

[Soutenance de thèse, 26 mars 2010]



Vers un matériau virtuel pour les composites céramiques

Martin Genet

LMT-Cachan (ENS-Cachan / CNRS / Université Paris VI / PRES Universud Paris)



Snecma Propulsion Solide
Groupe SAFRAN

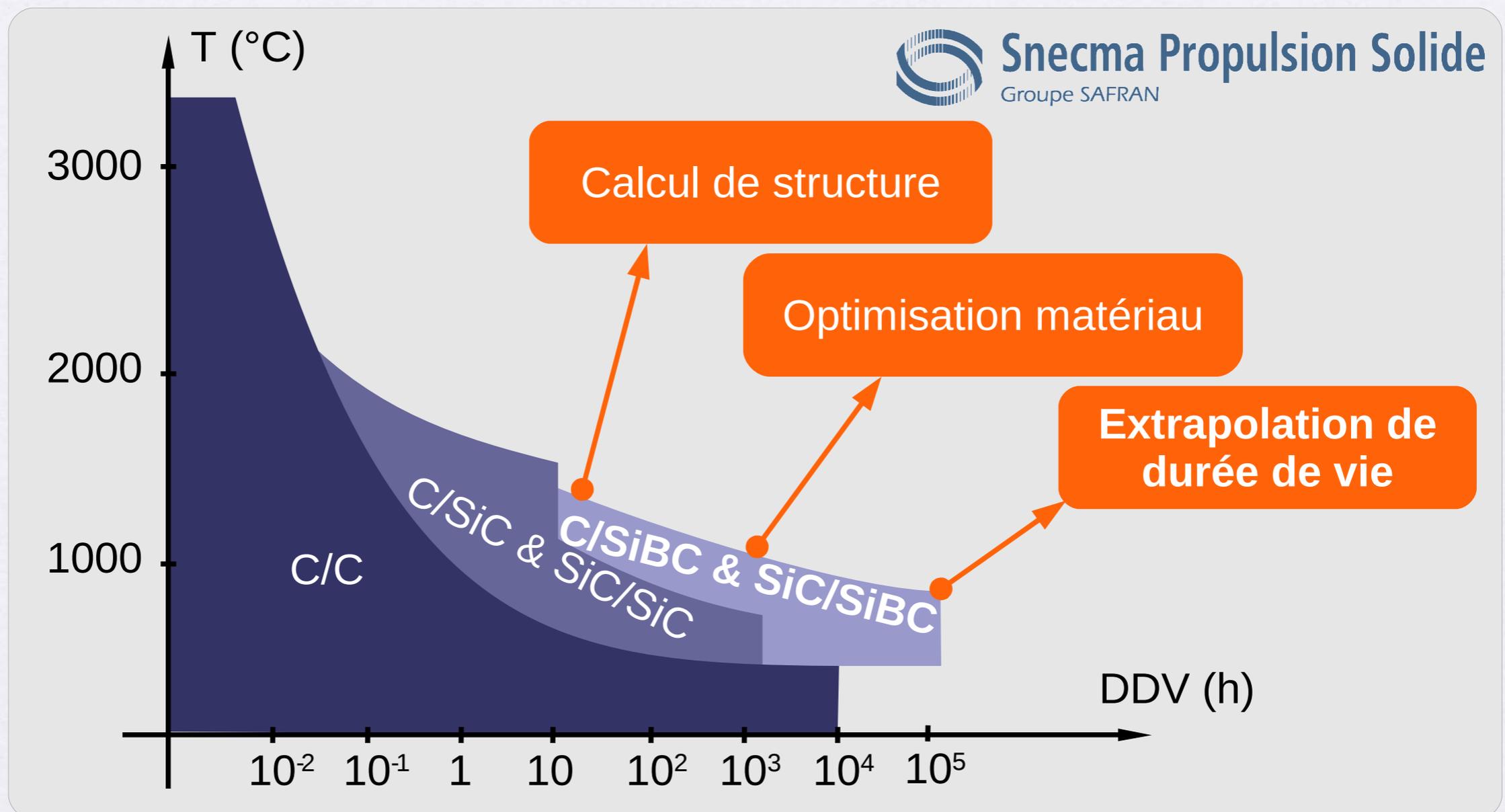




Contexte

Problématique industrielle

- Certification de pièces pour applications aéronautiques civiles
 - DDV = 10 ans: **essais classiques trop coûteux**
 - Couplage mécanique/chimie: **essais accélérés non définis**
 - **Modélisation nécessaire**



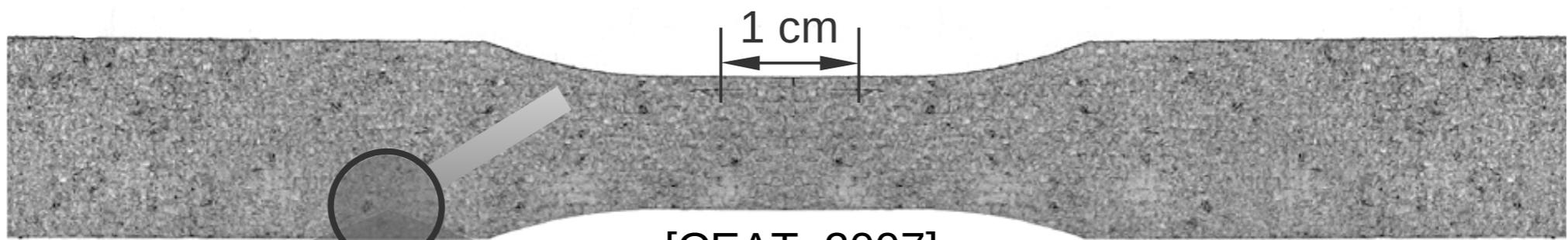
Le matériau « réel »

Morphologie

● Procédé

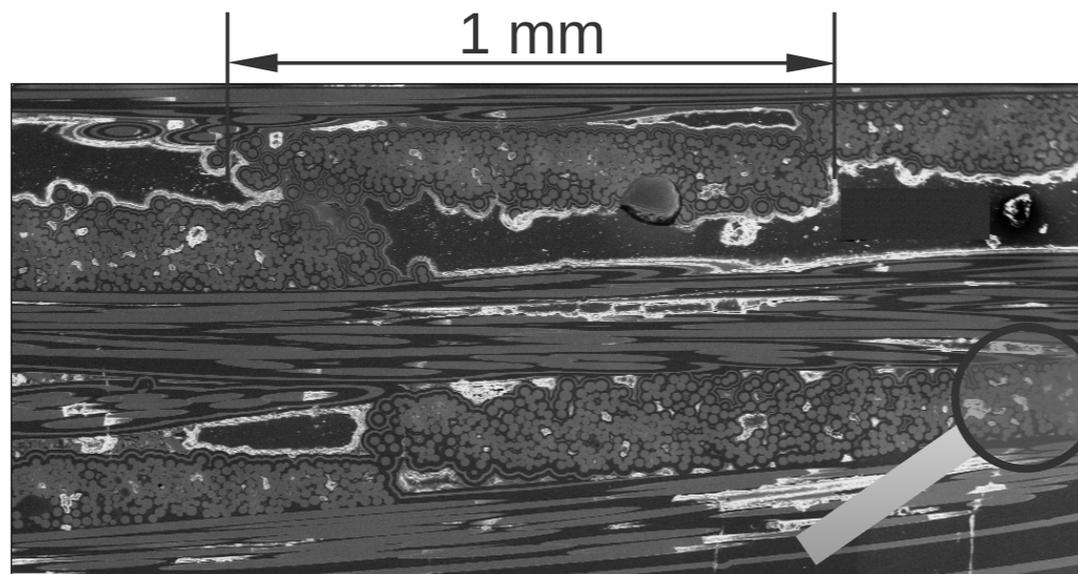
- Préforme fibreuse: **tissu 3D** de mèches de fibres [SiC]
- Densification: **interphase [C]** puis **matrice [Si-B-C]** multi-séquencée

Échelle composite



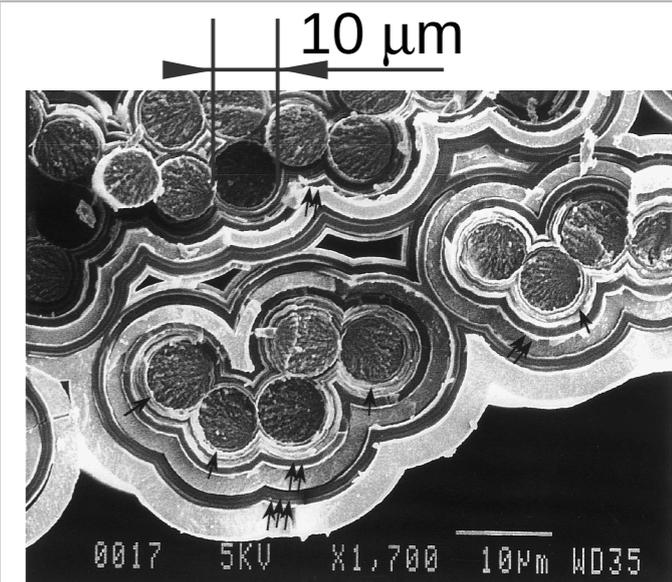
[CEAT, 2007]

Échelle fil



[Penas, 2003]

Échelle fibre



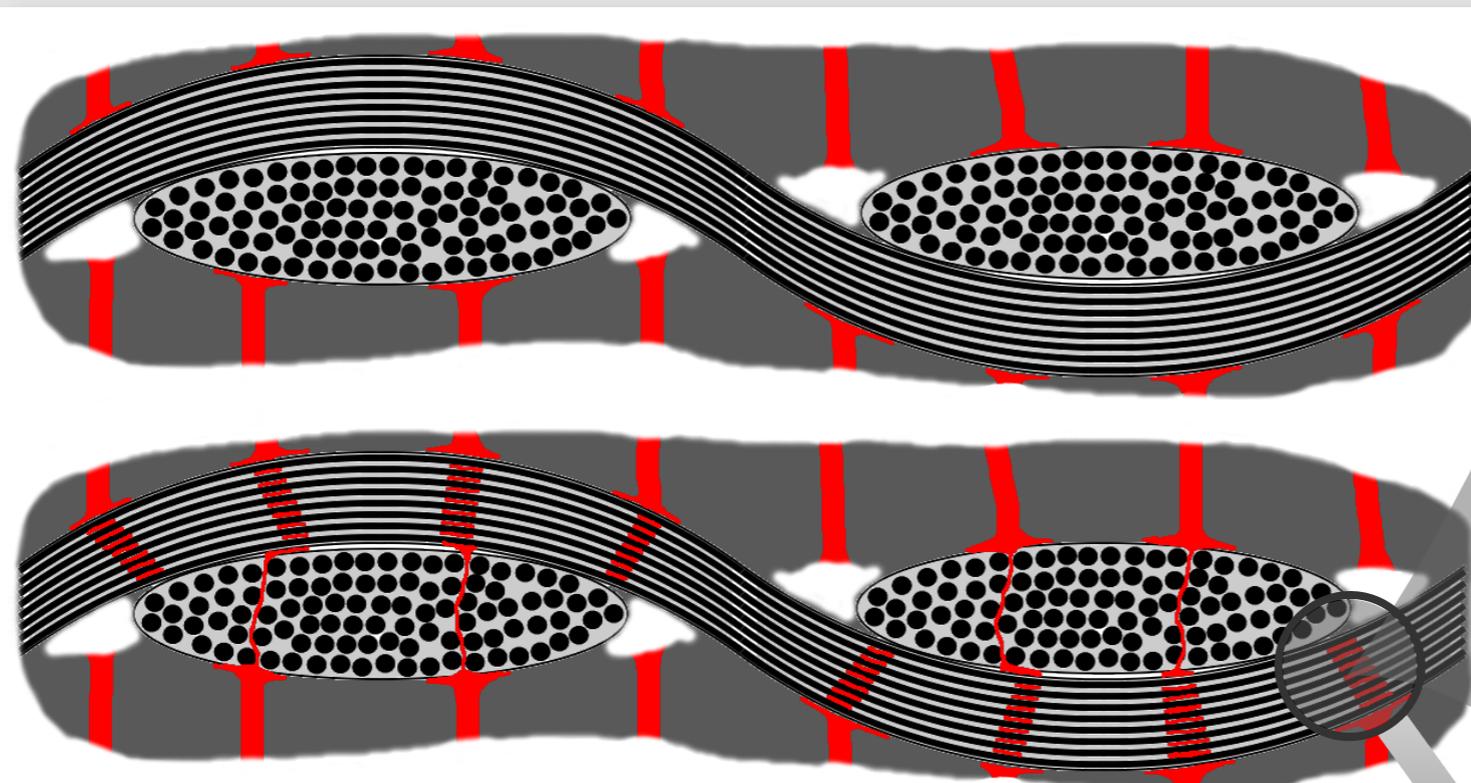
[Lamouroux, 1999]

Le matériau « réel »

Phénoménologie

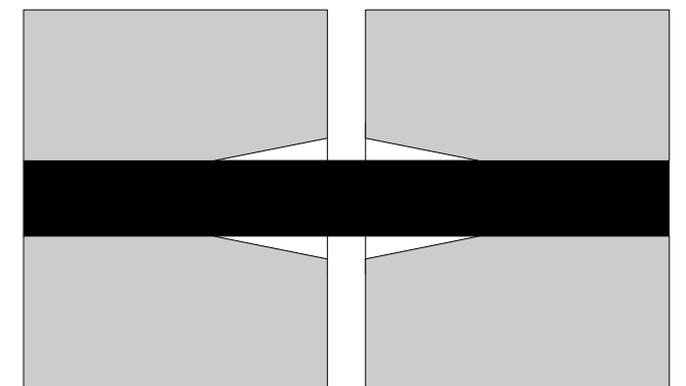
- **Comportement mécanique** (chargements statiques; $T < 1000^{\circ}\text{C}$)
 - Fissuration **inter-fil** et décohésion **fil-matrice**
 - Fissuration **intra-fil longitudinale** et décohésion **fil-matrice**
 - Fissuration **intra-fil transverse** et décohésion **fibre-matrice**
 - Rupture **fibre**

Échelle fil



[Guillaumat et Lamon, 1993]
[Ladevèze, Gasser et Allix, 1994]

Échelle fibre



[ACK, 1971]
[Carrère *et al.*, 2000]

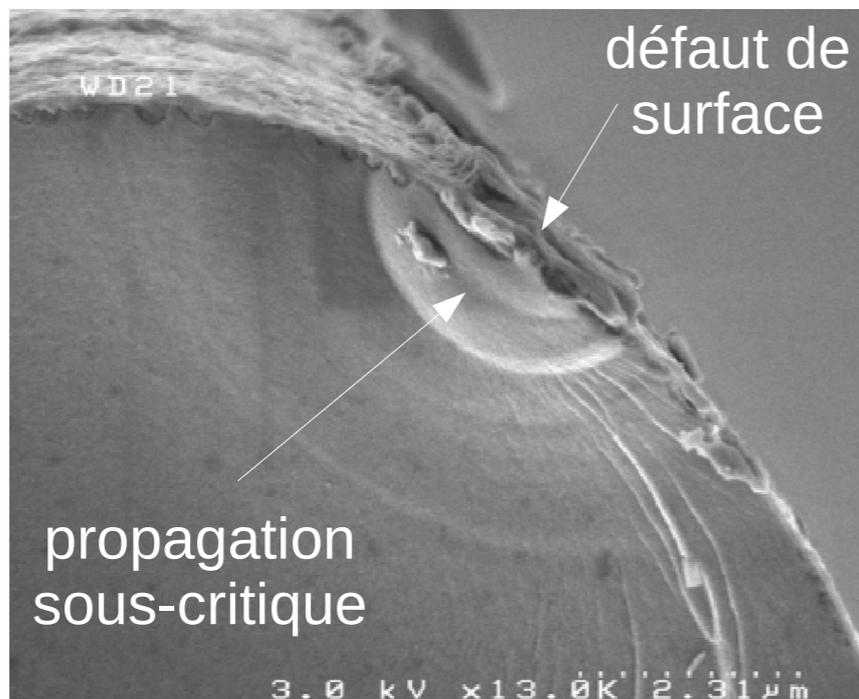
fragile \Rightarrow ductile

Le matériau « réel »

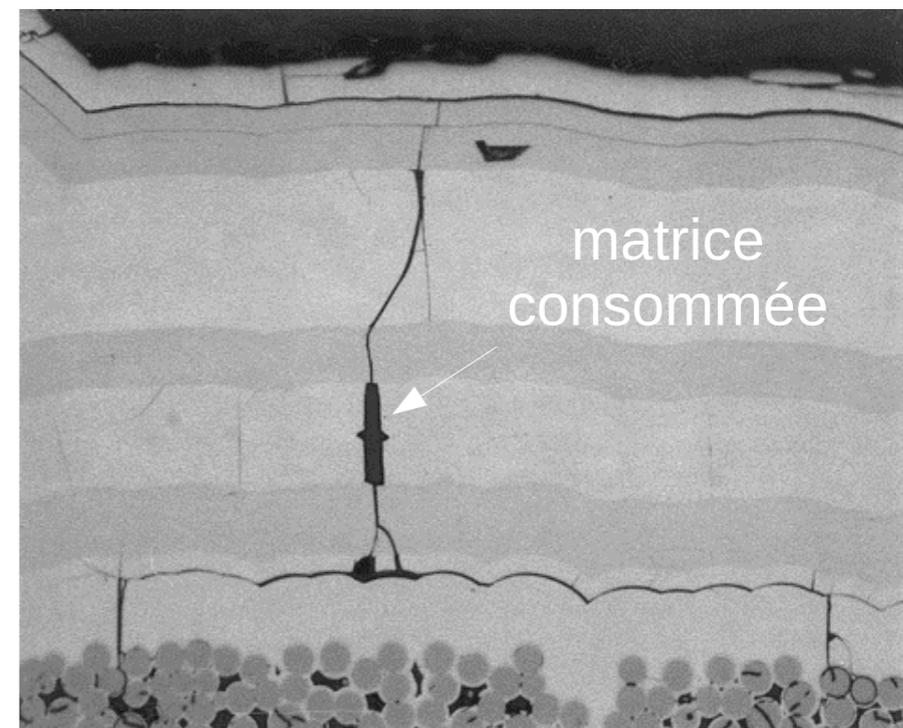
Phénoménologie

- **Durée de vie** (chargements statiques; $T < 1000^{\circ}\text{C}$; air sec)
 - Diffusion d'**oxygène** dans les réseaux de **fissures**
 - **Oxydation des fibres: ruptures sous-critiques**
 - **Oxydation des couches [B] de la matrice: cicatrisation**

Échelle fibre



[Gauthier et Lamon, 2007]
[Laforêt et Lamon, 2009]



