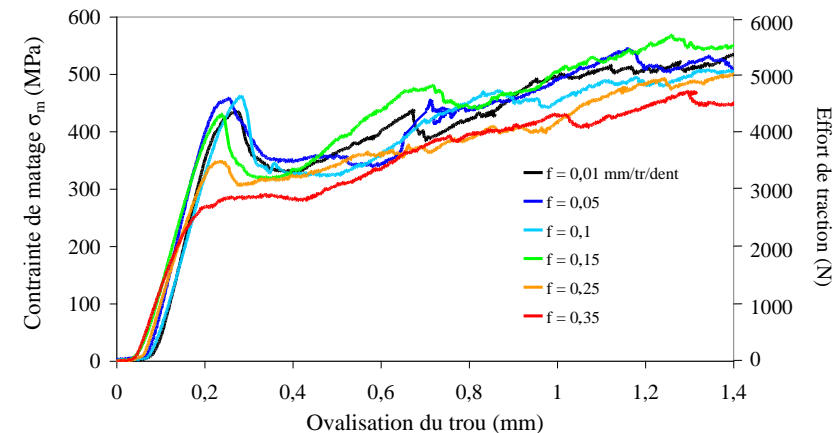
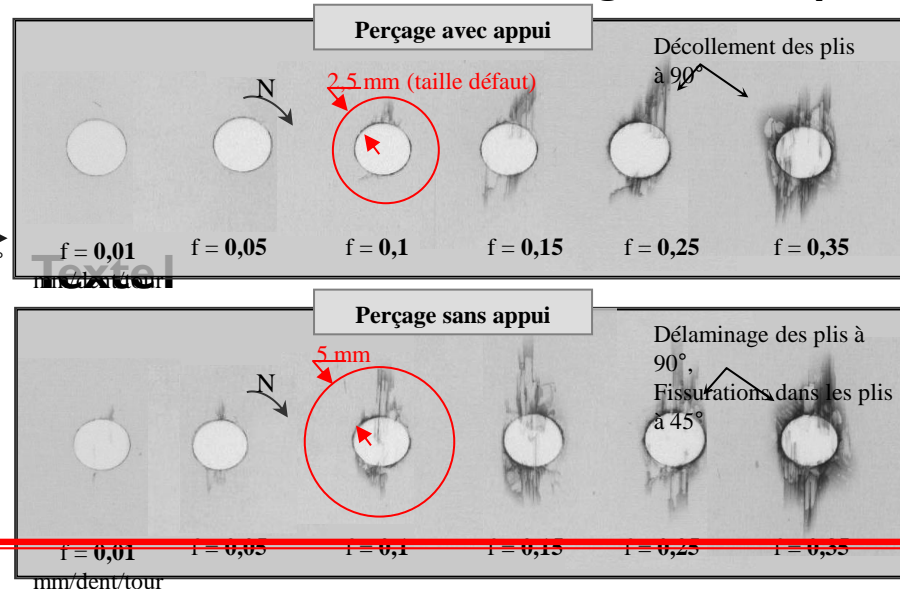
### ✓ Outil de prévision : on sait l'éviter...

- Modèle analytique – Semi analytique
- Modèles numériques
- Configurations multiples : outil  $\frac{3}{4}$ , multi-matériau, alésage...



## ➤ Interaction délaminage-comportement en matage (2005)

- Analyse des mécanismes d'endommagement en matage
- Interaction délaminage dernier pli/matage



## Interaction défauts d'usinage / comportement des assemblages

### Perçage : délaminage en sortie

➤ **On sait le prévoir / le minimiser**

- ✓ Outil analytique / semi analytique
- ✓ On ne sait pas prévoir son étendu
  - ✓ Outil numérique permet de le faire...
  - ✓ Outil semi-analytique en cours ...

➤ **S'il existe**

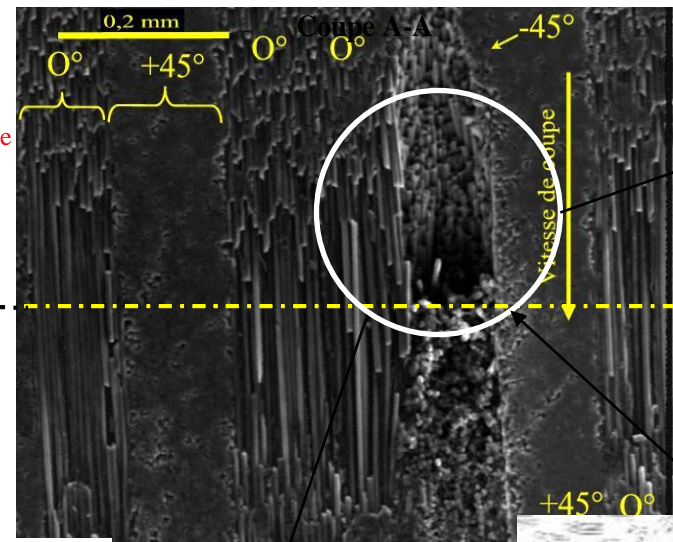
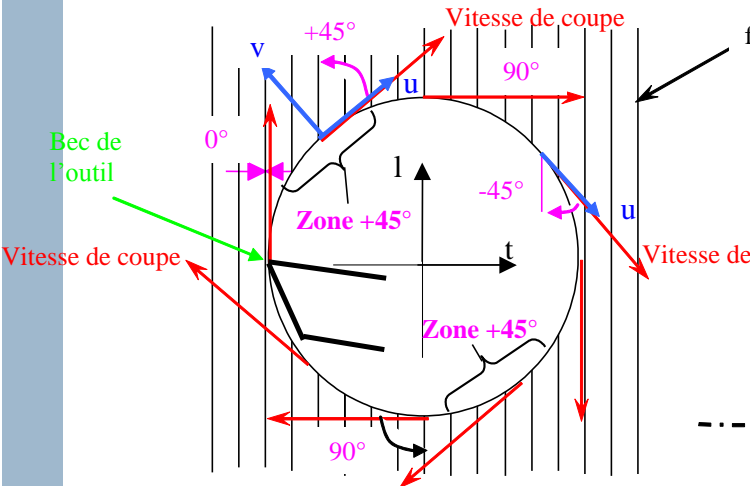
- ✓ Outil numérique d'interaction sur la tenue en matage prédictif
- ✓ Le serrage du boulon minimise son influence
- ✓ Critère du diamètre maxi de délaminage pas suffisant (Facteur de délam.)