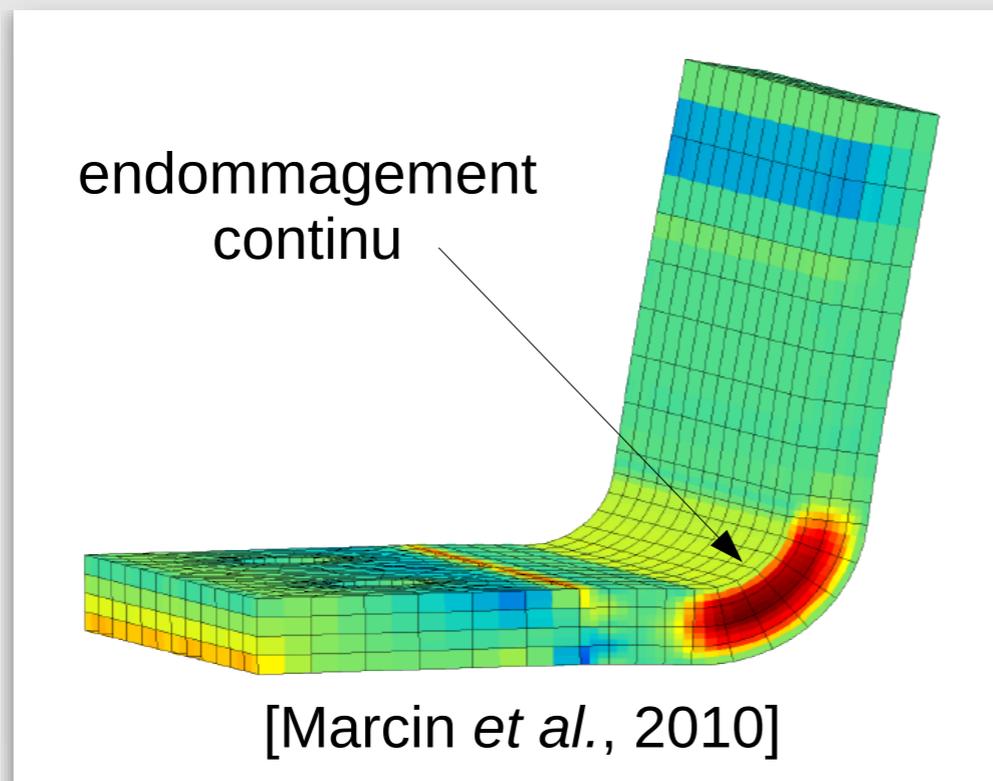
[SPS]

Grande DDV

Problématique scientifique

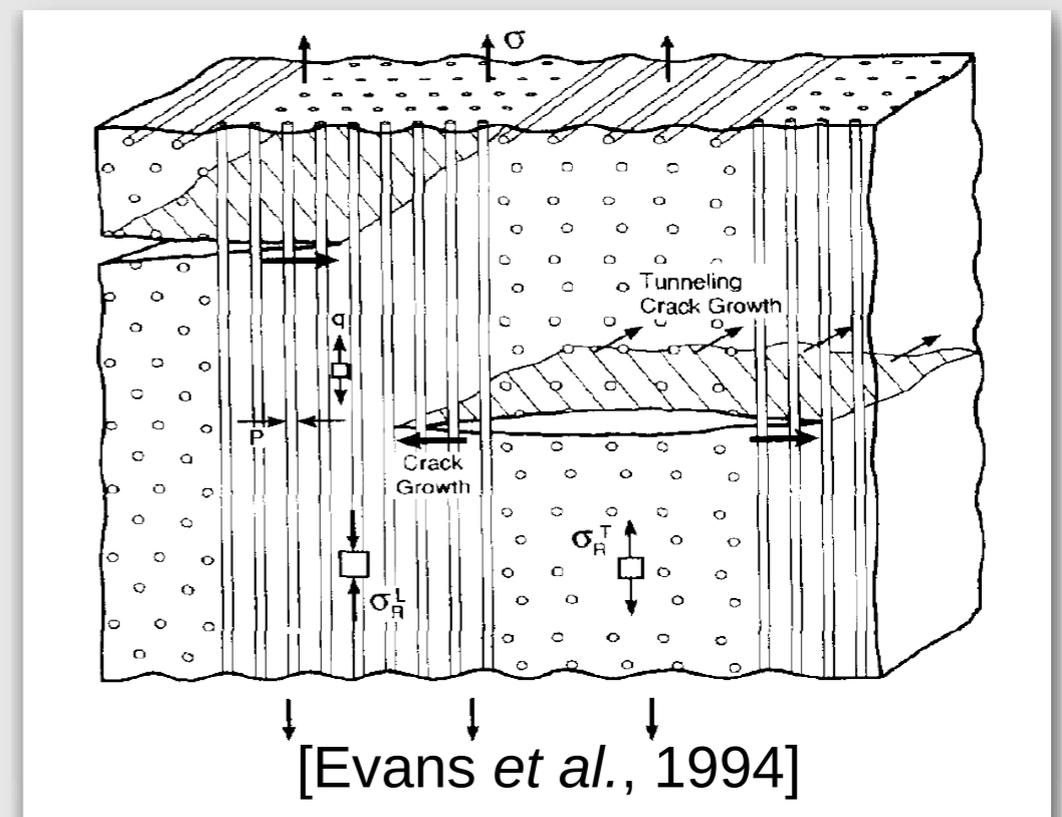
- Modélisation et simulation du comportement mécanique et de la durée de vie de matériaux composites
- Comportement mécanique
 - Jusqu'à aujourd'hui: deux approches, deux communautés

Macromécanique



- ☺ Utilisable en calcul de structure
- ☹ Pas générique

Micromécanique



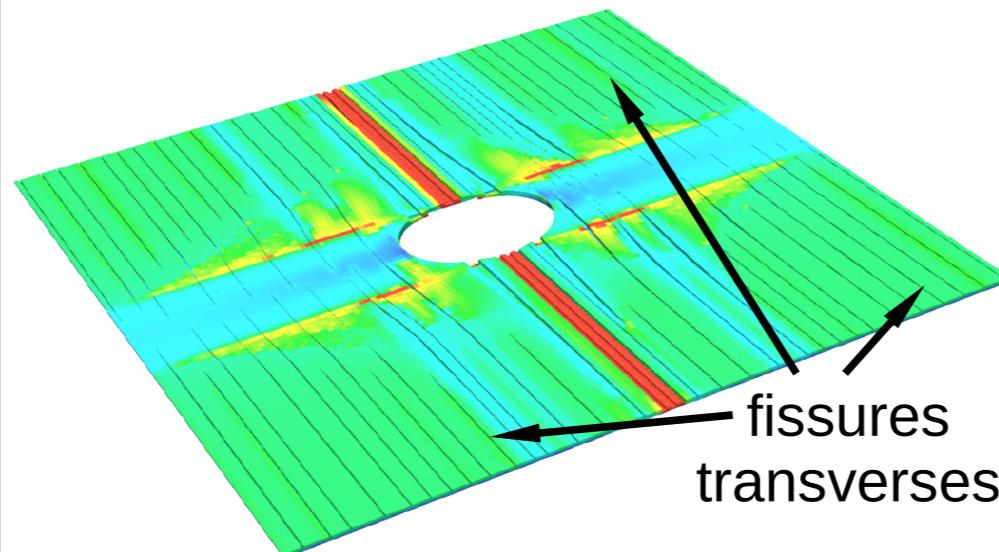
- ☺ Générique
- ☹ Pas utilisable en calcul de structure

Problématique scientifique

- Modélisation et simulation du comportement mécanique et de la durée de vie de matériaux composites
- Comportement mécanique
 - Jusqu'à aujourd'hui: deux approches, deux communautés
 - Aujourd'hui: approche multi-échelle

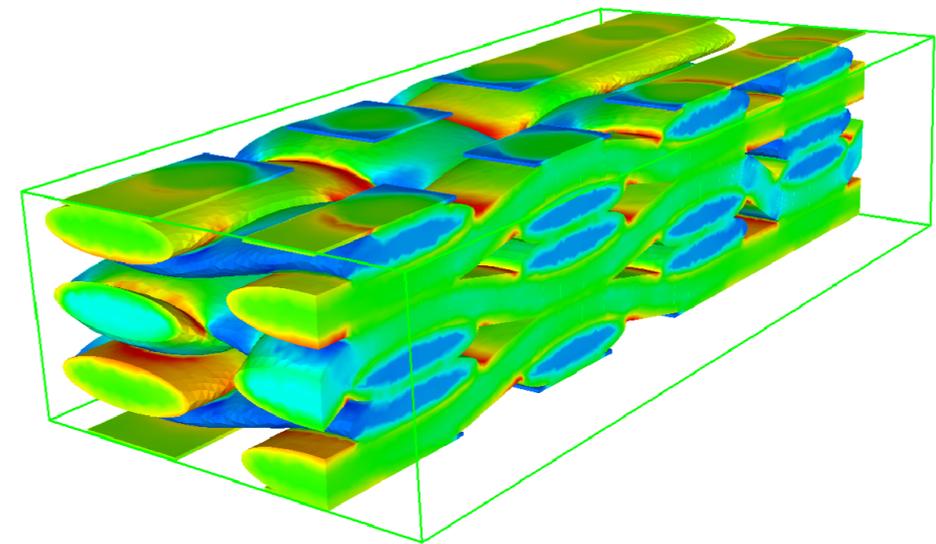
Matériau virtuel

CMOs stratifiés



[Trovalet *et al.*, 2010]

CMOs/CMCs tissés



[Couégnat *et al.*, 2008]

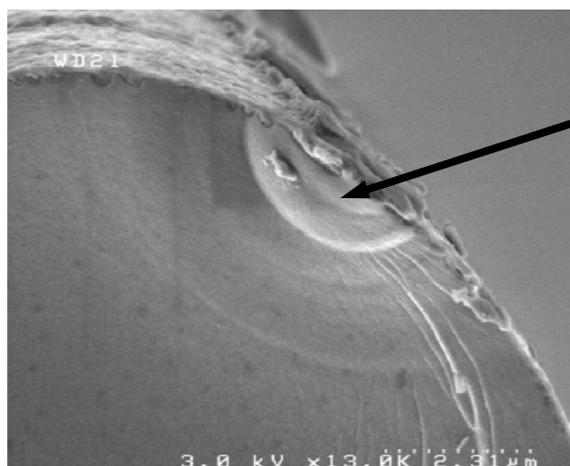
☺ Générique

☺ Utilisable en calcul de structure

Problématique scientifique

- **Modélisation et simulation du comportement mécanique et de la durée de vie de matériaux composites**
- **Comportement mécanique**
 - Jusqu'à aujourd'hui: deux **approches**, deux **communautés**
 - Aujourd'hui: **approche multi-échelle**
- **Durée de vie** (fatigue statique des CMCs)
 - Jusqu'à aujourd'hui: **micromécanique** de **sous-systèmes**

Fibres et mèches de fibres



propagation
sous-critique
d'un défaut de
surface

[Gauthier *et al.*, 2007] [Laforêt *et al.*, 2009]

Fissures modèles



cicatrisation
d'une fissure
à ouverture
contrôlée

[Garitte *et al.*, 2007]

😊 **Générique, extrapolant**

☹ **Quid du système-composite?**

Problématique scientifique

- **Modélisation et simulation du comportement mécanique et de la durée de vie de matériaux composites**
- **Comportement mécanique**
 - Jusqu'à aujourd'hui: deux **approches**, deux **communautés**
 - Aujourd'hui: **approche multi-échelle**
- **Durée de vie** (fatigue statique des CMCs)
 - Jusqu'à aujourd'hui: **micromécanique** de **sous-systèmes**
 - Aujourd'hui: intégration dans le **matériau virtuel**

😊 *Générique, extrapolant*

😊 *Couplage fort avec le comportement mécanique*

Problématique scientifique

- **Modélisation et simulation du comportement mécanique et de la durée de vie de matériaux composites**
- **Comportement mécanique**
 - Jusqu'à aujourd'hui: deux **approches**, deux **communautés**
 - Aujourd'hui: **approche multi-échelle**
- **Durée de vie** (fatigue statique des CMCs)
 - Jusqu'à aujourd'hui: **micromécanique** de **sous-systèmes**
 - Aujourd'hui: intégration dans le **matériau virtuel**

Objectif général

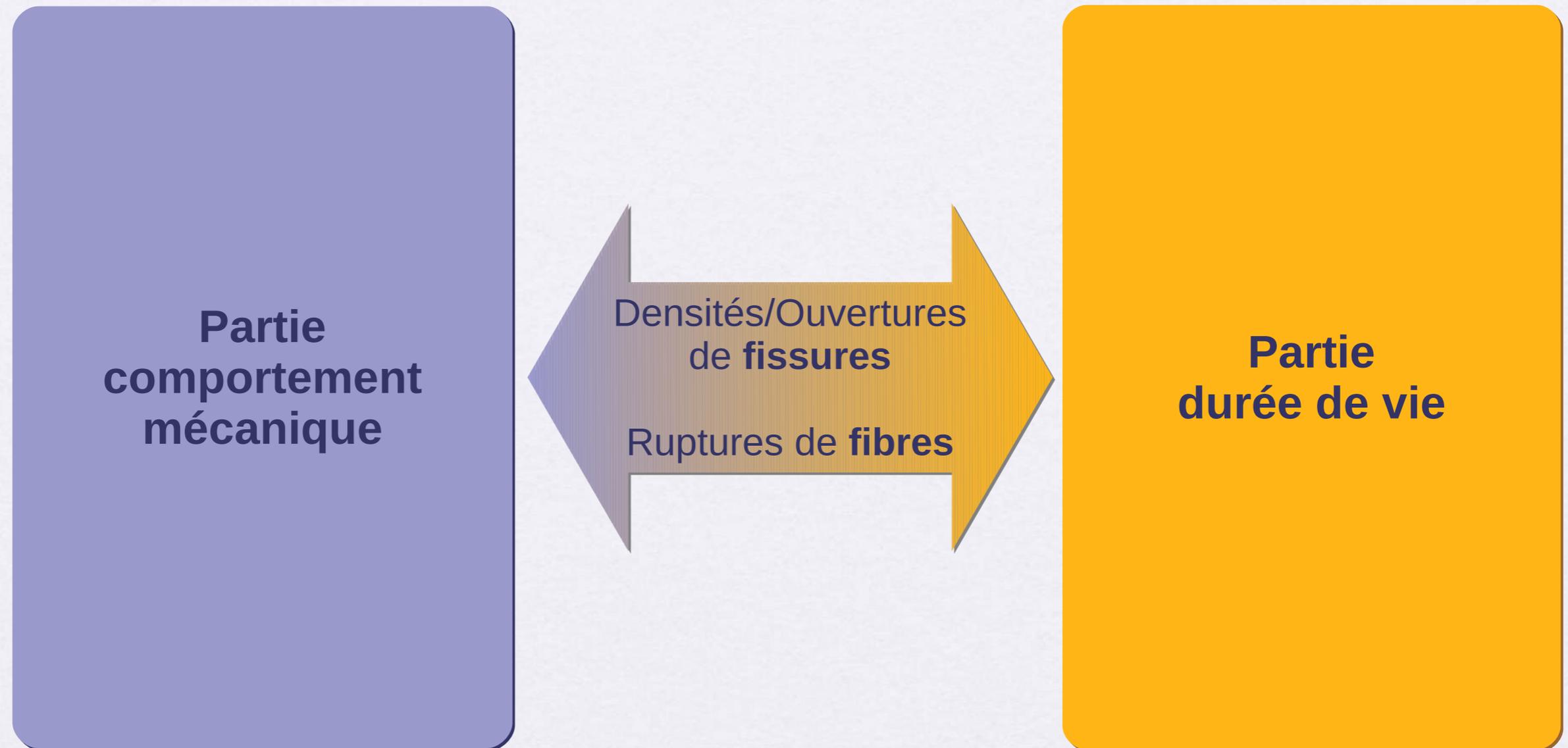
Un **matériau virtuel** pour les **composites tissés à matrice céramique auto-cicatrisante**: **comportement mécanique et durée de vie**



Vers un « matériau virtuel »

Vers un matériau virtuel

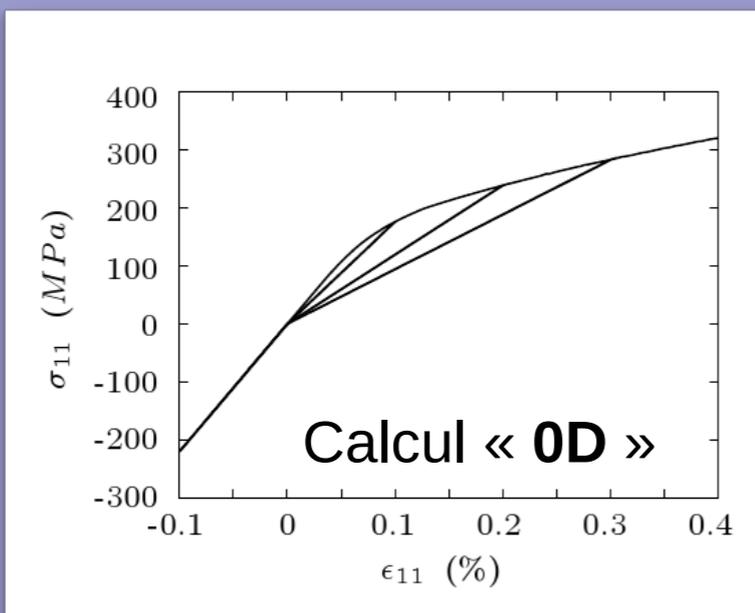
- **Architecture générale** [Ladevèze, Letombe et Cluzel, 2000]



Vers un matériau virtuel

- Condition initiale [Letombe, 2005]

Échelle composite

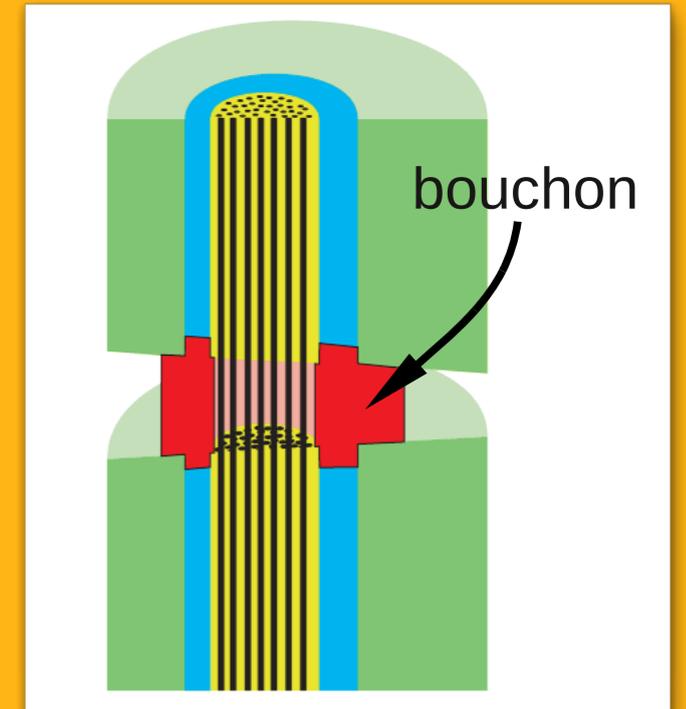


fissures
+ ruptures fibres

Densité / Ouverture
des fissures
(indicateur « macro »)