# Conclusion-Synthèse

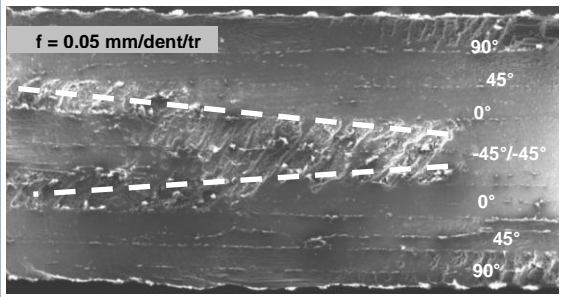
## Perçage : défauts de paroi

### Synergie perçage/coupe orthogonale

Critère d'acceptabilité Influence sur la tenue des assemblages

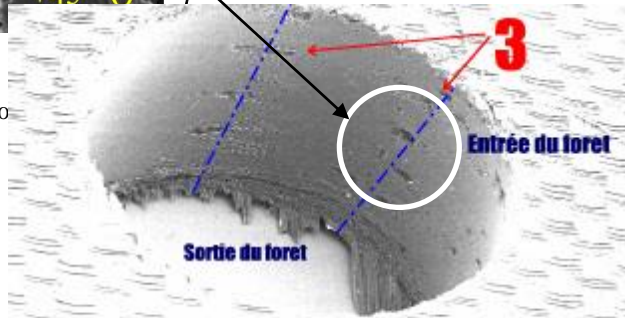
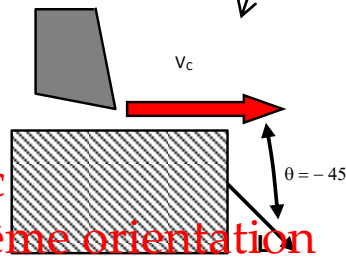


Coupe orthogonale à -45° [ZIT 2004]



QI

N° des plis : 8 9 10 11 12  
Projection de l'axe du perçage suivant la direction



Défaut de paroi lors du perçage [SUR 2005]

QI

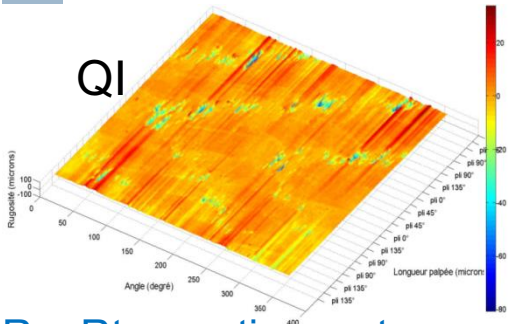
Défauts prépondérants : -45°/ à Vc  
Fonction du nombre de plis de même orientation



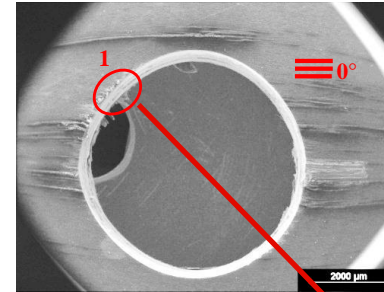
# Conclusion-Synthèse

## Perçage : défauts de paroi

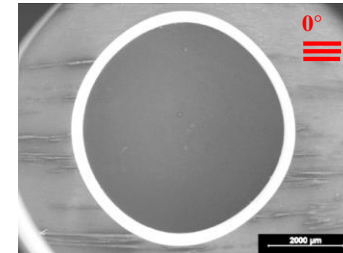
Outil de reconstruction 3D de la surface : recherche d'un critère d'admissibilité



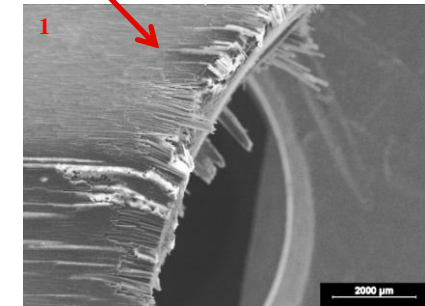
Défauts localisés



a. Mauvais état de surface



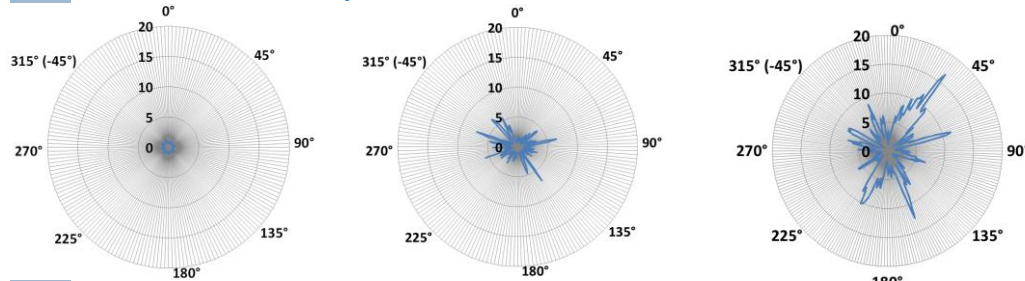
b. Bon état de surface



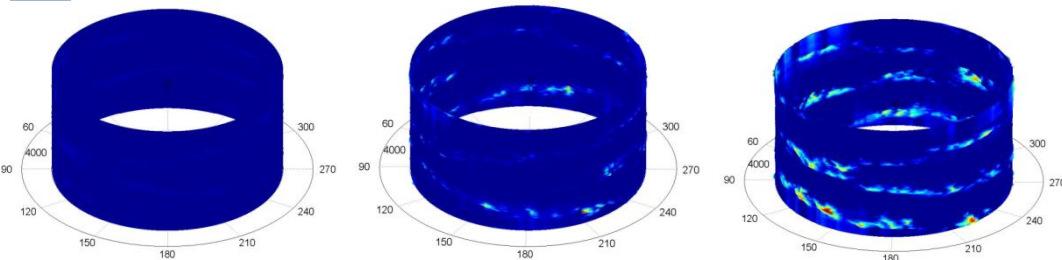
c. Zoom sur le défaut de perçage

Ra, Rt... ne tiennent pas compte de la physique des défauts

- Localisation
- Stratification/séquencement



Défauts croissants

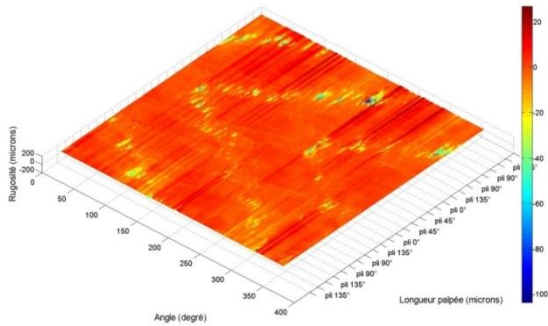


Criticité des défauts :

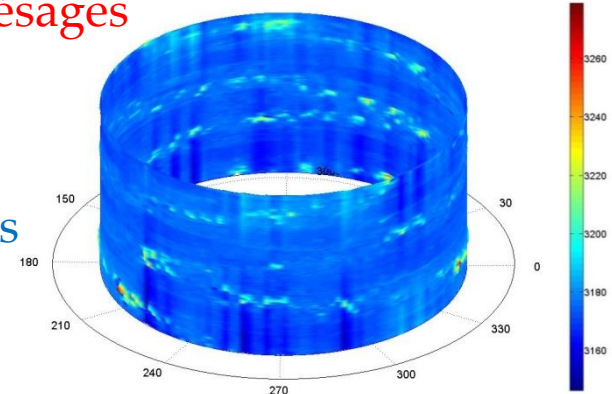
- Fonction de l'interaction boulon / composite
- Fonction des sollicitations (bi-axiales, statiques, fatigues)

# Interaction défauts d'usinage / comportement des assemblages

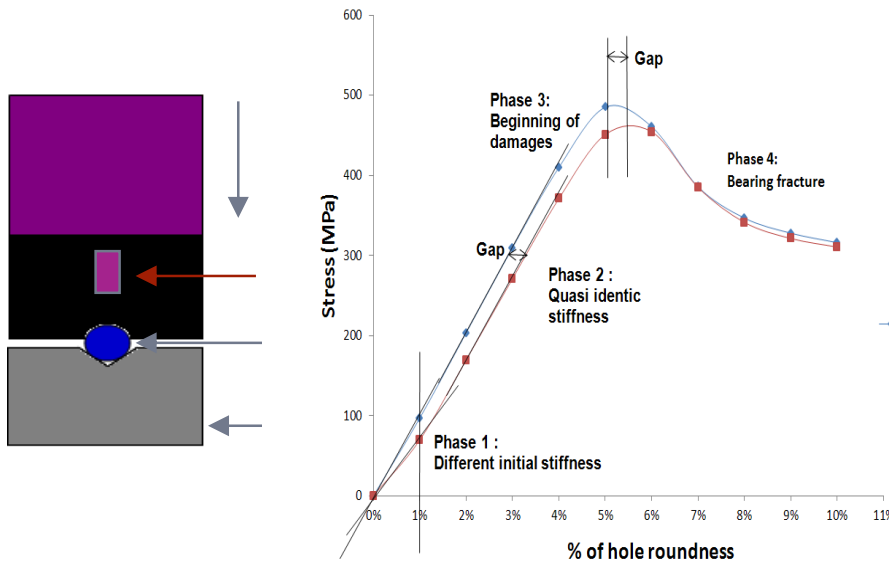
➤ **Caractère local des défauts : Critère de qualité des alésages**



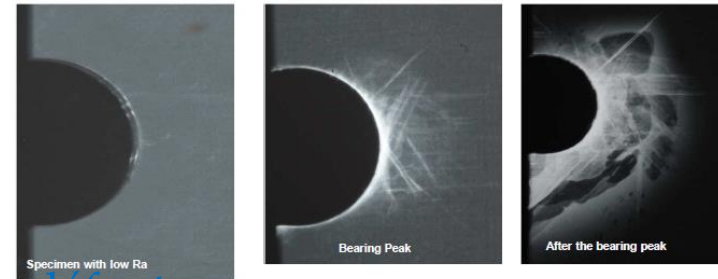
Reconstruction 3D  
de tous les paramètres  
de rugosité, et géométriques