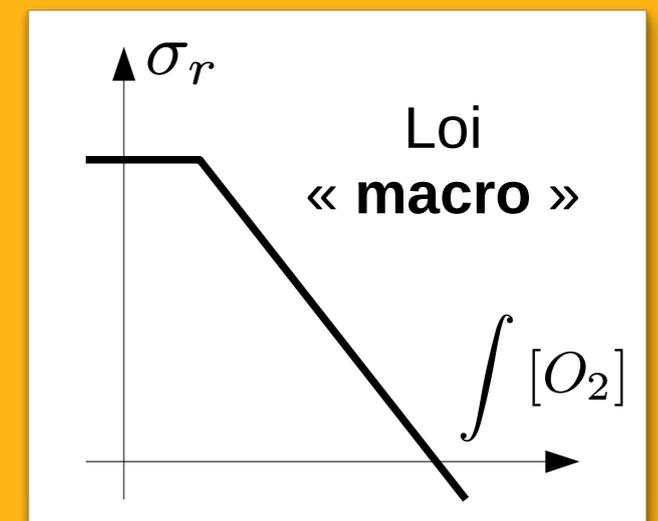
Ruptures fibres

Échelle fibre



cicatrisation matricielle

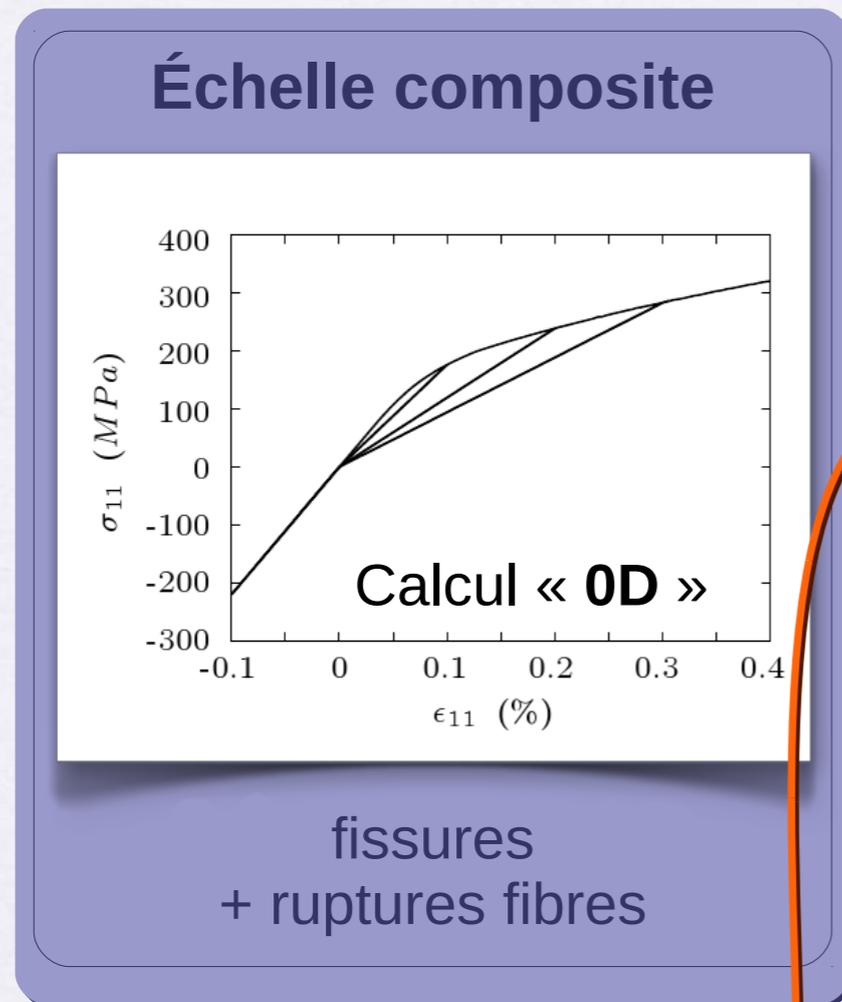
Échelle fibre



rupture sous-critique

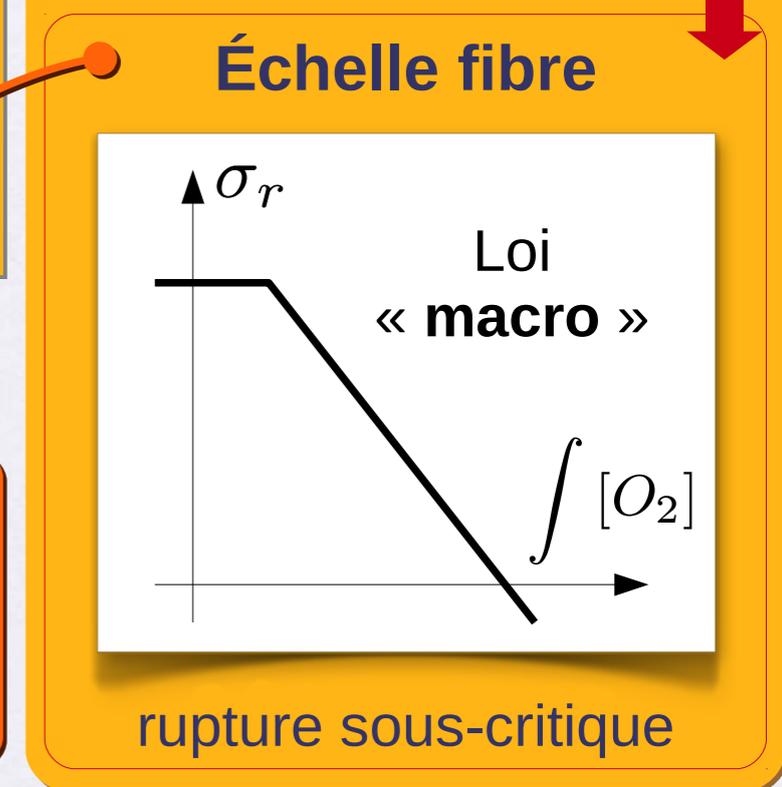
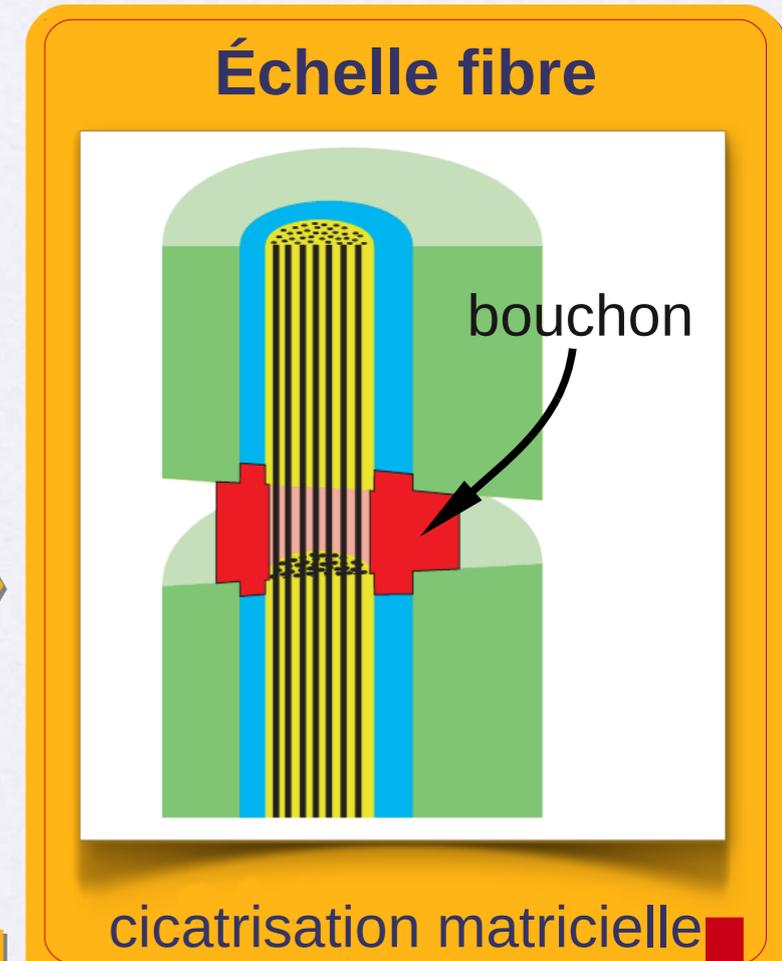
Vers un matériau virtuel

- Condition initiale [Letombe, 2005]



Densité / Ouverture
des fissures
(indicateur « macro »)

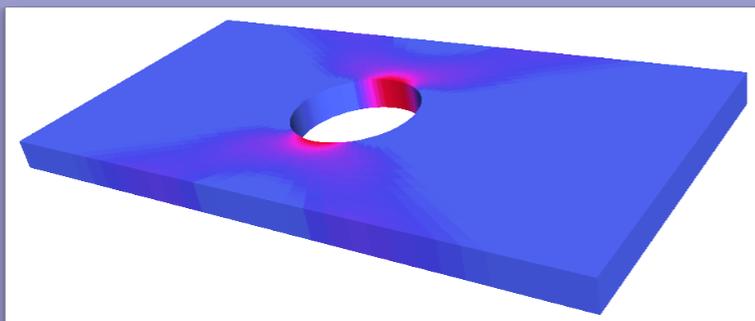
Ruptures fibres



- Objectifs principaux**
- 1) Description « micro » des fissures
 - 2) Modèle « micro » pour les fibres

Vers un matériau virtuel

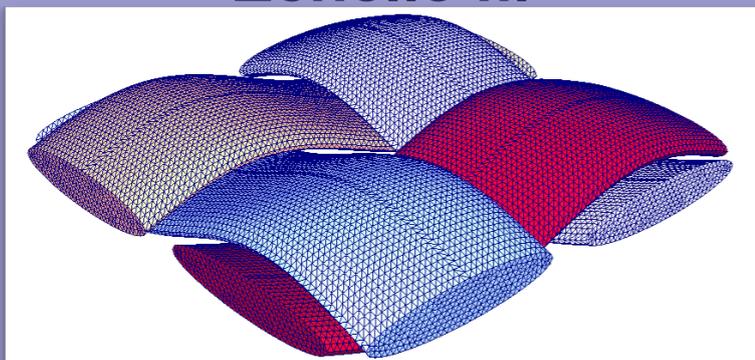
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres



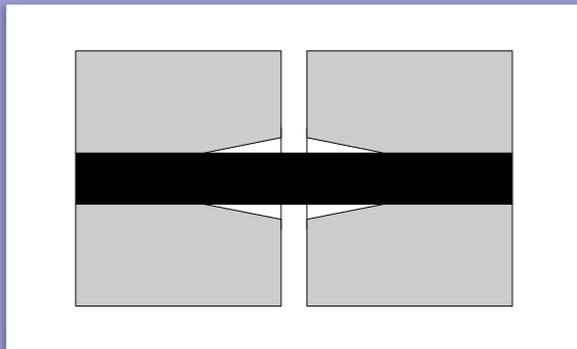
Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres



Échelle fibre



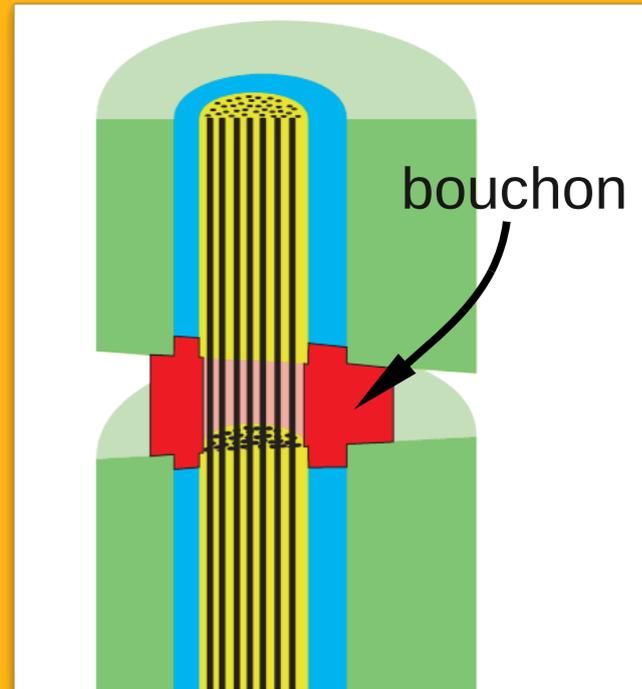
fissures intra trans
+ ruptures fibres

Densité / Ouverture
des fissures

Contraintes fibres

Ruptures fibres

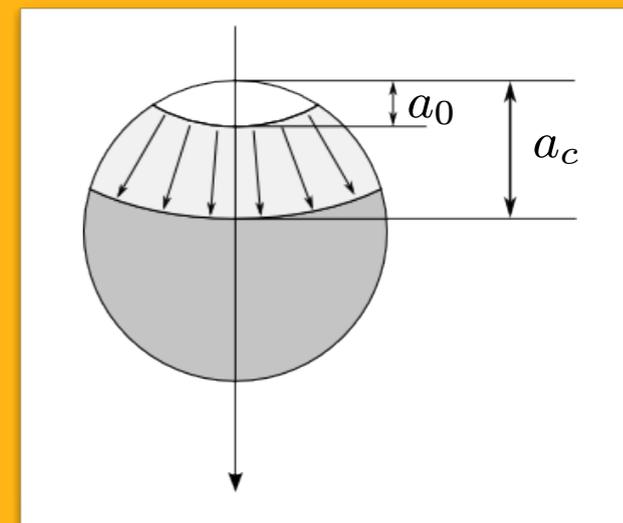
Échelle fibre



bouchon

cicatrisation matricielle

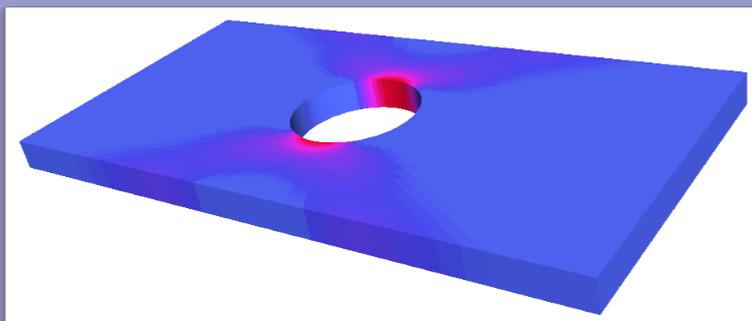
Échelle fibre



rupture sous-critique

Plan

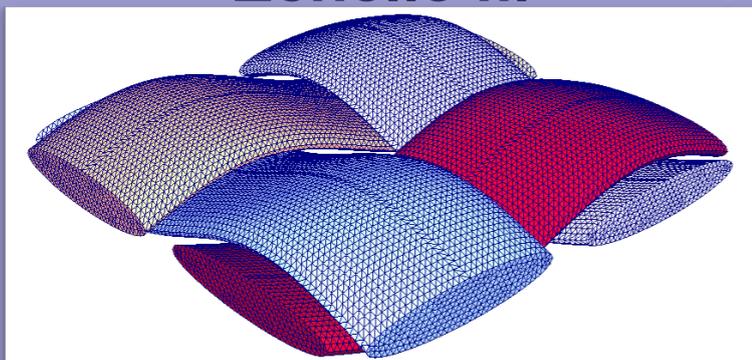
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres



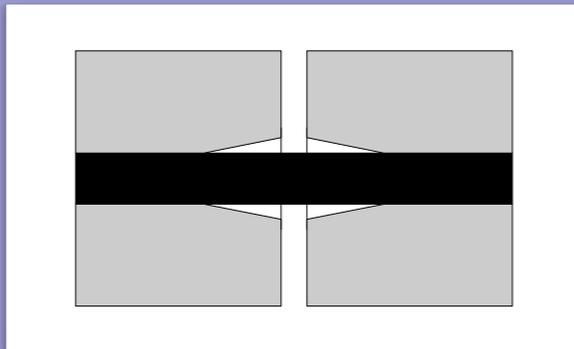
Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres



Échelle fibre



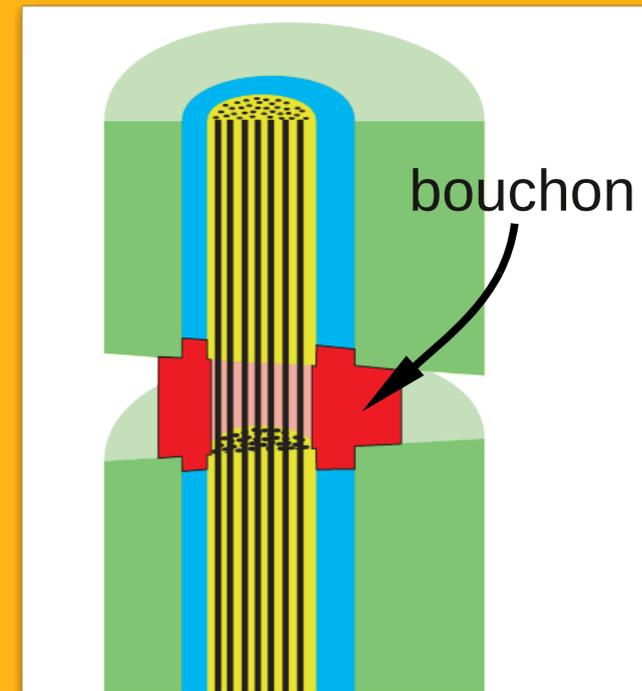
fissures intra trans
+ ruptures fibres

I
Formulation et simulation
de modèles
d'endommagement
anisotrope et unilatéral

II
Homogénéisation
non linéaire
d'une fissure frottante

III
Couplage multi-physique
mécanique/chimie

Échelle fibre

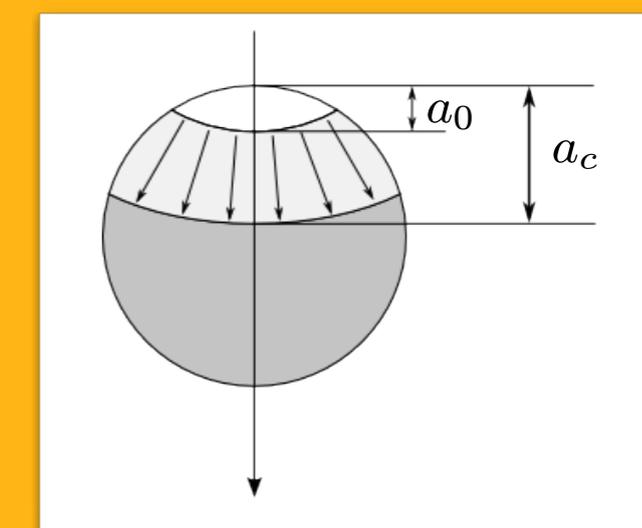


bouchon

cicatrisation matricielle



Échelle fibre



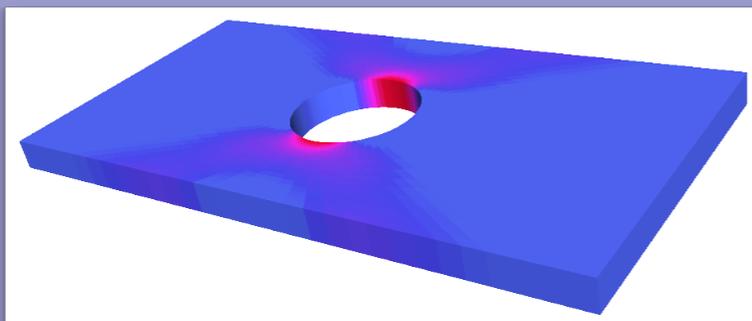
a_0

a_c

rupture sous-critique

Plan

Échelle composite



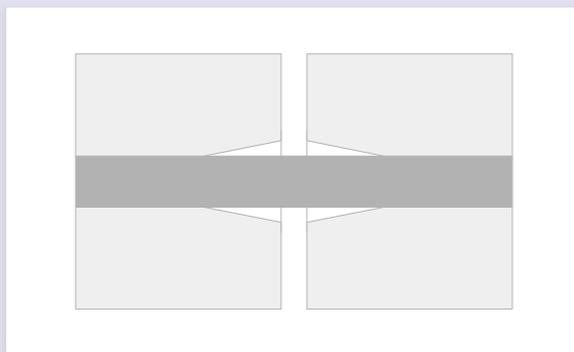
fissures
+ ruptures fibres

Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres

Échelle fibre



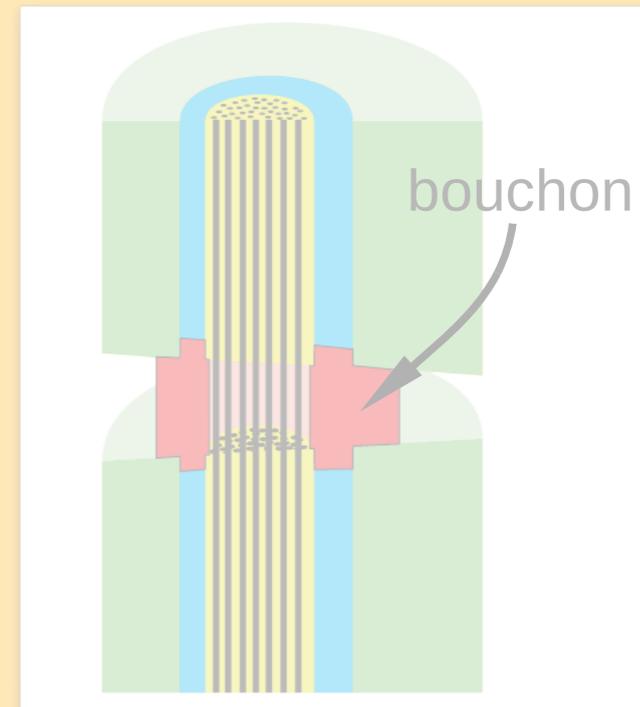
fissures intra trans
+ ruptures fibres

I
Formulation et simulation
de modèles
d'endommagement
anisotrope et unilatéral

II
Homogénéisation
non linéaire
d'une fissure frottante

III
Couplage multi-physique
mécanique/chimie

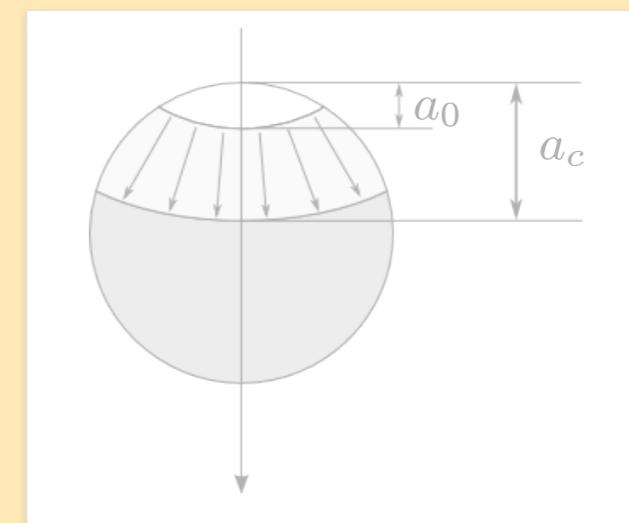
Échelle fibre



bouchon

cicatrisation matricielle

Échelle fibre



a_0

a_c

rupture sous-critique

Comportement macroscopique Problématique

- **Problématique:** Fissuration inter-fil
 - Effet anisotrope et unilatéral
 - Orientée par le chargement

$$\begin{aligned} \text{Isotrope, directionnel} \Rightarrow \text{scalaire:} & \quad E \langle \epsilon \rangle_+^2 + E_0 \langle \epsilon \rangle_-^2 \quad C^1 \\ \text{Anisotrope} \Rightarrow \text{tenseur:} & \quad \langle \underline{\underline{\epsilon}} \rangle_+ : \underline{\underline{E}} : \langle \underline{\underline{\epsilon}} \rangle_+ + \langle \underline{\underline{\epsilon}} \rangle_- : \underline{\underline{E}}_0 : \langle \underline{\underline{\epsilon}} \rangle_- \quad \overline{C^1} \end{aligned}$$