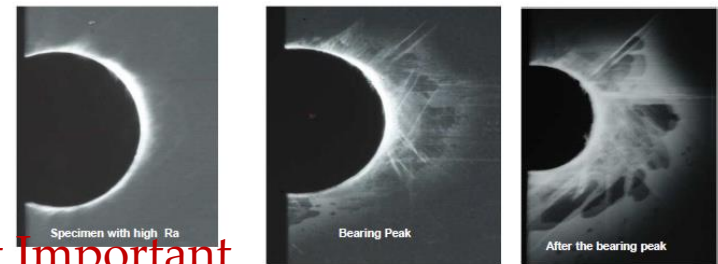
➤ **Couplage procédés-propriétés : influence des défauts de parois sur le matage**



Faible défaut



Low Ra High Ra



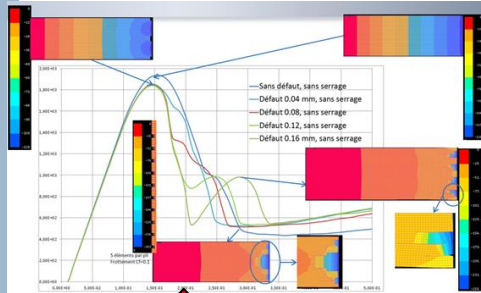
Défaut important

- Raideur modifiée
- Pic de matage modifié

- Recherche du critère le plus adapté (Confidentiel)

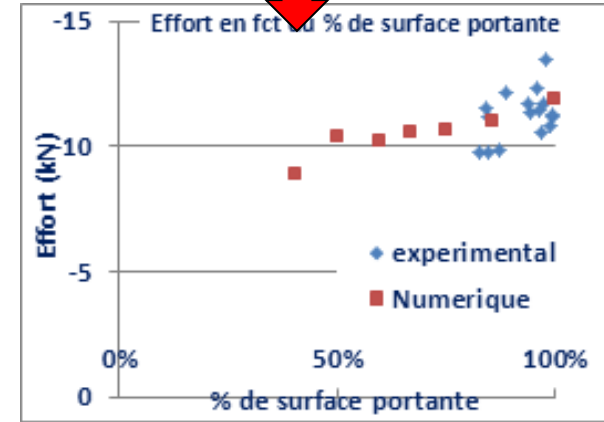
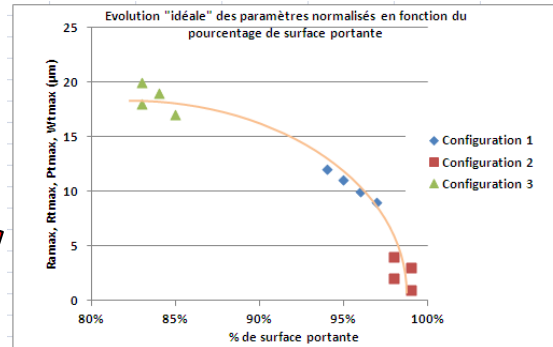
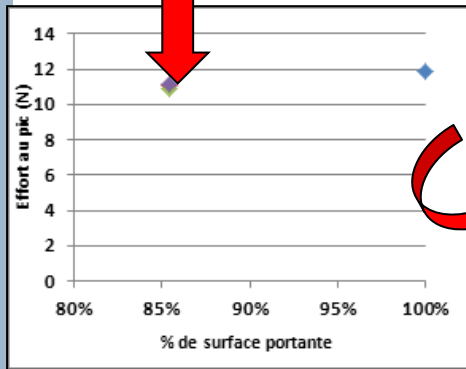
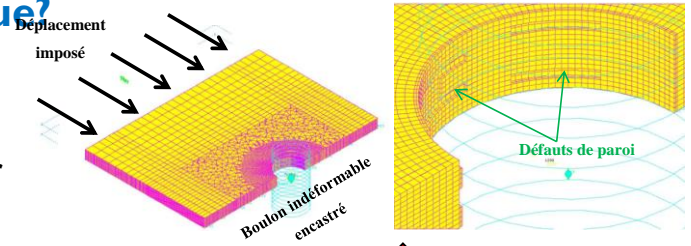
# Outil numérique de compréhension et de modélisation des mécanismes

## ► Méthode : Vers un critère de matage plus physique?



**Initiation :**  
Peu d'influence de la profondeur

**Propagation :**  
Influence de la profondeur



Critère qualité =  $g(\text{portance, profondeur})$

$\sigma_{\text{matage}} = f(\text{rupture fibres}) \cdot g(\text{portance, profondeur})$

Sans serrage

$$F^R = f(\sigma_{0^\circ}^R) \cdot g(Sp, Pt) \cdot \frac{\pi D_B}{2} (k_{0^\circ} e_{0^\circ} + \sqrt{2} k_{\pm\theta^\circ} e_{\pm\theta^\circ})$$

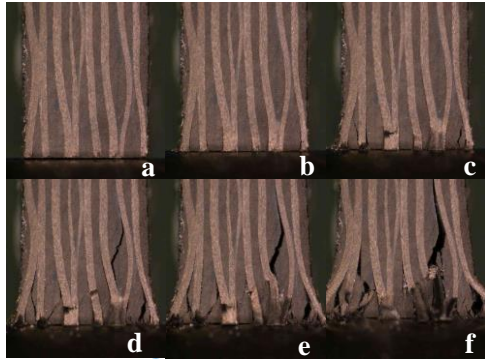
Avec serrage

$$F^R = f(\sigma_{0^\circ}^R) \cdot \frac{\pi D_T}{2} (k_{0^\circ} e_{0^\circ} + \sqrt{2} k_{\pm\theta^\circ} e_{\pm\theta^\circ})$$

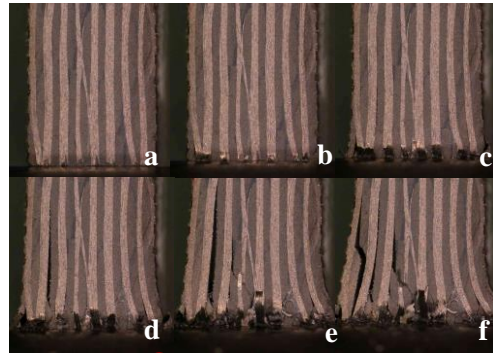


# Composites tissés : spécificités du comportement

## ➤ Comportement en matage / écrasement



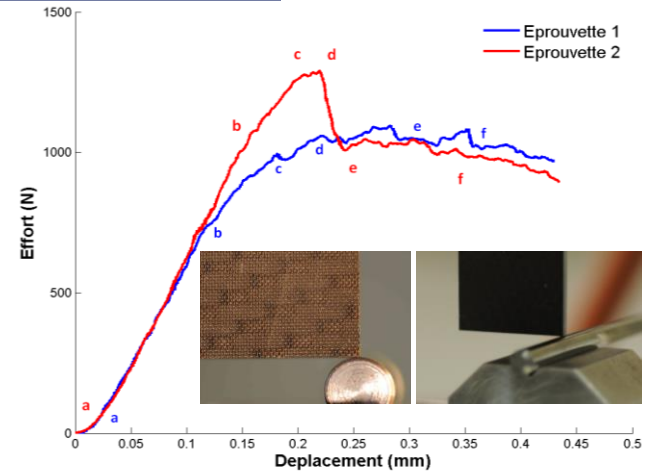
Ep 1 : Ondulation forte



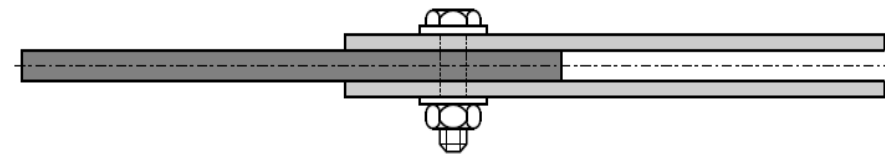
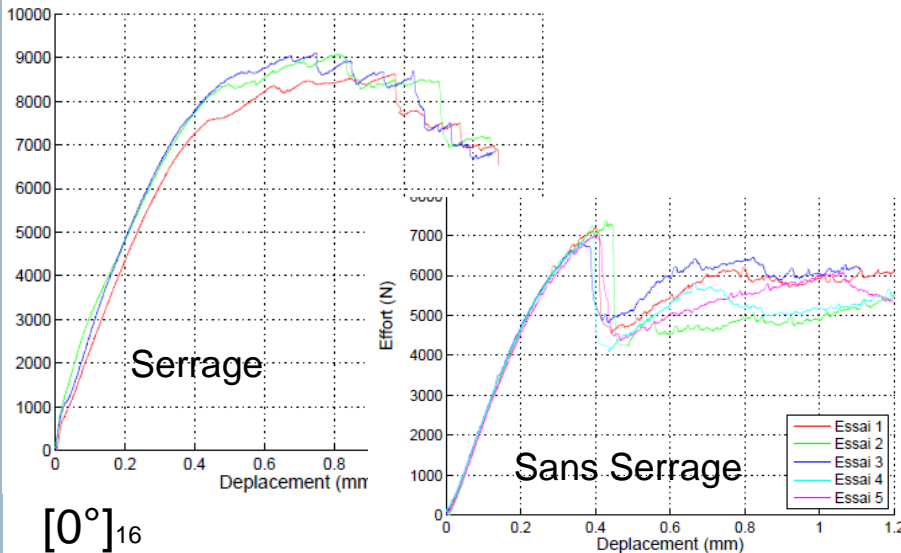
Ep 2 : Ondulation faible



Importance de l'embuvage, du rapport d'armure, du décochement



## ➤ Comportement d'un assemblage à double recouvrement



### ➤ Objectifs :

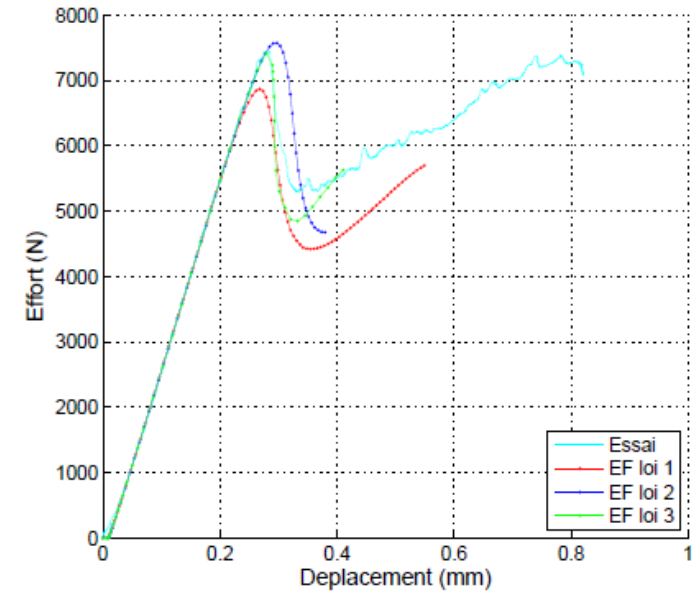
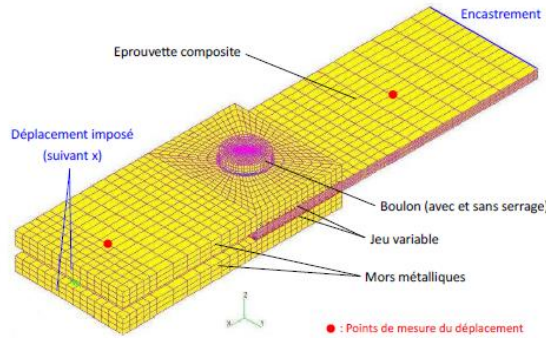
- Identification des lois de comportement à l'échelle micro-méso
- Flambement / matage local
- Développement de modèles 1D et 3D