[Ladevèze, 1983] [Chaboche, 1992] [Desmorat, 2000]

- **Approche:** Théorie de l'endommagement anisotrope [Ladevèze, 1983, 2000]
 - Modèle CMCs, version [Ladevèze et Letombe, 2000]
- **Travail**
 - Implémentation
 - Analyses

Comportement macroscopique Modélisation

- **Modèle 2D** [Ladevèze, 2002; Letombe, 2005; Cluzel et al., 2008]
 - **Énergie libre**

$$2\phi = \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_+^S : \underline{\underline{S}} : \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_+^S + \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_-^{S_0} : \underline{\underline{S}}_0 : \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_-^{S_0} + \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{Z}} : \underline{\underline{\sigma}}$$
$$\underline{\underline{S}}(t=0) = \underline{\underline{S}}_0 \quad \underline{\underline{Z}}(t=0) = 0$$

- **Lois d'évolutions**

$$\underline{\underline{\delta S}} = \underline{\underline{\delta S}}_m + \underline{\underline{\delta S}}_{f_1} + \underline{\underline{\delta S}}_{f_2}$$

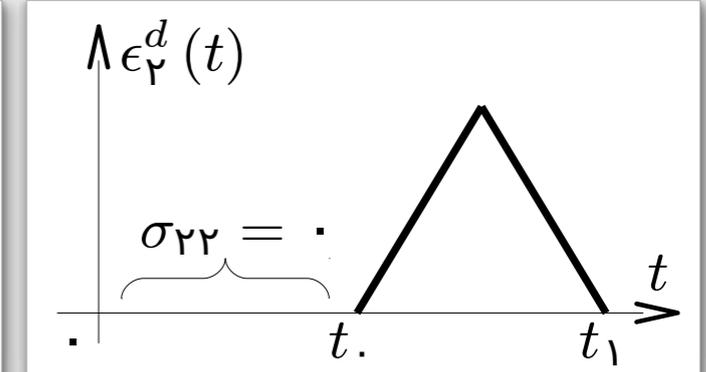
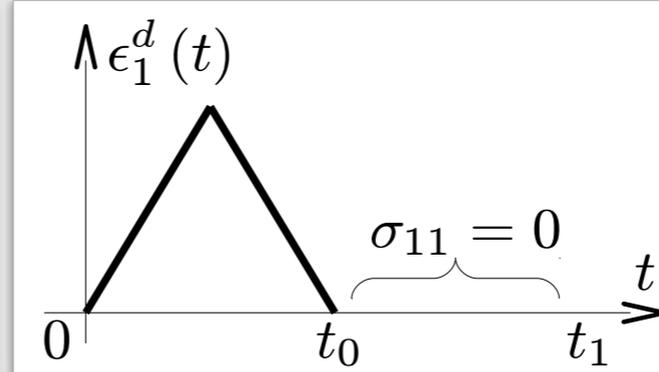
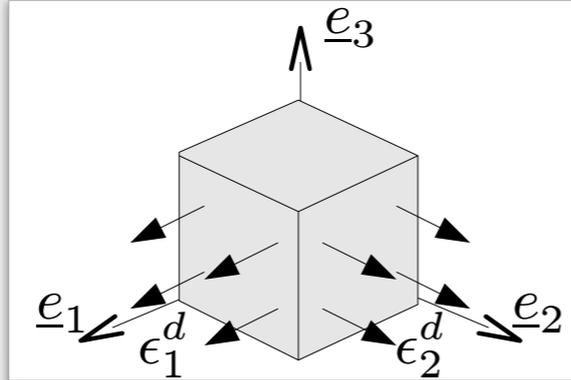
orientées par la micro-structure
orientée par le chargement

Comportement macroscopique

Modélisation

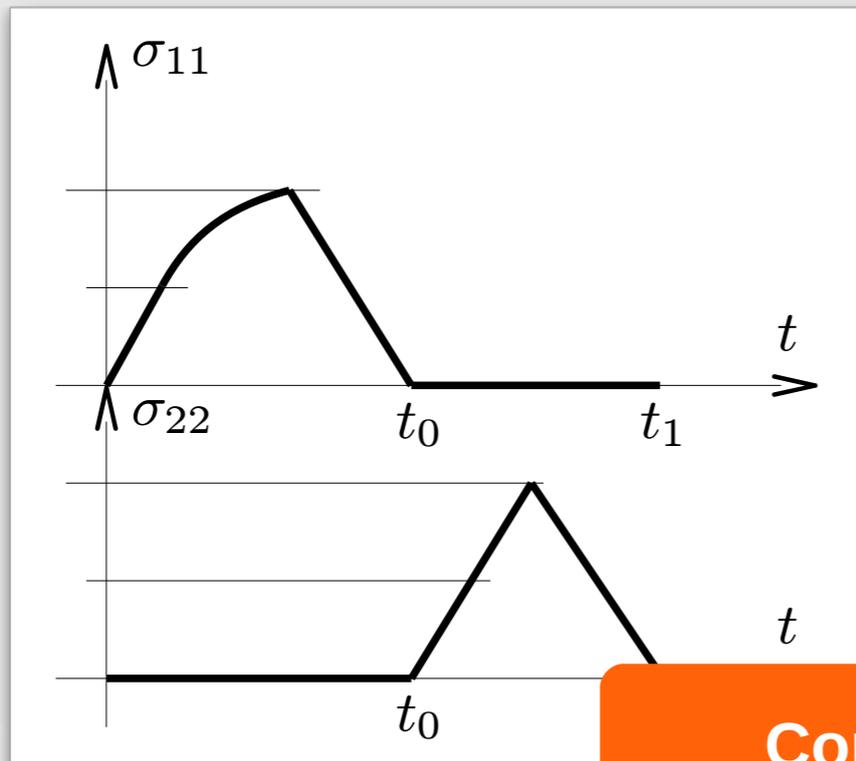
- Analyse: Loi d'évolution pour la fissuration matricielle

- Cas test



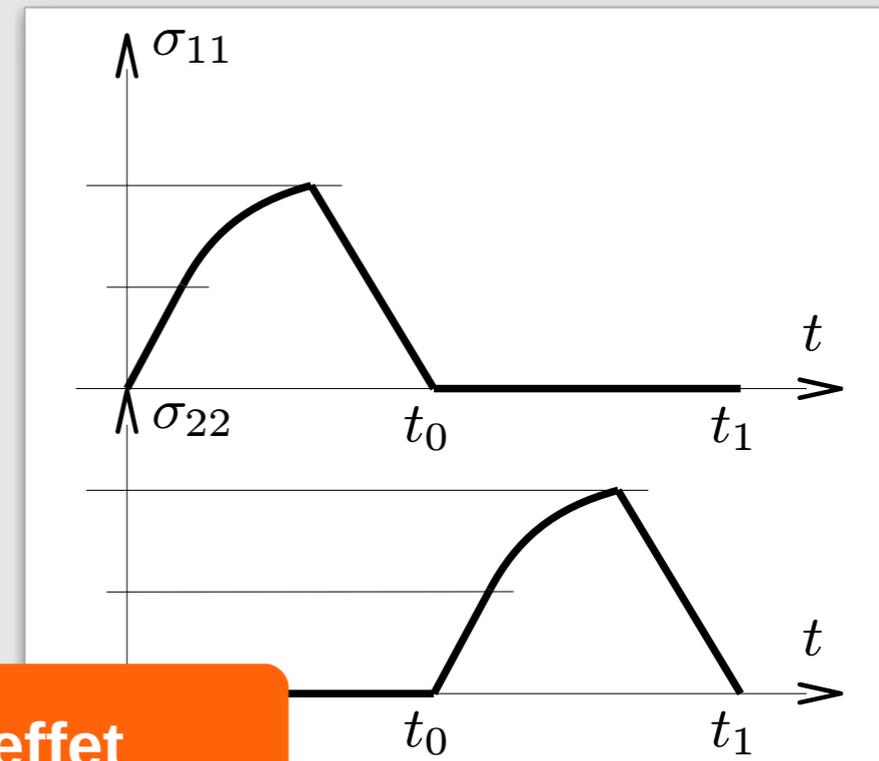
- Version précédente

- Variable interne supplémentaire: intensité maximale du chargement



- Version proposée

- Mesure de l'endommagement sur le tenseur de souplesse



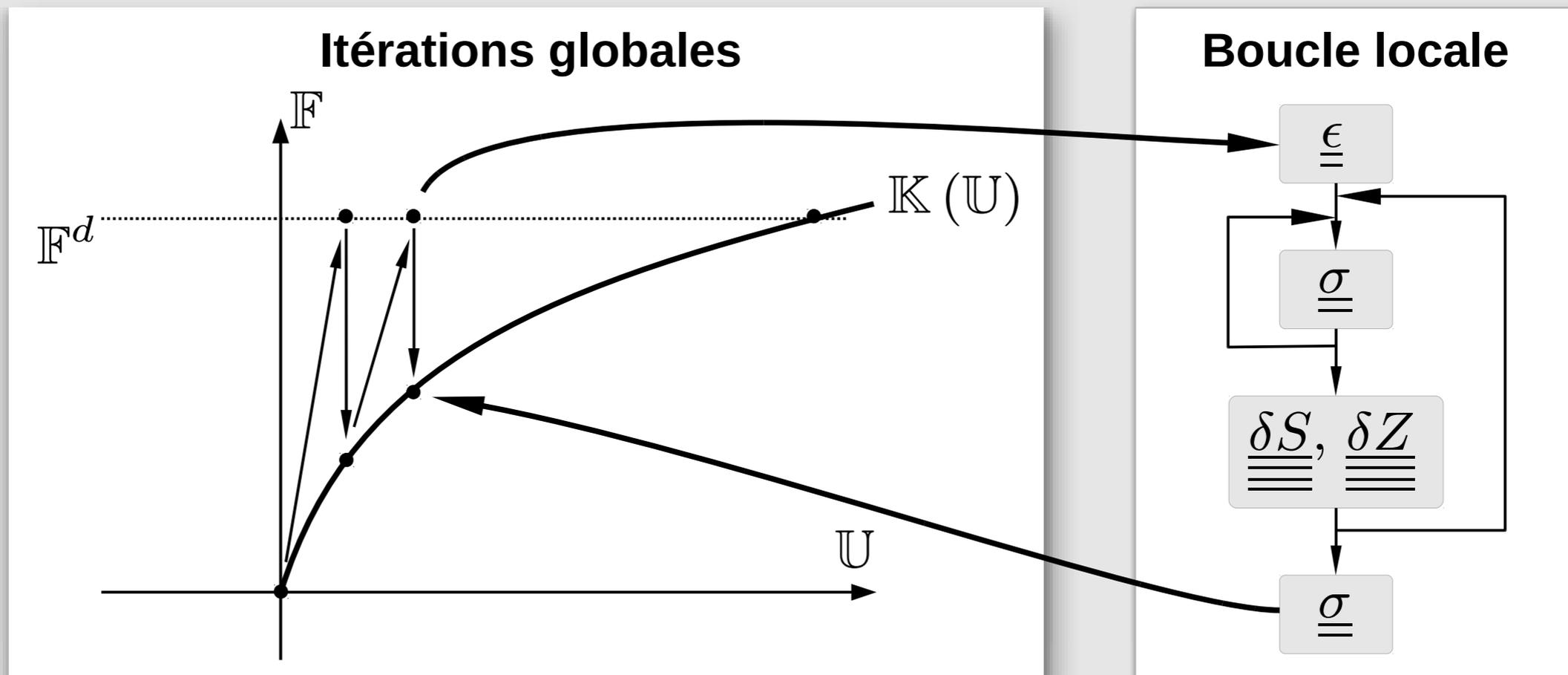
Contrôle de l'effet d'histoire de chargement

Comportement macroscopique Implémentation

- **Spécificités du modèle**

- Pilotage en contrainte: **itérations locales**
- Écriture en contrainte, RdC non linéaire même à variables internes fixées
 - *Itérations pour inversion RdC*
 - *Comportement tangent? sécant? quasi-sécant ou initial*

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{S}} : \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_+^S + \underline{\underline{S}}_0 : \langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle_-^{S_0} + \underline{\underline{Z}} : \underline{\underline{\sigma}}$$



Comportement macroscopique Implémentation

- **Spécificités du modèle**

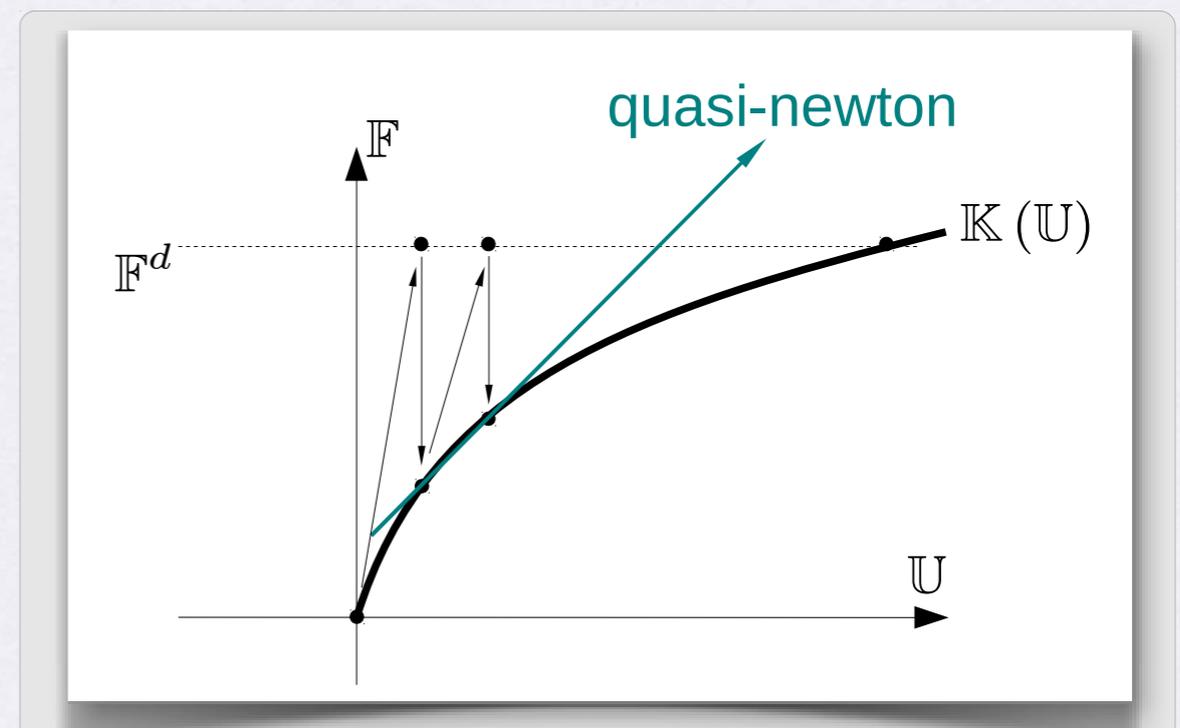
- Pilotage en contrainte: **itérations locales**
- Écriture en contrainte, RdC non linéaire même à variables internes fixées
 - *Itérations pour inversion RdC*
 - *Comportement tangent? sécant? quasi-sécant ou initial*

- **Implémentation plateforme LMT++ [Leclerc, 2007, 2008]**

- **Solveur interne**: expression **analytique exacte** du modèle
- **Solveur dédié**: quasi-Newton **BFGS [Matthies et Strang, 1979]** (global et RdC)
- Intégration dans **Coffee/LMT++ [Bordeu et al., 2008, 2009]**

- **Implémentation ABAQUS**

- UMAT C++ 2D/3D

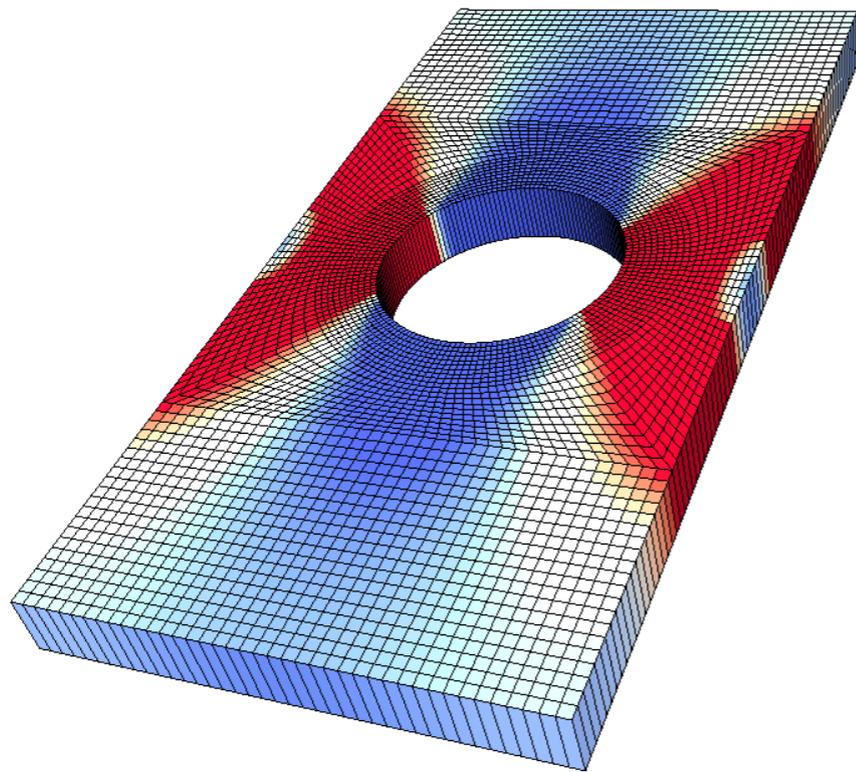


Comportement macroscopique

Illustration

- **Éprouvette trouée en traction** (identification [Letombe, 2005])
 - Champs d'endommagement