[0°]<sub>16</sub>

# Composites tissés : modèle

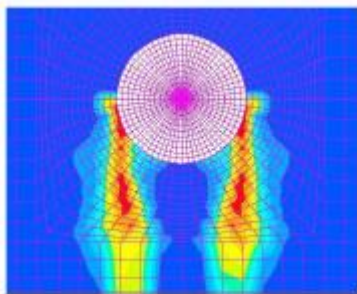
## ➤ Modélisation à l'échelle du pli

- Modèle élasto...

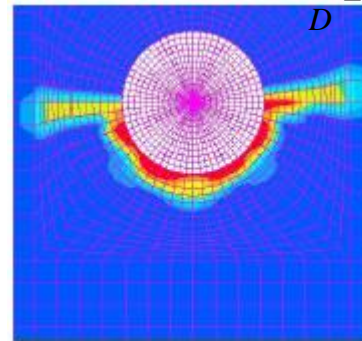


$$\frac{W}{D} = 5; \frac{E}{D} = 1.5$$

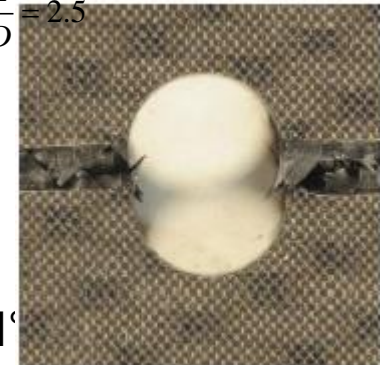
$$[0^\circ]_{16}$$



$$\frac{W}{D} = 2.5; \frac{E}{D} = 2.5$$

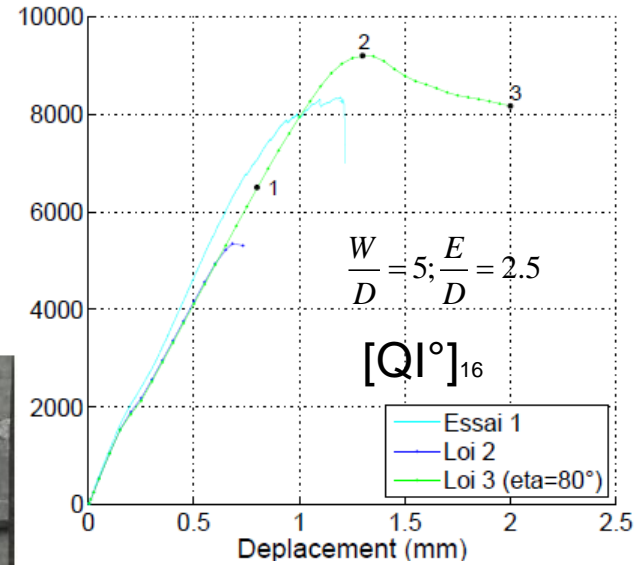
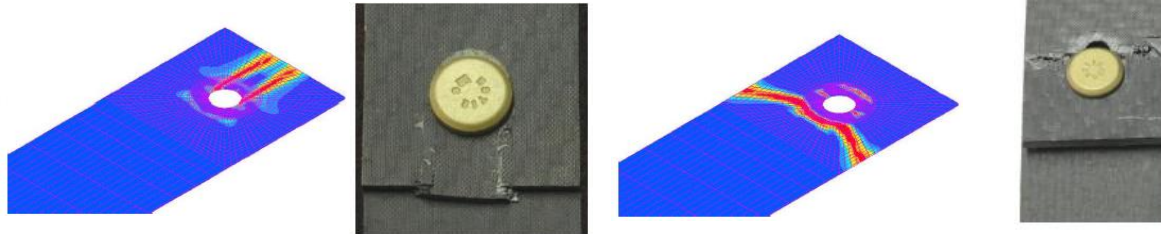
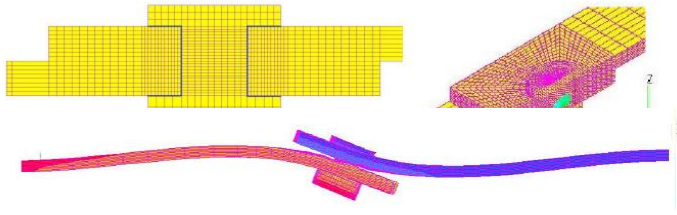