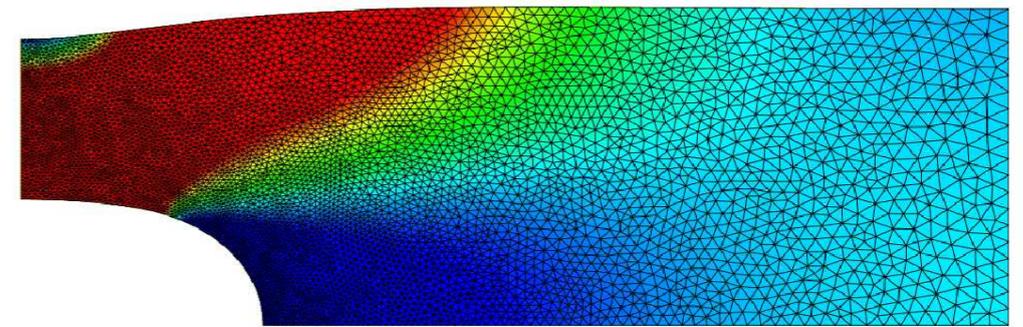
Coffee/LMT++



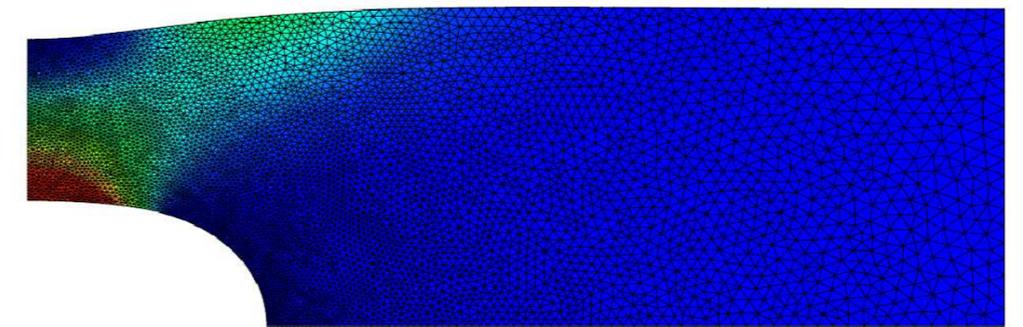
Endommagement matriciel

3D, 30e3 ddls, 40e3 pts. int.

ABAQUS



Endommagement matriciel



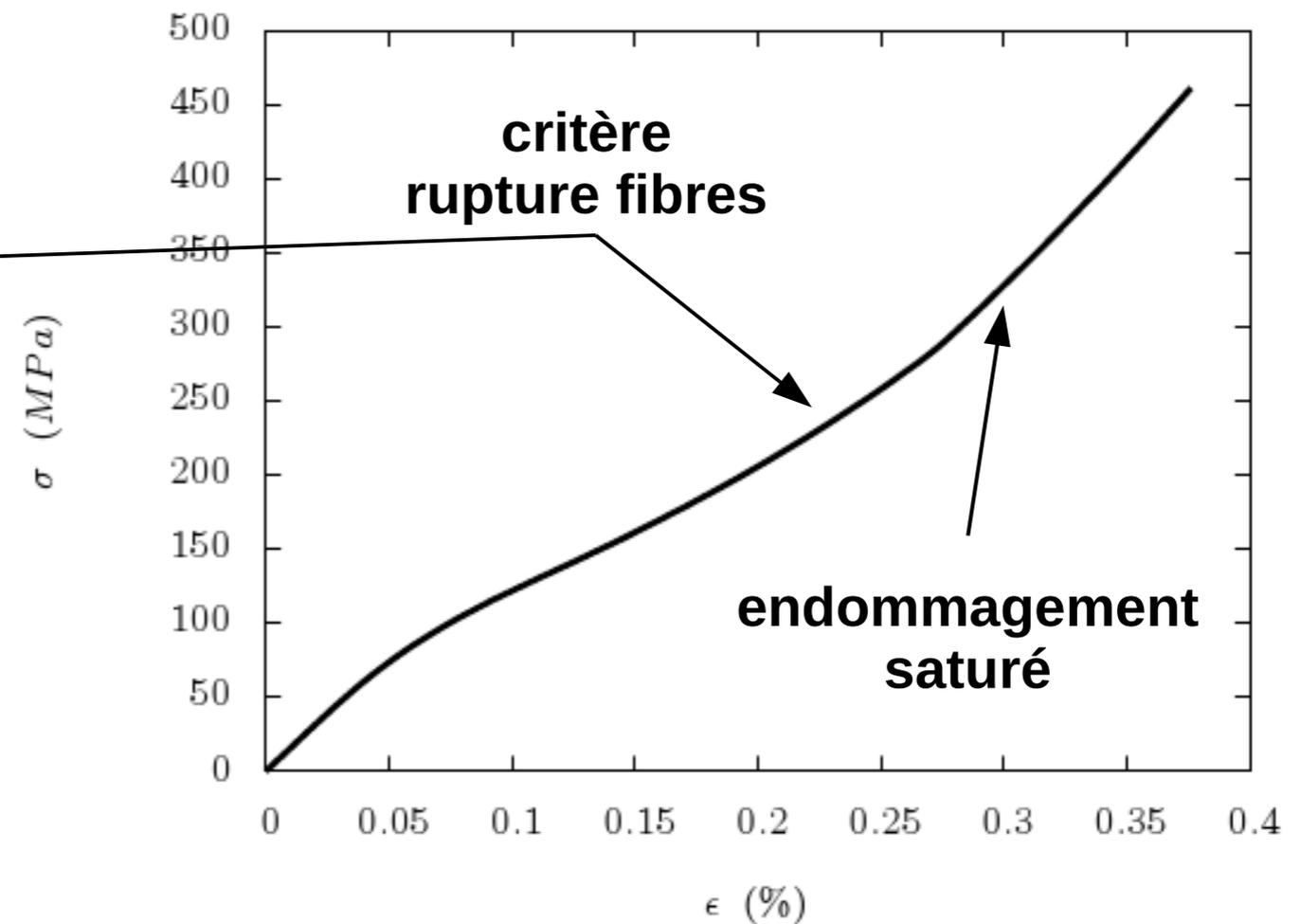
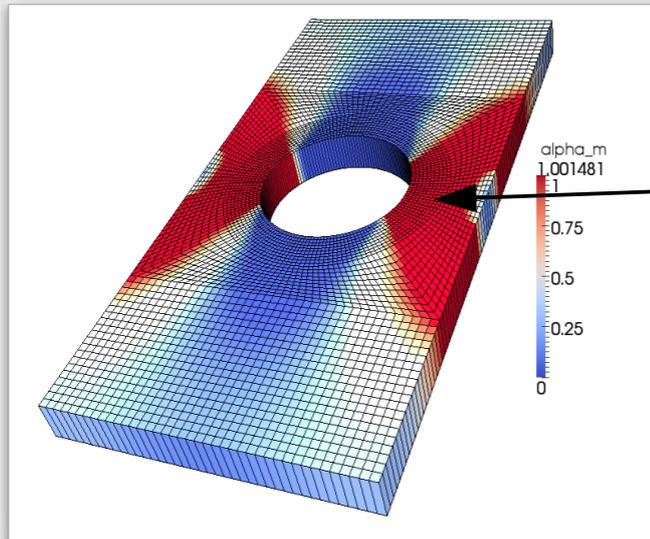
Endommagement fils longis

2D, 12e3 ddls, 12e3 pts. int.

Comportement macroscopique

Illustration

- Éprouvette trouée en traction
 - Réponse



Implémentation
« robuste »

Comportement macroscopique

Illustration

- Éprouvette trouée en traction
 - Temps de calcul

Coffee/LMT++ (3D, 30e3 ddls, 40e3 pts. int.)

		op. global	
		initial	BFGS
op. RdC	quasi-sécant	92 h	81 h
	BFGS		48h

gain = 50%

Implémentation
« efficace »

Abaqus (2D, 12e3 ddls, 12e3 pts. int.)

		op. global	
		initial	quasi-sécant
op. RdC	quasi-sécant	11,9 h	6,9 h
	BFGS	7,8h	4,5h

gain = 35%

Comportement macroscopique

Bilan 1/3

😊 Bilan

- 😊 Endommagement **anisotrope**, **unilatéral** et piloté par le **chargement**
- 😊 Implémentation « **robuste** » et « **efficace** »

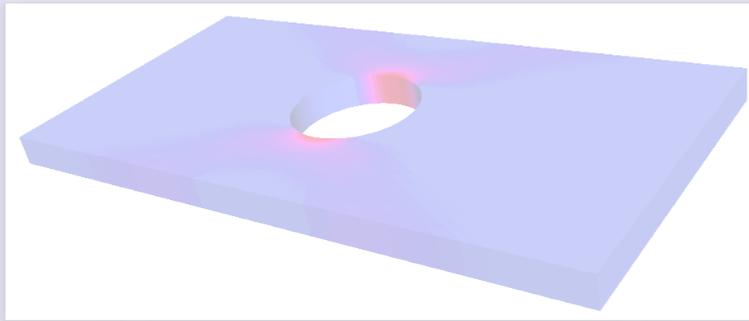
☹️ Limites de l'approche macroscopique

- ☹️ **Identification** lourde et non générique ... virtual testing?
- ☹️ **Ouverture des fissures** peu précise ... relocalisation?

Nécessité d'un modèle à l'échelle du tissu!

Plan

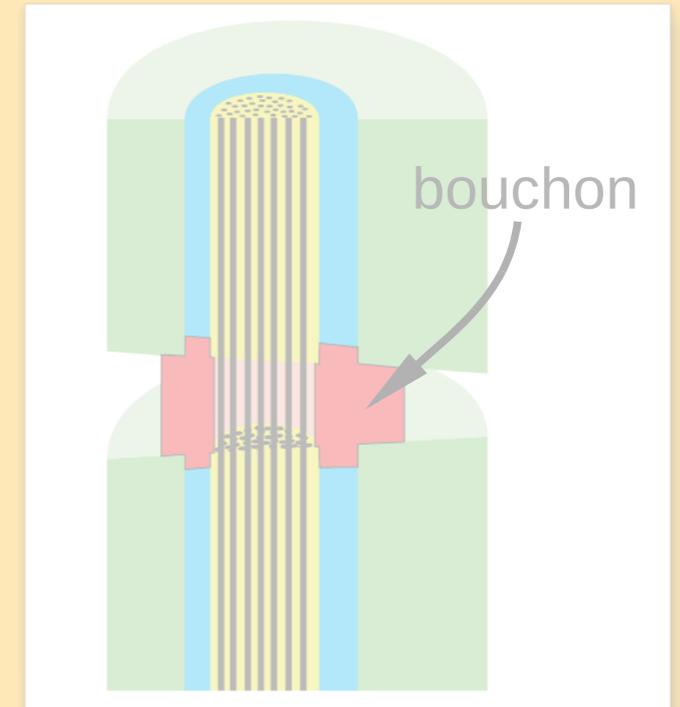
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres

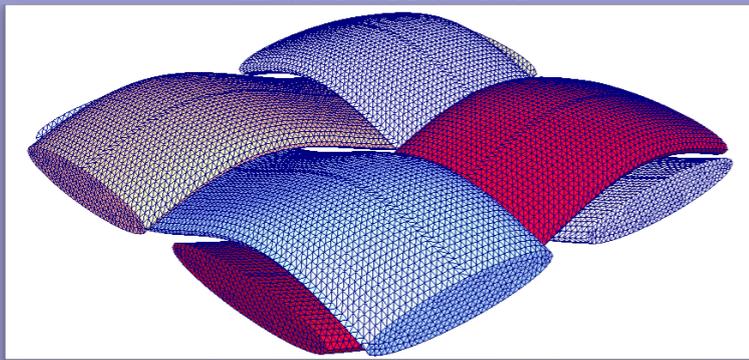
I
Formulation et simulation
de modèles
d'endommagement
anisotrope et unilatéral

Échelle fibre



cicatrisation matricielle

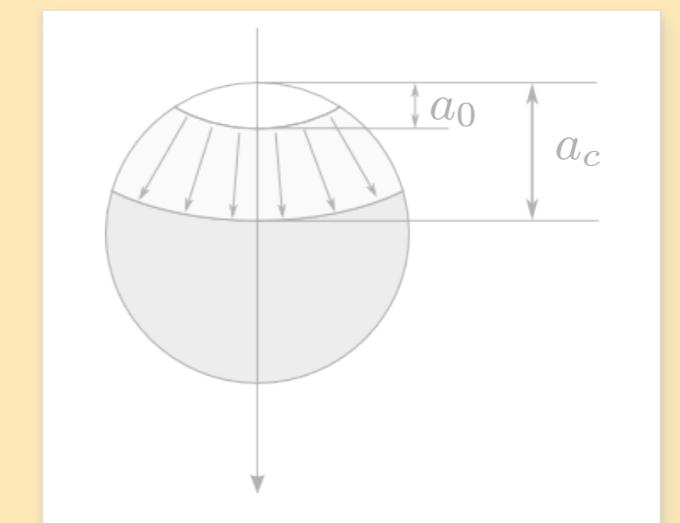
Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres

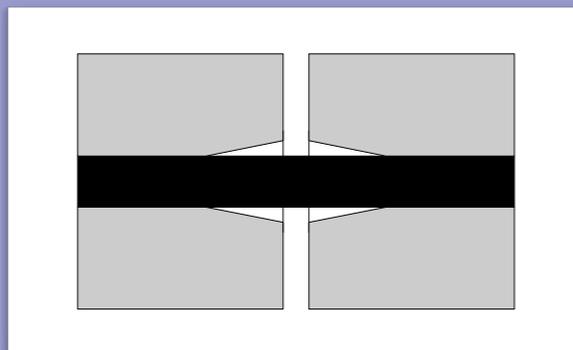
II
Homogénéisation
non linéaire
d'une fissure frottante

Échelle fibre



rupture sous-critique

Échelle fibre



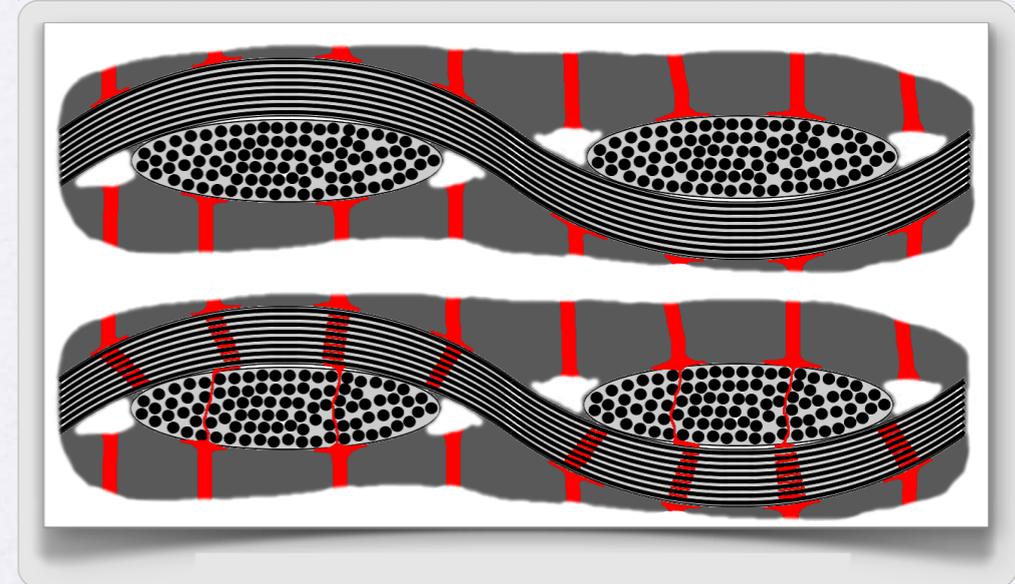
fissures intra trans
+ ruptures fibres

III
Couplage multi-physique
mécanique/chimie

Fissuration intra-fil transverse

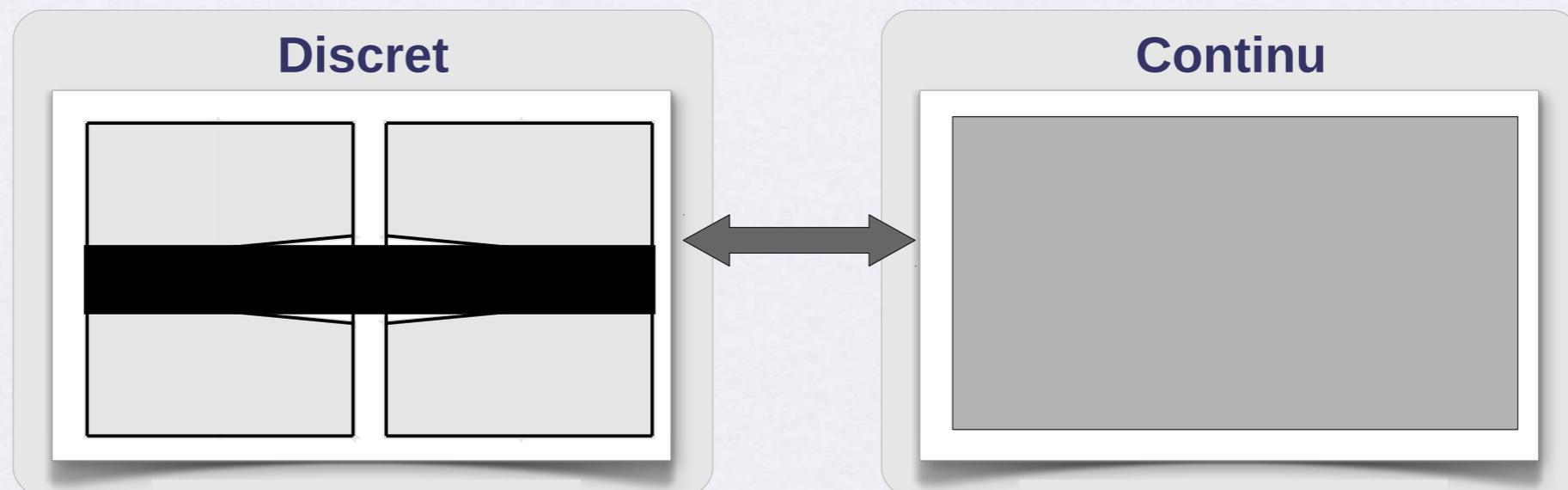
Problématique

- **Problématique: ouverture des fissures**
 - Pilote la **durée de vie** du matériau
 - *Besoin d'une représentation fine*
 - Pilotée par la **décohésion fibre/matrice**
 - *Échelle caractéristique fibre*



- **Approche: homogénéisation**

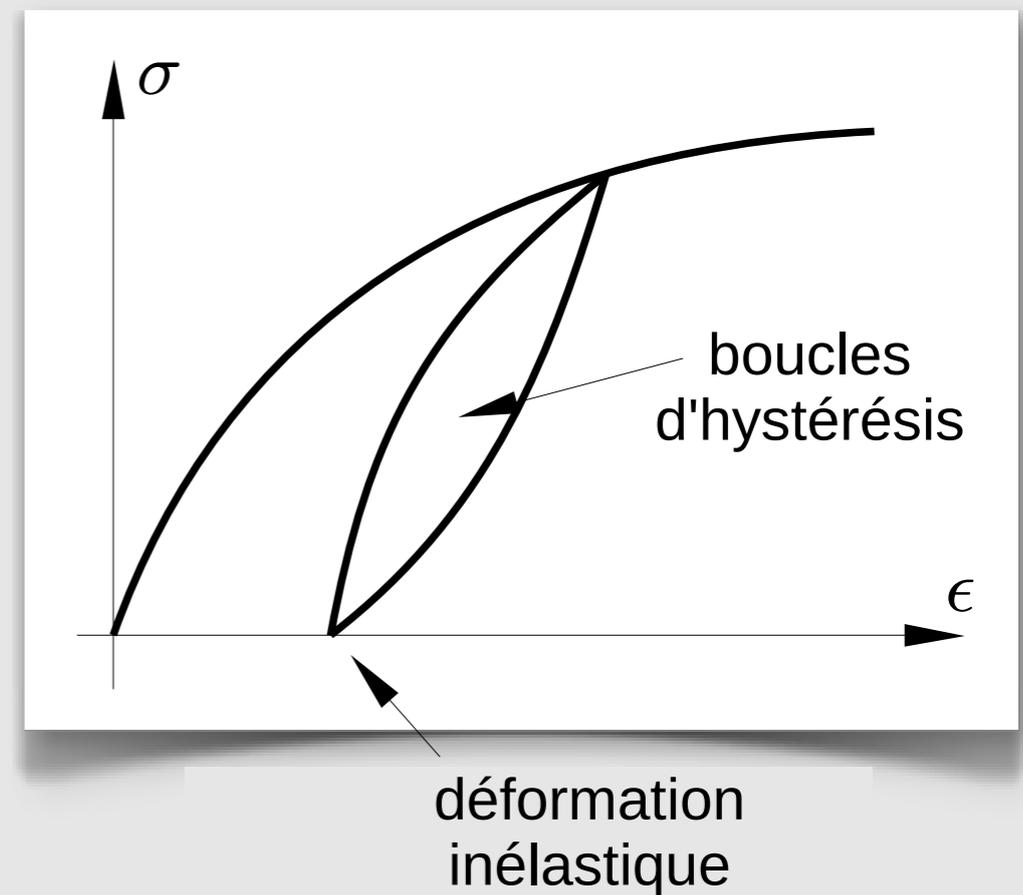
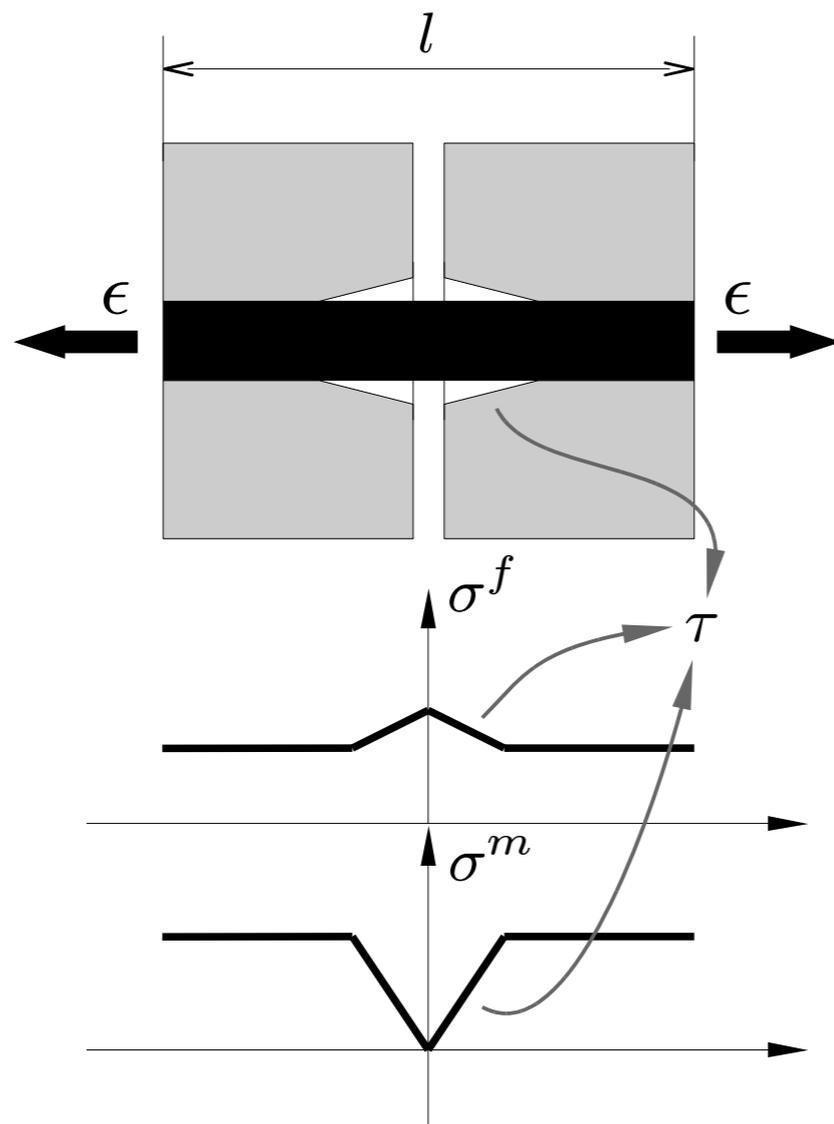
- [Hild, Burr et Leckie, 1996]: lois d'état **homogénéisées analytiquement**, lois d'évolution **identifiées expérimentalement**
- Ici: **pont complet**



Fissuration intra-fil transverse

Modèle micro

- **Modèle: *shear lag* [ACK, 1971] + Weibull**
 - Weibull = fissuration **probabiliste**
 - *Shear lag* = Modèle **1.5D**, transfert de charge par **cisaillement**
 - Modèle de **référence** [Curtin, 1991, 1993; Lissart *et al.*, 1997]



Fissuration intra-fil transverse

Homogénéisation

- Décomposition du problème micro
[Hild *et al.*, 1994, 1996; Vivier *et al.*, 2009]

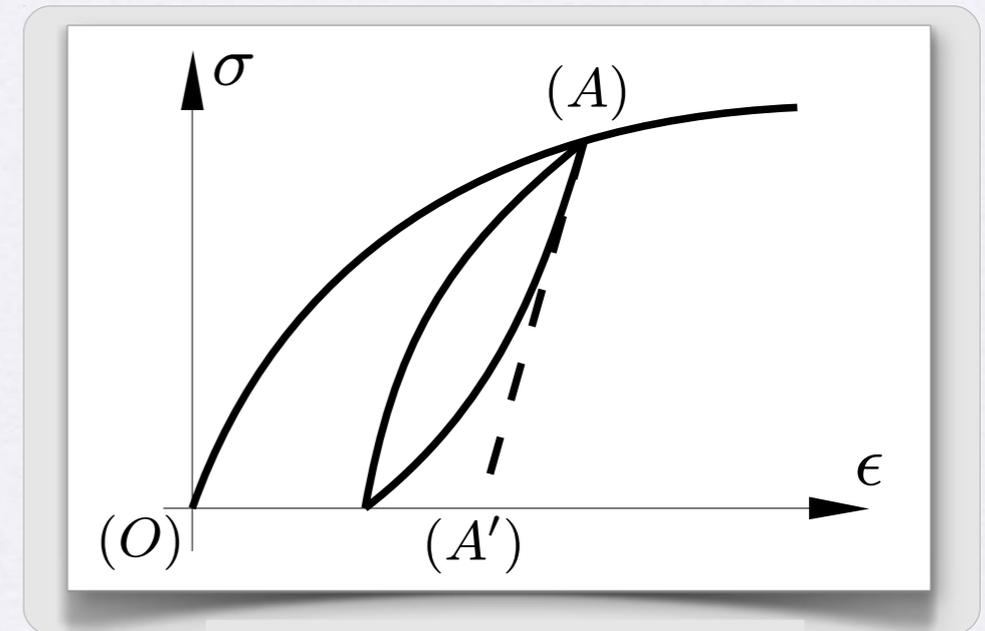
$$\psi^i = \psi^r + \psi^s$$

- Chemin élastique (AA')
 - *Énergie élastique récupérable*

$$2\psi^r = \bar{E} (\epsilon - \epsilon^i)^2$$

- État conceptuel (A')
 - *Énergie élastique stockée*
 - *Variables internes supplémentaires pour l'histoire du chargement*
 - *Charges déchargées complètes: unique variable interne supplémentaire*

$$\psi^s = \psi^s (\sigma, \sigma_{\max})$$



Fissuration intra-fil transverse

Modèle homogénéisé

- **Modèle**

- Loi d'état

$$\sigma = \frac{\partial \psi^r}{\partial \epsilon} = \bar{E} (\epsilon - \epsilon^i)$$

- Loi d'évolution

$$\dot{\epsilon}^i = \dot{\epsilon}^i (\dot{\sigma}, \sigma, \sigma_{\max})$$

↳ type plasticité

Formulation **continue** standard

Pont entre les grandeurs **continues** et **discrètes**

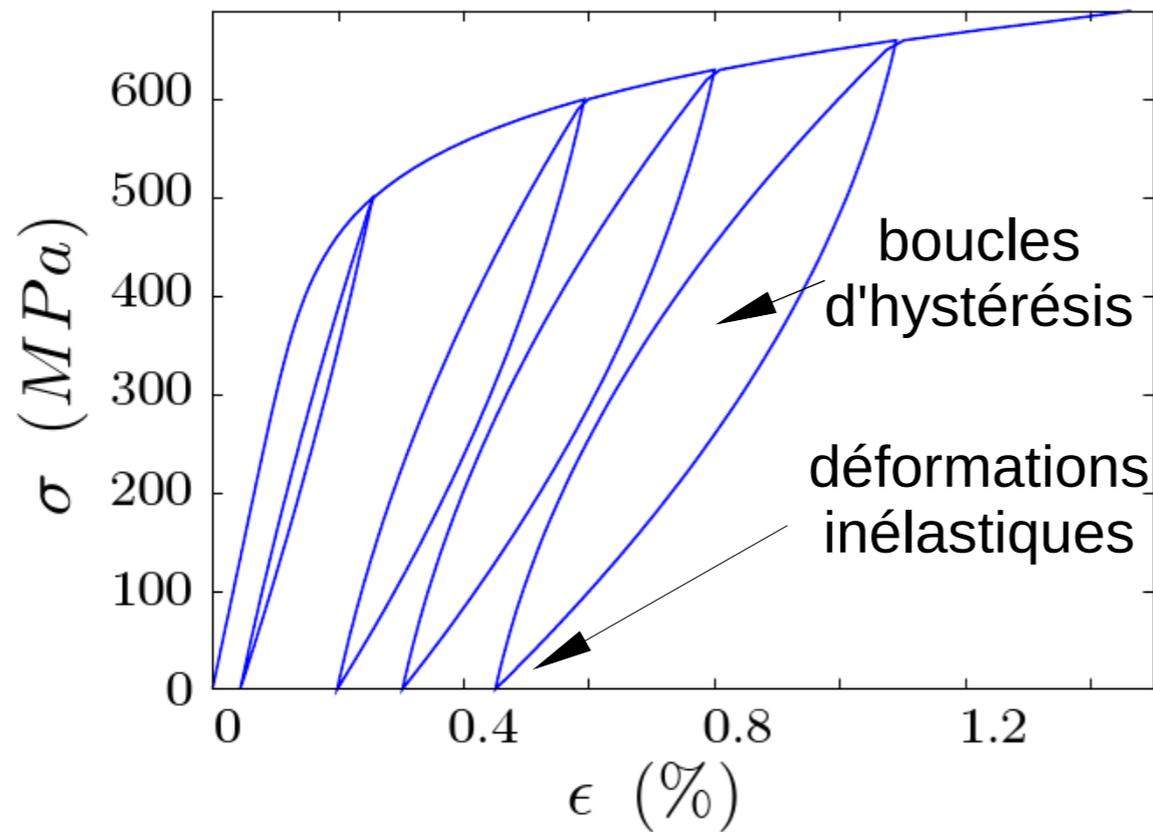
- **Identification**

- Caractéristiques des constituants élémentaires
- Exemple: [Lissart et Lamon, 1997] (τ identifié macroscopiquement)