$$[QI^\circ]$$

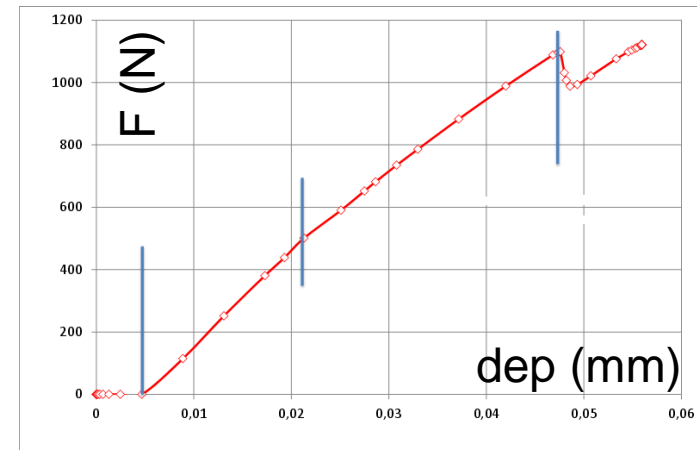
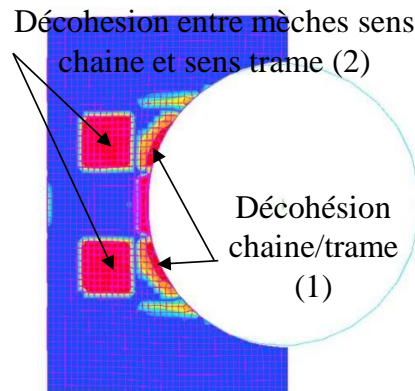
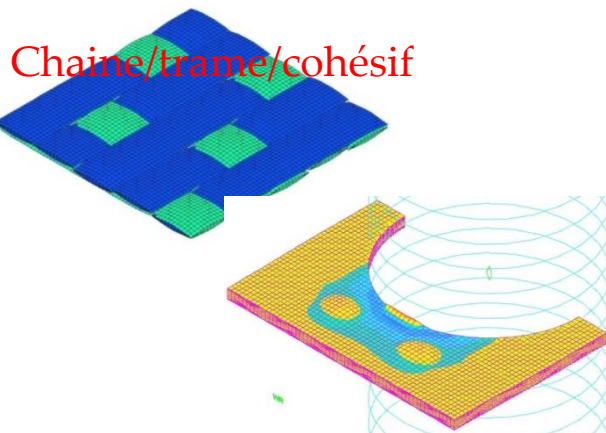


# Composites tissés : modèle

➤ Modélisation à l'échelle du pli

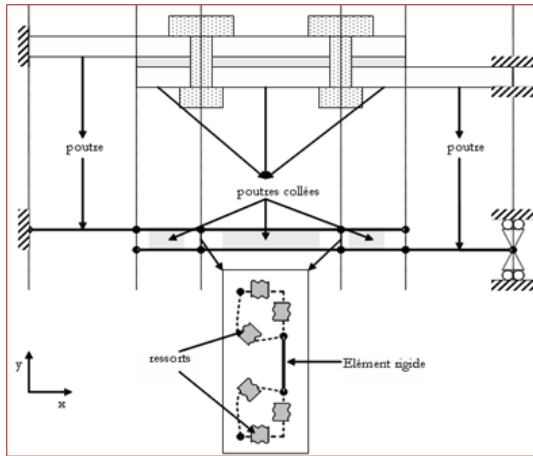


➤ Modélisation à l'échelle des mèches : EF 1D et 3D  
➤ Calcul global/local

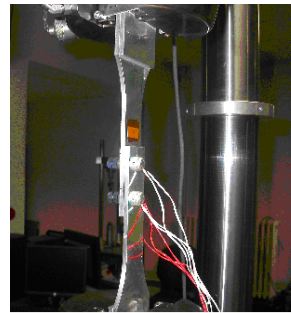


# Assemblages boulonnés-collés

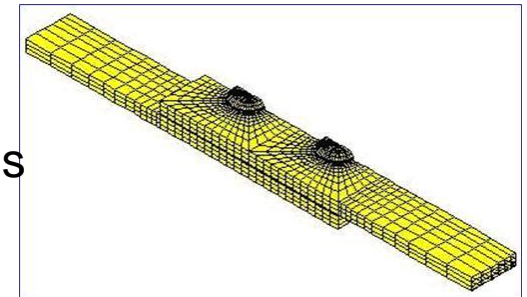
## ➤ Approche semi-analytique (Analytique + EF)



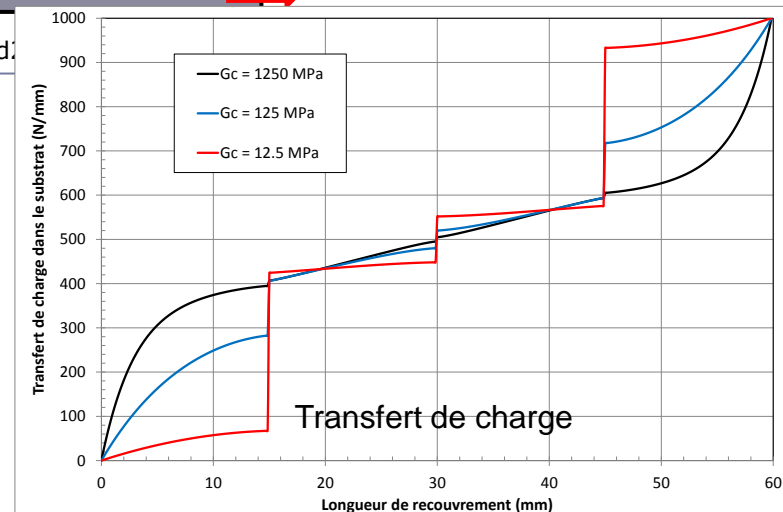
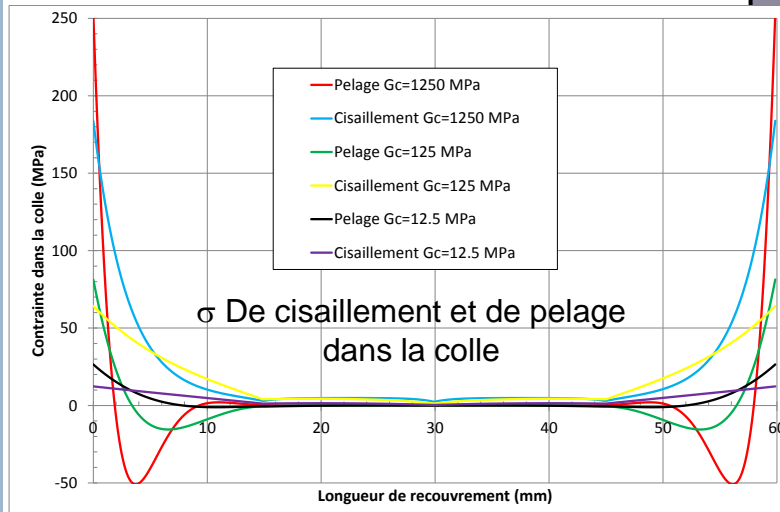
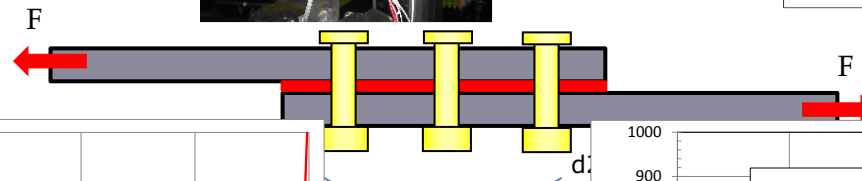
- ✓ Colle : éléments finis de poutres collées (Equil. Local)
- ✓ Boulon : éléments rigides + 3 raideurs
- ✓ Applications : Métallique, Composite, Mixte



Validation  
Essais-calculs



## ➤ Exemple :



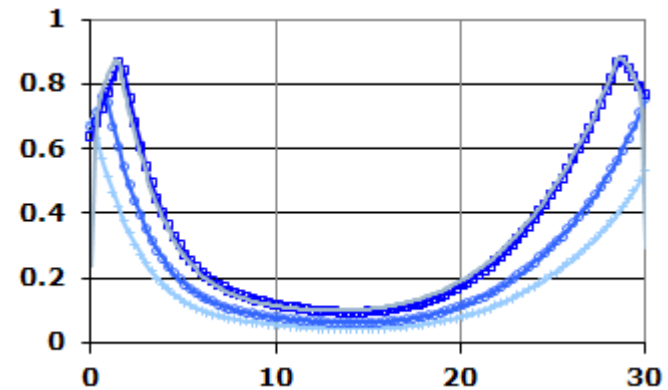
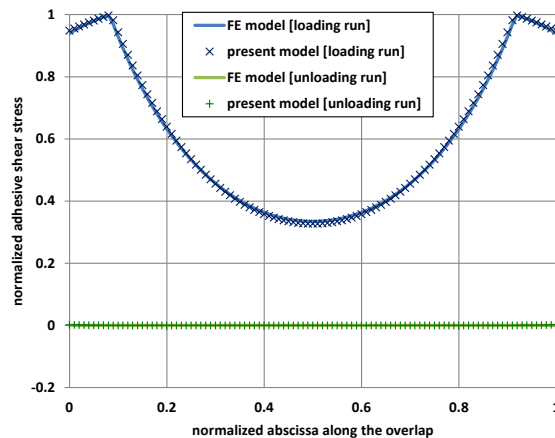
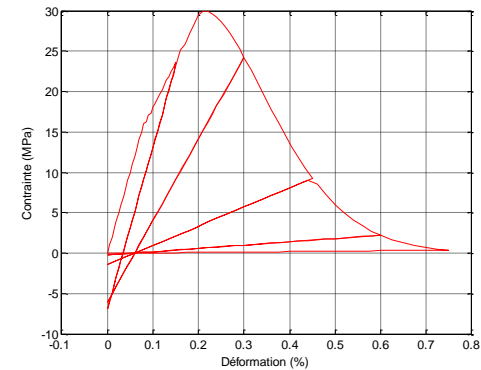
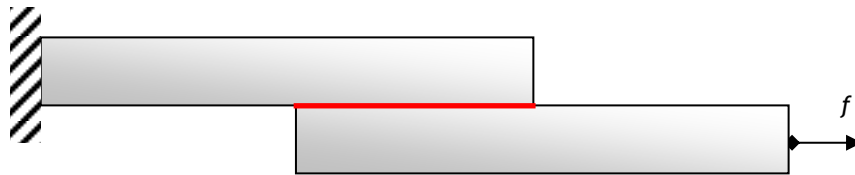


# Assemblages boulonnés-collés : développement en cours

## ➤ Collage : modèle à macro-éléments

- ✓ Loi de comportement élasto-visco-plastique adoucissant
- ✓ Tolérance aux dommages : prise en compte de la criticité de zones non collées
- ✓ Application : SHM
- ✓ Application Fatigue, Vieillessement

## Exemple



Endommagement/Rupture

Elastoplasticité

## Conclusion-Synthèse

- ▶ **Mécanismes d'endommagement par matage identifiés et modélisés**
  - **Loi d'endommagement/rupture indispensable**
  - **Couplage inter-intra laminaire / rupture sens fibres**
  - **Prise en compte du serrage dans les mécanismes**
  
- ▶ **Critère d'admissibilité / qualité des parois**
  - **Critères couplés : abaques numériques**
  - **Moyen de mesure industriel?**
  
- ▶ **Application aux composites tissés en cours**

## Perspectives

### ▶ **Comportement**

- **Loi de comportement en dynamique dans les tissus**
- **Couplage inter-intra laminaire / rupture sens fibres**
- **Prise en compte du serrage dans les mécanismes**

### ▶ **Critère d'admissibilité / qualité des parois**

- **Critères couplés : abaques numériques**
- **Moyen de mesure industriel?**

### ▶ **Application aux composites tissés en cours**