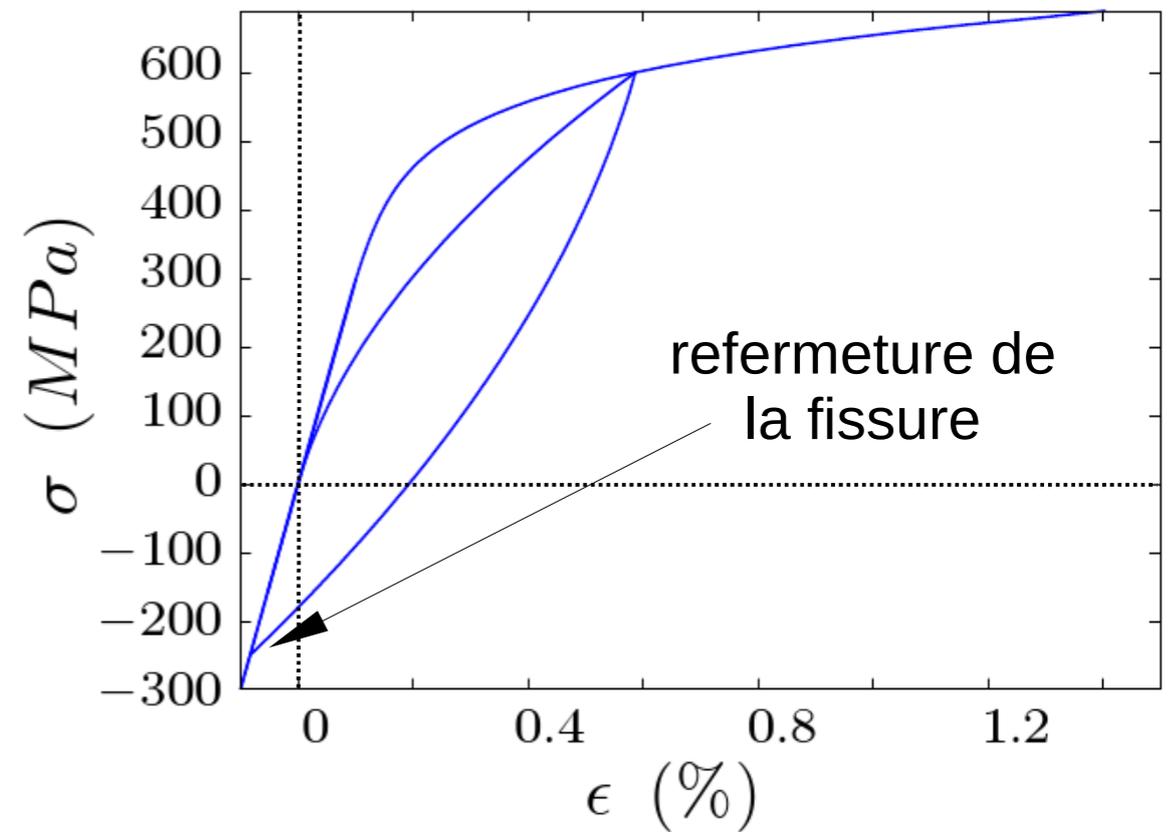
Fissuration intra-fil transverse

Illustration 1

- Cas 0D
 - Réponse



(a) Cas de charges-décharges

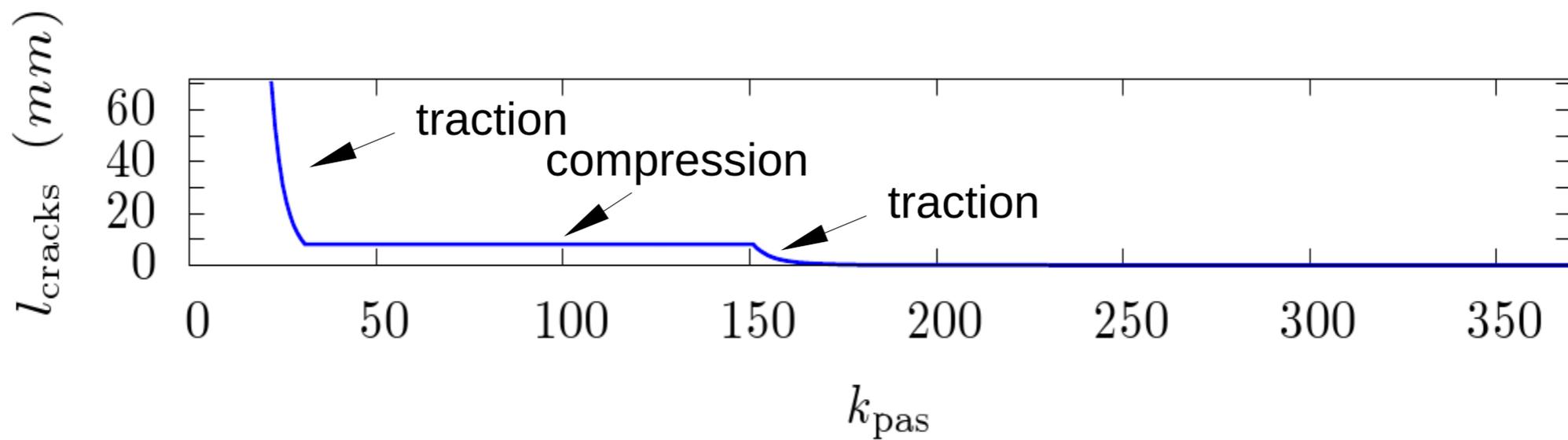


(b) Cas traction-compression

Fissuration intra-fil transverse

Illustration 1

- Cas 0D
 - Grandeurs micros

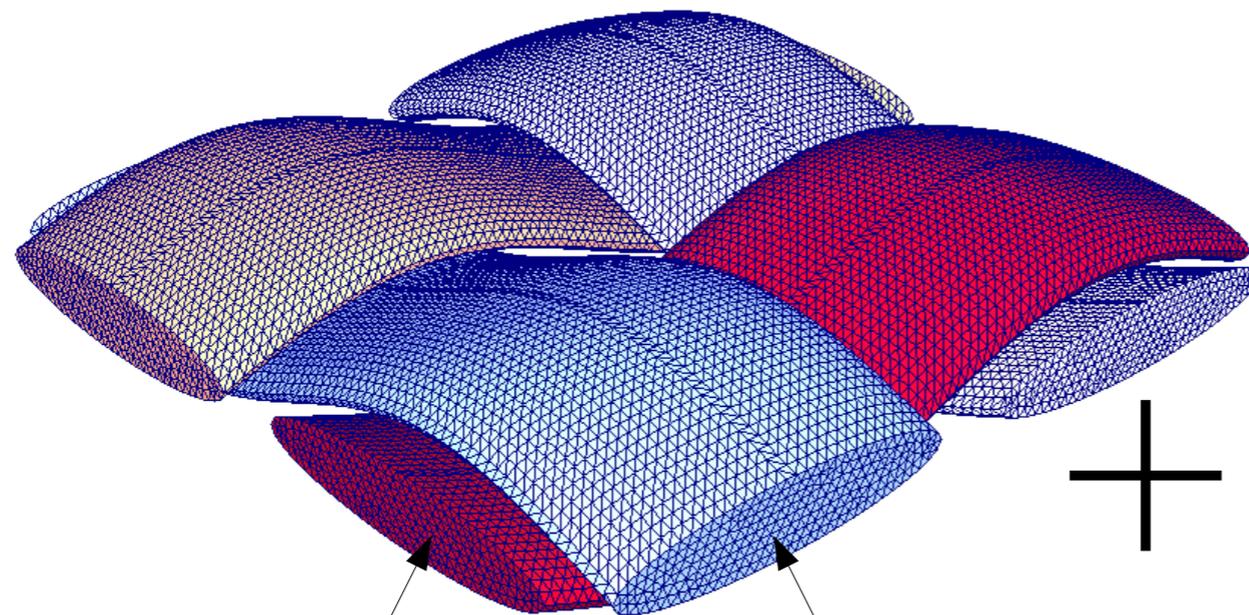


(b) Cas traction-compression

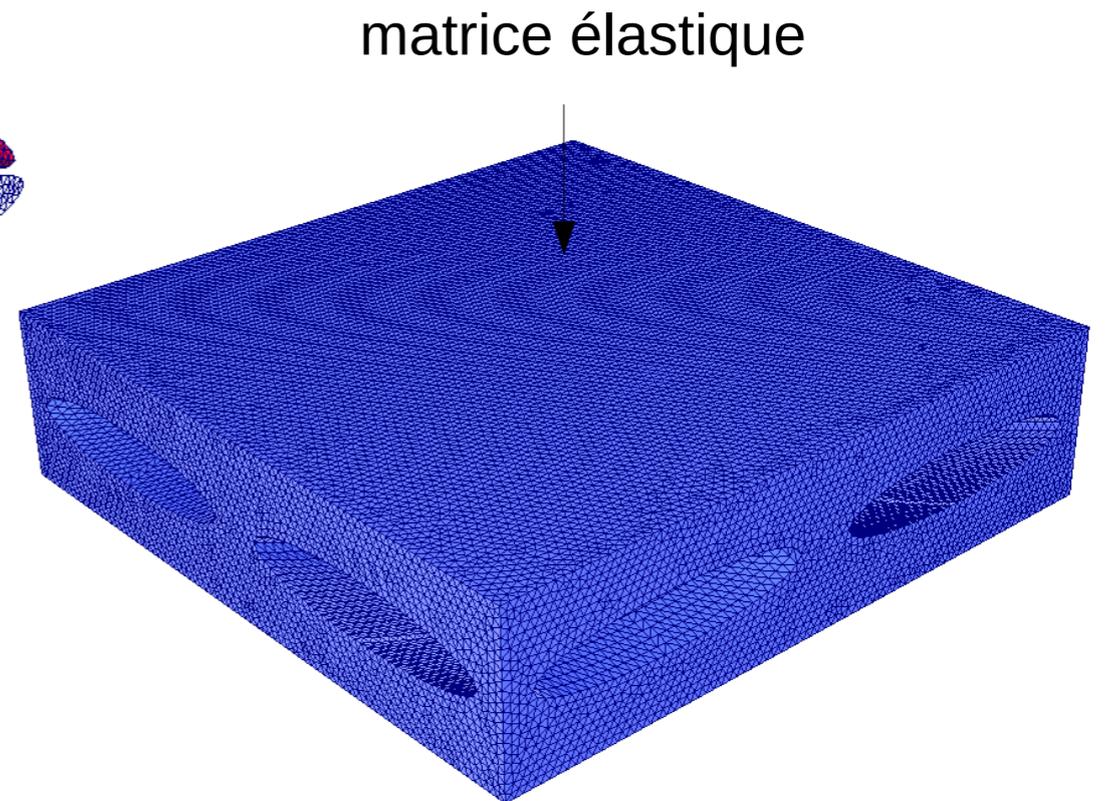
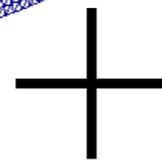
Fissuration intra-fil transverse

Illustration 2

- Cas du tissu



modèle homogénéisé 1D
dans la direction du fil;
autres directions élastiques

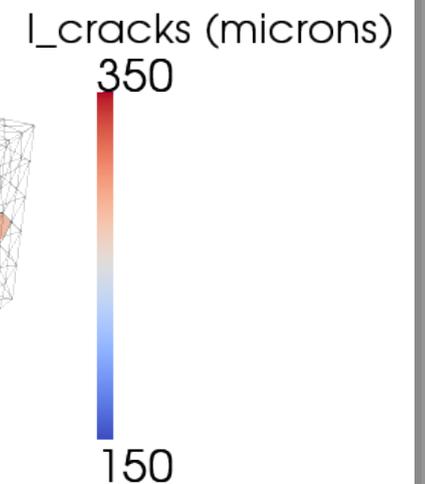
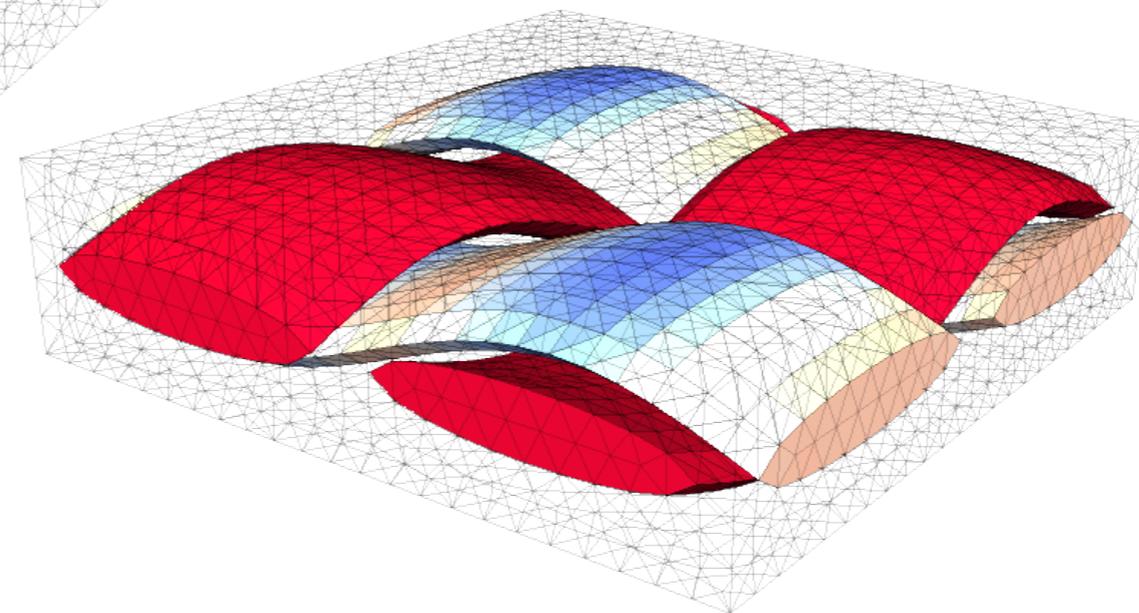
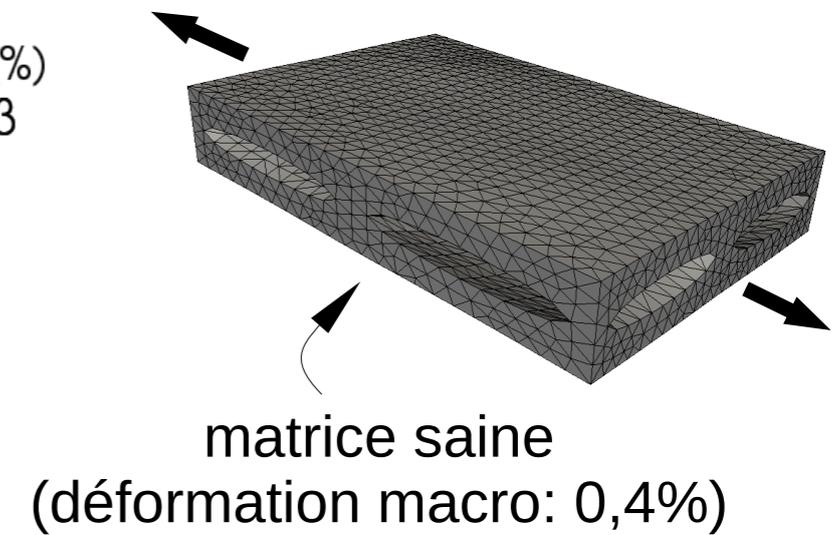
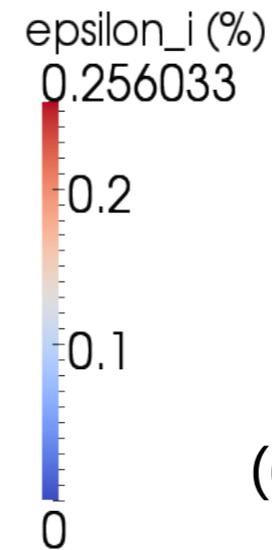
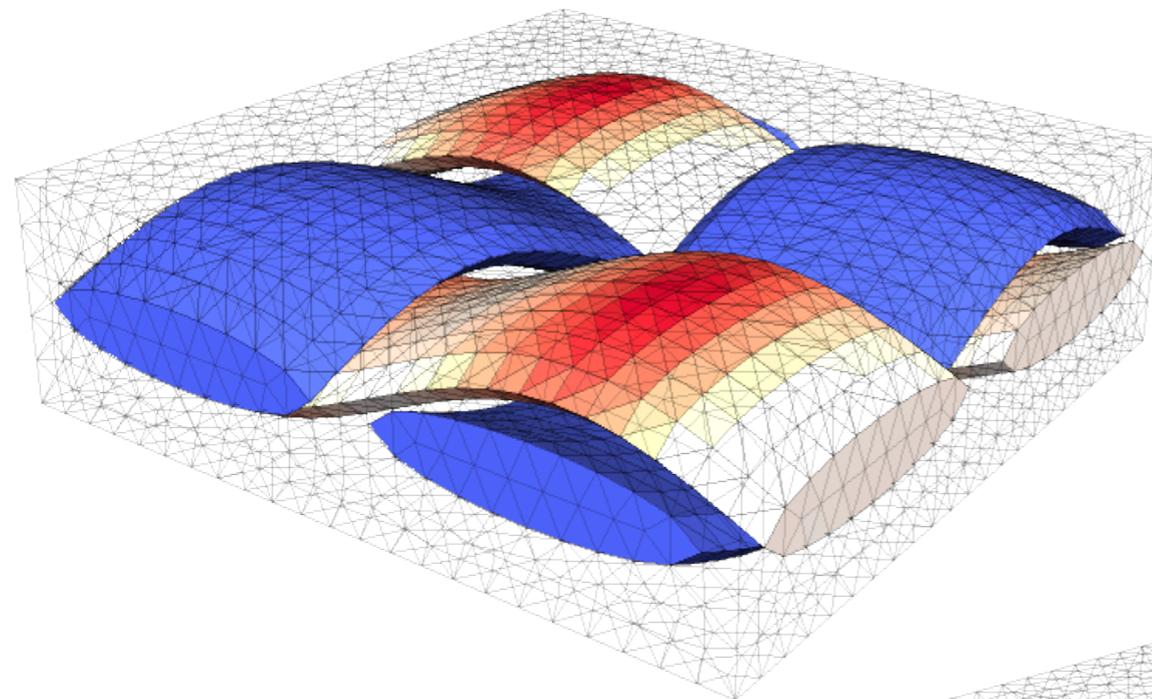


matrice élastique

Fissuration intra-fil transverse

Illustration 2

- Cas du tissu

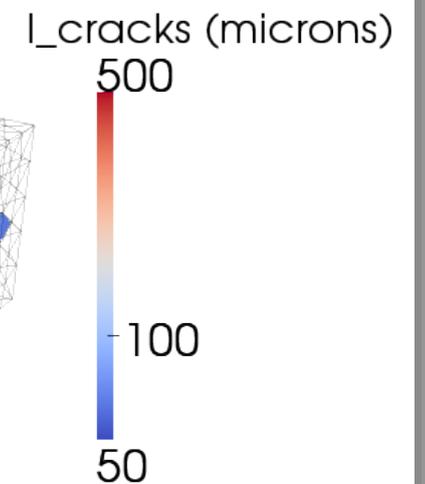
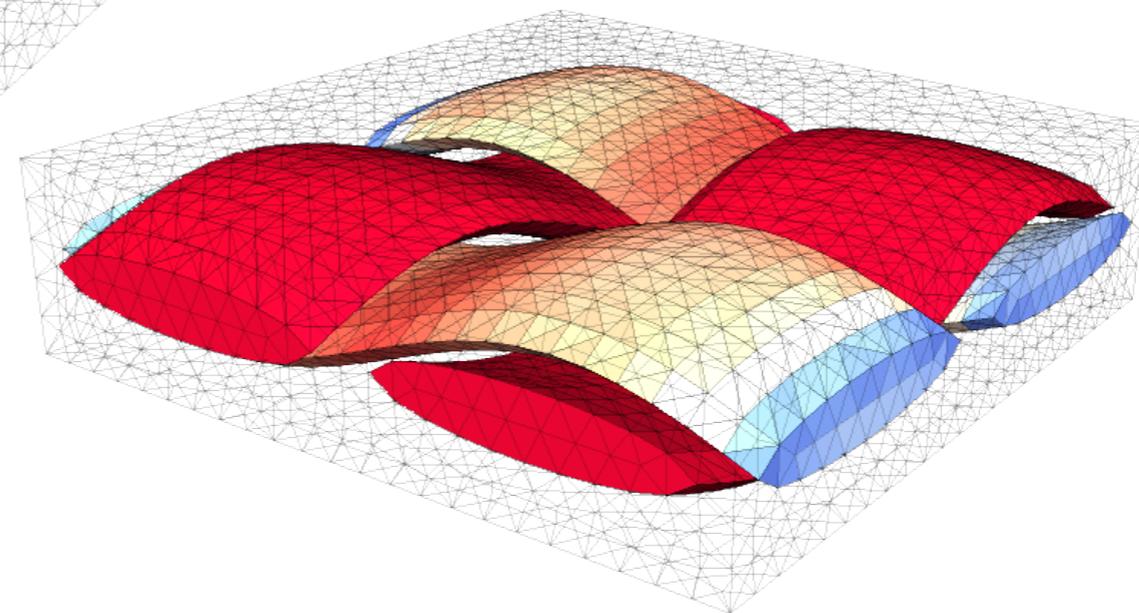
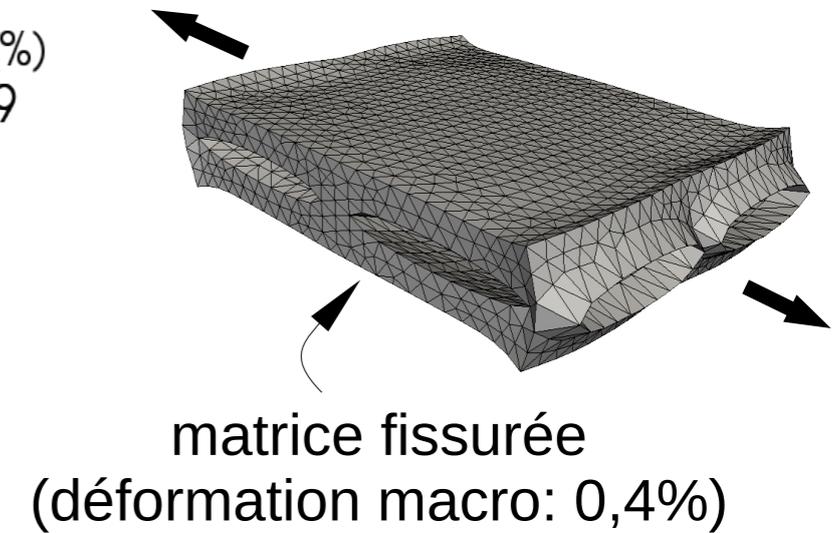
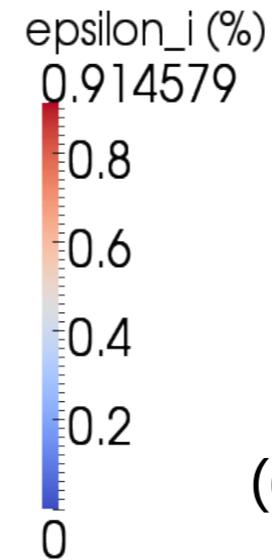
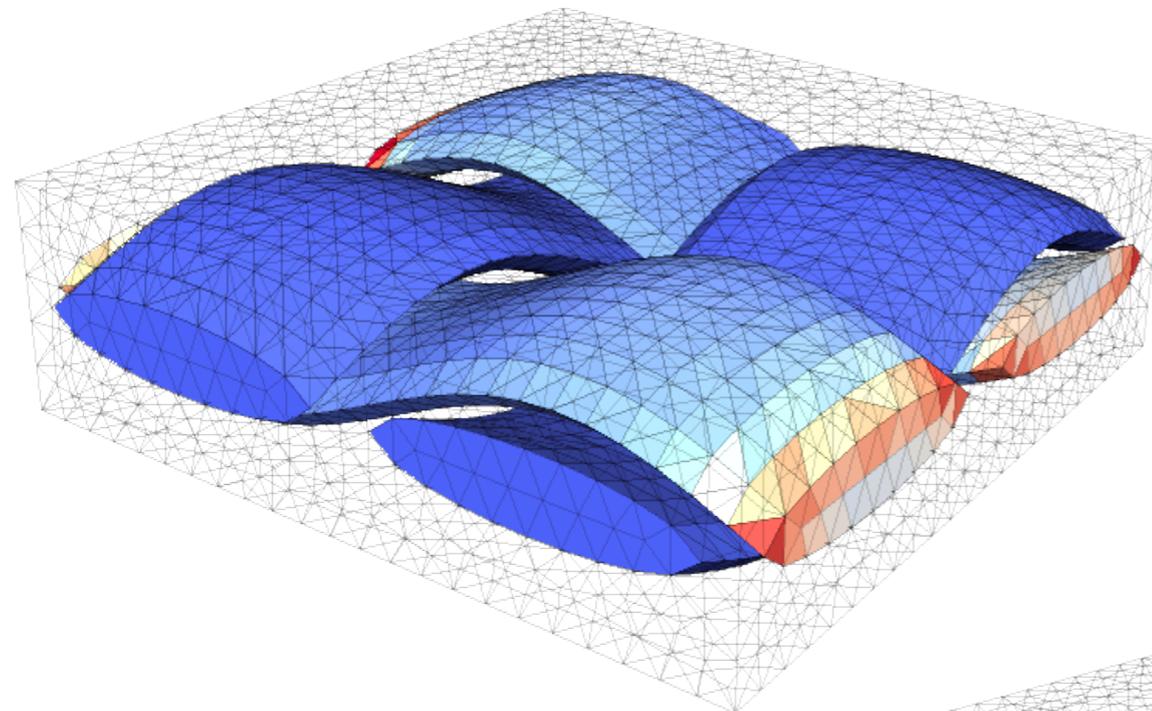


7e3 ddls, 23e3 pts. Int.

Fissuration intra-fil transverse

Illustration 2

- Cas du tissu



7e3 ddls, 23e3 pts. Int.

Fissuration intra-fil transverse

Bilan 2/3

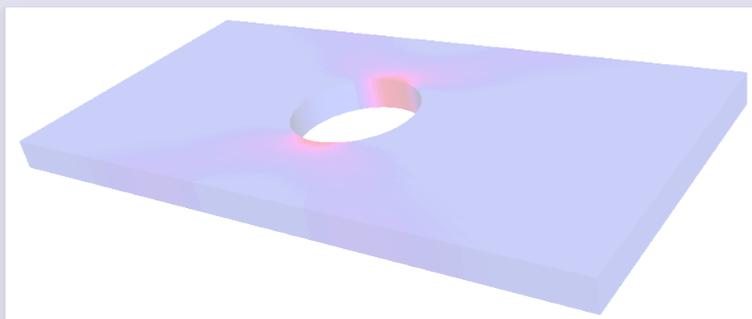
😊 Bilan

- 😊 Modèle **continu** à l'échelle fil
- 😊 Pont entre les grandeurs **continues** (échelle fil) et **discrètes** (échelle fibre)
- 😊 Description fine des **densités/ouvertures** des fissures

Durée de vie!

Plan

Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres



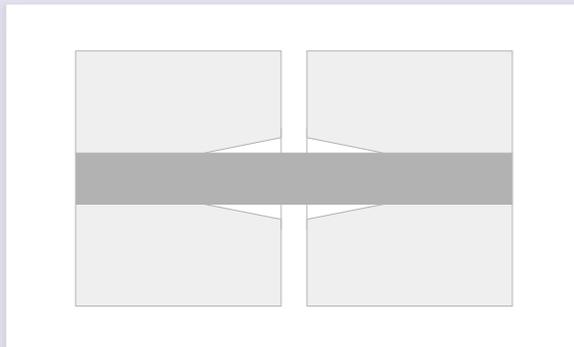
Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres



Échelle fibre



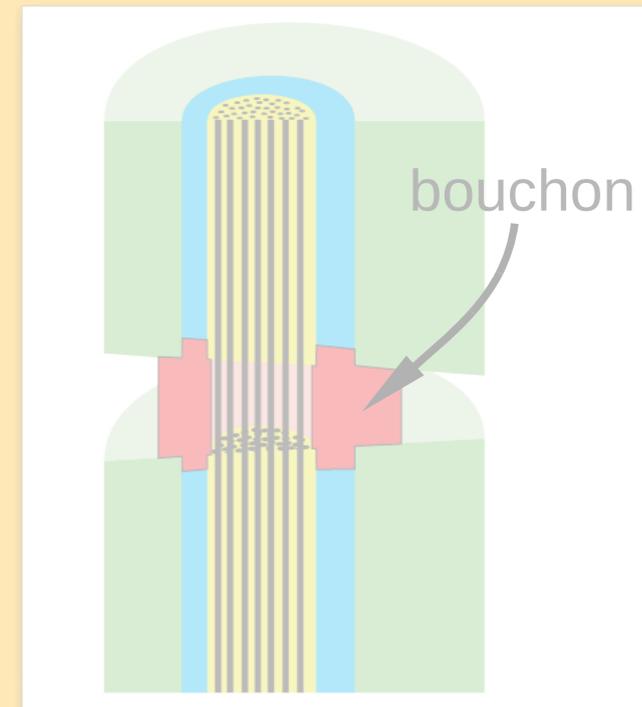
fissures intra trans
+ ruptures fibres

I
Formulation et simulation
de modèles
d'endommagement
anisotrope et unilatéral

II
Homogénéisation
non linéaire
d'une fissure frottante

III
Couplage multi-physique
mécanique/chimie

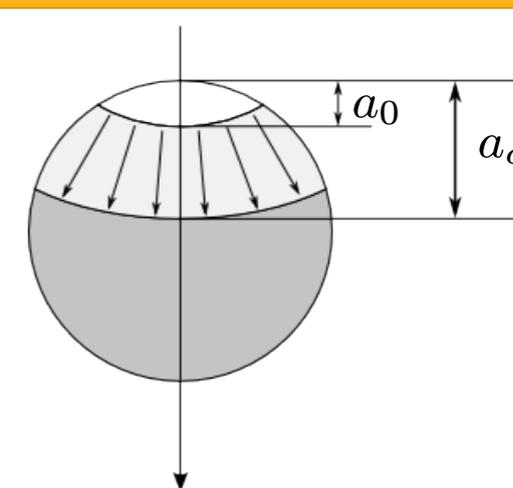
Échelle fibre



bouchon

cicatrisation matricielle

Échelle fibre



a_0

a_c

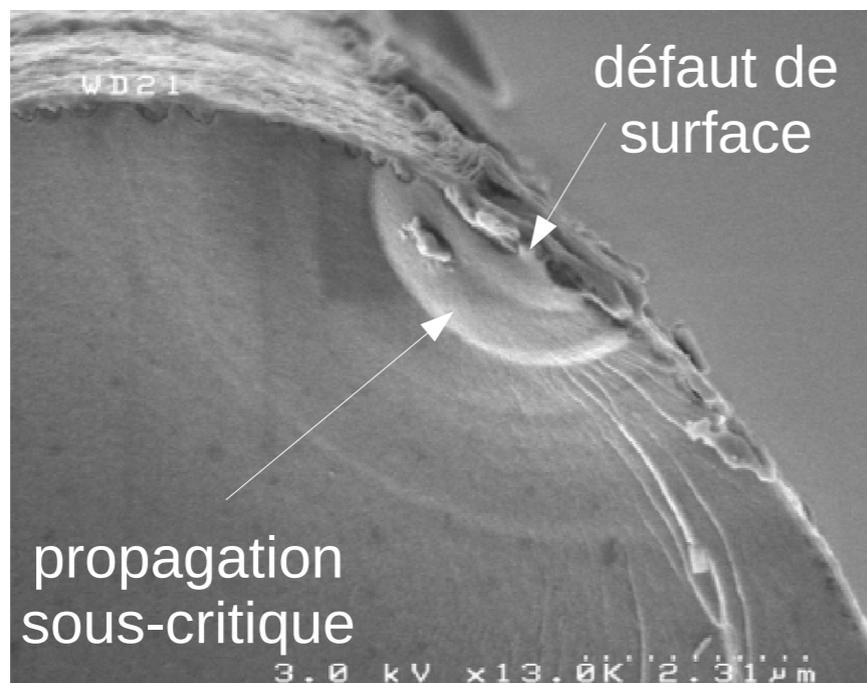
rupture sous-critique

Durée de vie des fibres

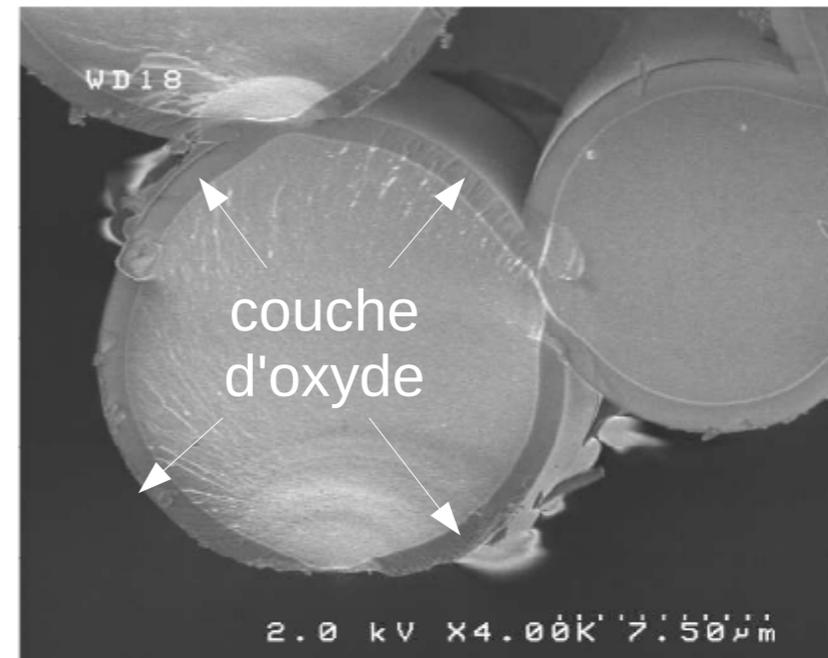
Phénoménologie (fibres Hi-Nicalon)

- Rupture différée

- Défauts de surface [Takeda *et al.*, 1999] [Bunsell et Berger, 1999]
- Propagation sous-critique (PSC) des défauts [Gauthier et Lamon, 2007]
- Passivation de la réaction par la **couche d'oxyde** [Laforêt et Lamon, 2009]
 - *Propagation contrôlée par la réaction puis la diffusion*



[Gauthier & Lamon, 2007]



[Laforêt & Lamon, 2009]

Durée de vie des fibres

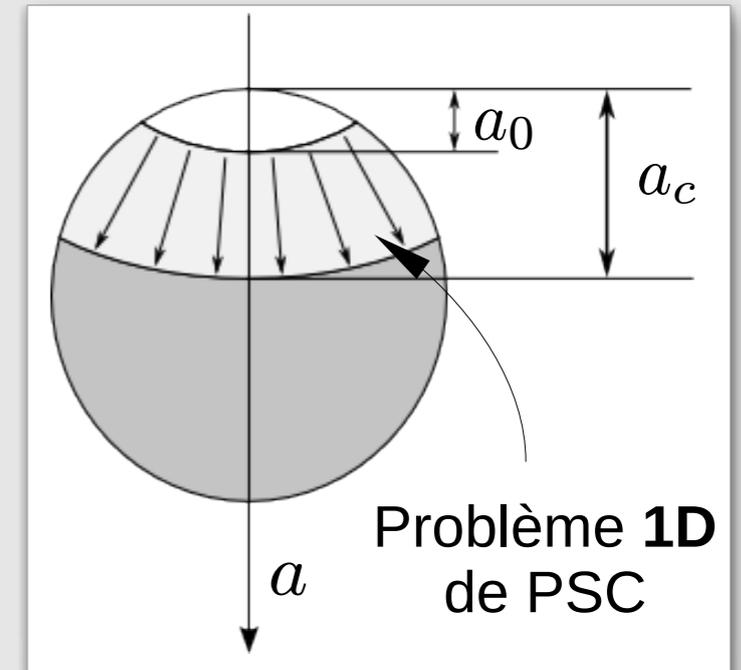
Bibliographie

- **Défauts de surface** [Lamon *et al.*, 2007, 2009]
 - + Loi de Weibull sur les **contraintes à rupture**
 - + **Morphologie**

$$K = \sigma Y \sqrt{a}$$

facteur d'intensité des contraintes (FIC)

- = Loi de probabilité sur les **tailles initiales de défauts**
- + **Tailles critiques de défaut**



Durée de vie des fibres

Bibliographie

- **Défauts de surface**

- **Propagation sous-critique**

- Cas de la corrosion des verres [Wiederhorn, 1969] [Lawn, 1974]
 - Physique "simple" (matériau amorphe, réaction active)
 - **Loi physiquement motivée**

$$\frac{da}{dt} = \alpha p \exp\left(\frac{\beta K}{kT}\right)$$

FIC
température
pression

- Cas de l'oxydation des fibres **Hi-Nicalon** [Lamon *et al.*, 2007, 2009]
 - Physique "complexe" (matériau granulaire, réaction passive)
 - **Loi phénoménologique de Evans-Wiederhorn**

$$\frac{da}{dt} = v_0 \cdot K^n$$

dépendance phénoménologique:
température, pression, etc

Durée de vie des fibres

Bibliographie

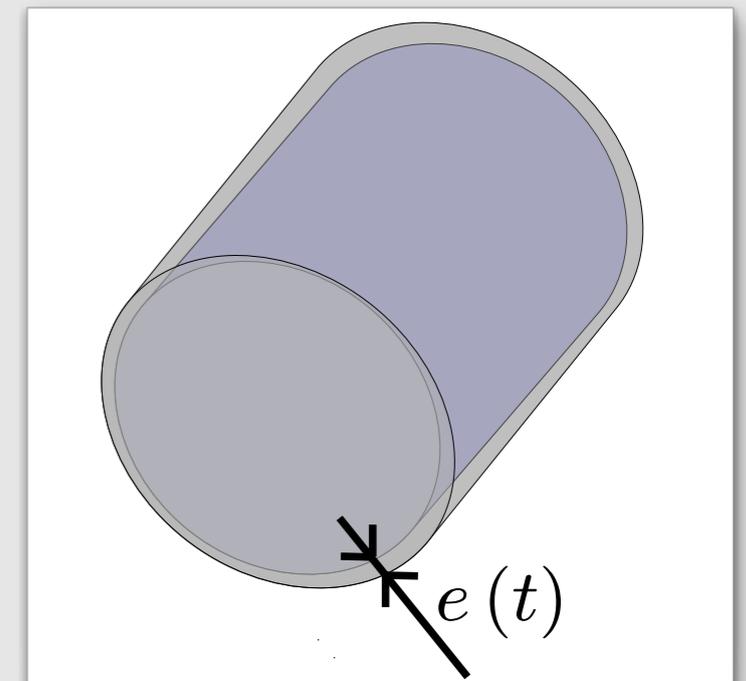
- Défauts de surface

- Propagation sous-critique

- Couche d'oxyde

- Modèle de Deal-Grove [Deal et Grove, 1965]
[Boyer et Rebillat, 2005] [Laforêt et Lamon, 2009]

$$\frac{de}{dt}(t) = \frac{\rho}{M} \cdot \frac{\overset{\text{réaction}}{k(t) c_0(t)}}{1 + \underset{\text{diffusion}}{k(t) e(t) / D(t)}}$$



Durée de vie des fibres

Problématique

● Motivations

- Chargement de type "composite"
 - **Réactions multiples** (oxydation, corrosion, ...)
 - **Variations de température, pression, contrainte, ...**

● Approches existantes

😊 Défauts de surface: **OK**

☹ Propagation sous-critique:

- *Approche micro: **structure granulaire?***
- *Approche phénoménologique: **identification? couplage couche d'oxyde?***

😊 Couche d'oxyde: **OK**

● Approche proposée [Ladevèze et Genet, 2010]

- **Dégradation** du matériau par **oxydation**
- **Propagation** pilotée par la **mécanique de la rupture**
- **Couplage** avec le modèle de la **couche d'oxyde**

Durée de vie des fibres

Propagation sous-critique

- Loi de propagation: mécanique de la rupture

$$K(a(t)) = K_{sc}(a(t), t)$$

facteur d'intensité des contraintes sous-critique

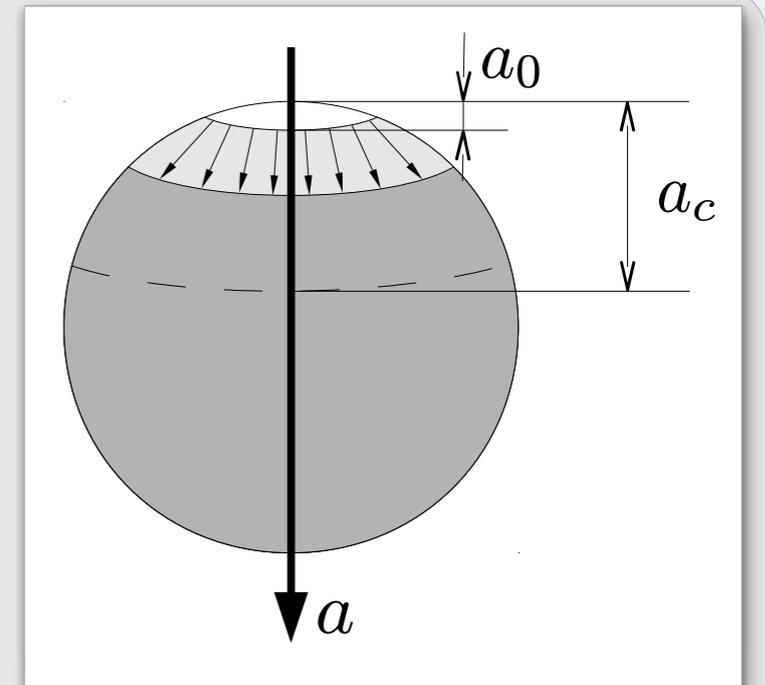
- Loi de dégradation

$$\begin{cases} K_{sc}(x, t = 0) = K_c \\ \dot{K}_{sc}(x, t) = -f(\phi_r(x, t)) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{K_{sc}(t)}{K_c} = \lambda \left(\frac{\dot{a}(t)}{\phi_0(t)} \right)^n$$

paramètres scalaires

flux d'oxygène à la surface



Loi de type Evans-Wiederhorn:

$$\dot{a}(t) = \frac{\phi_0(t)}{\lambda^{1/n} K_c^{f^{1/n}}} \cdot K(a(t))^{1/n}$$

Durée de vie des fibres

Identification (fibres Hi-Nicalon)

- **Défauts de surface**

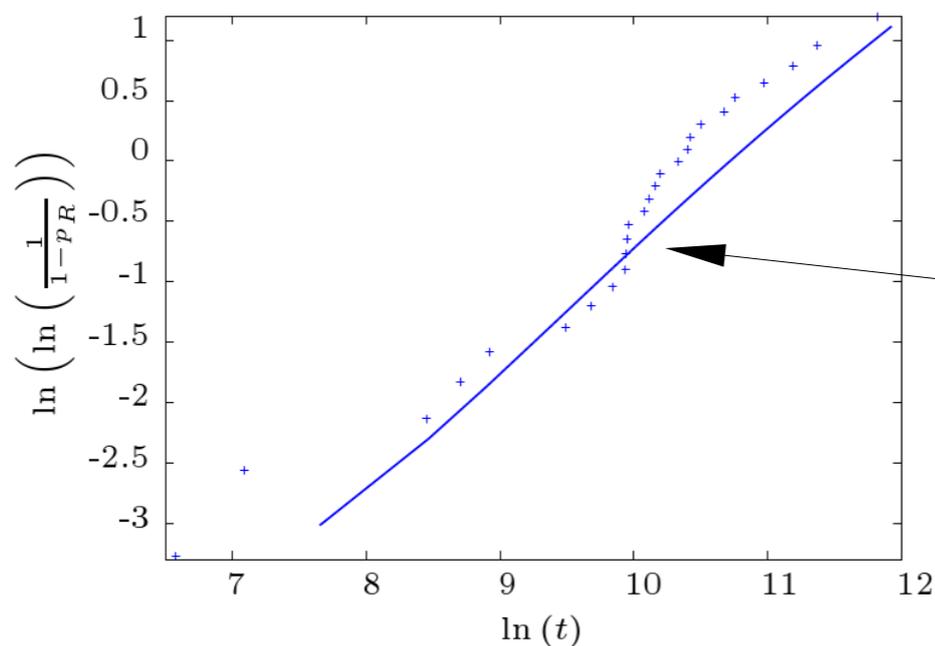
- Données expérimentales de [Gauthier et Lamon, 2007]

- **Couche d'oxyde**

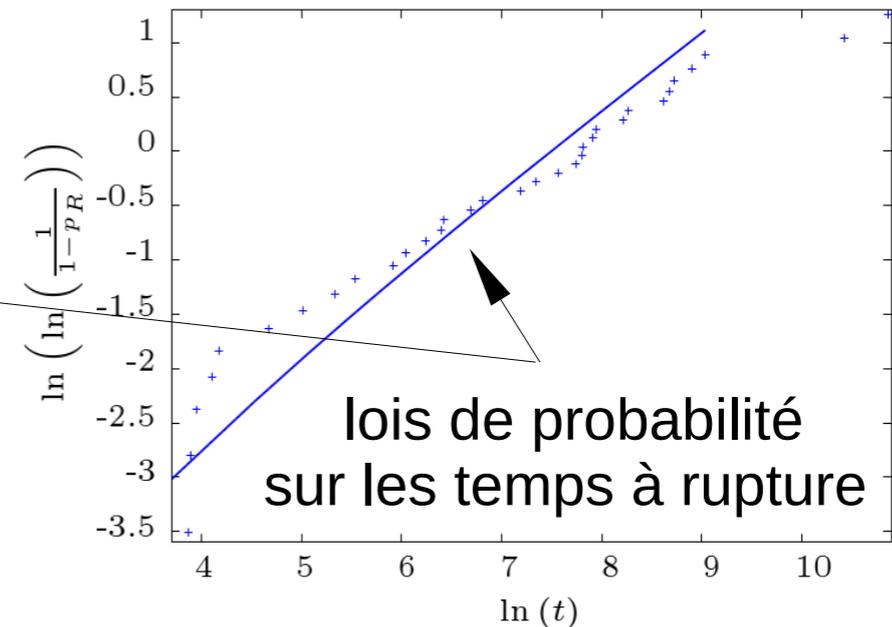
- Données expérimentales de [Boyer et Rebillat, 2005]

- **Propagation sous-critique**

- Données expérimentales de [Gauthier et Lamon, 2007]



(a) $T = 500^\circ C, \sigma = 1500 MPa$

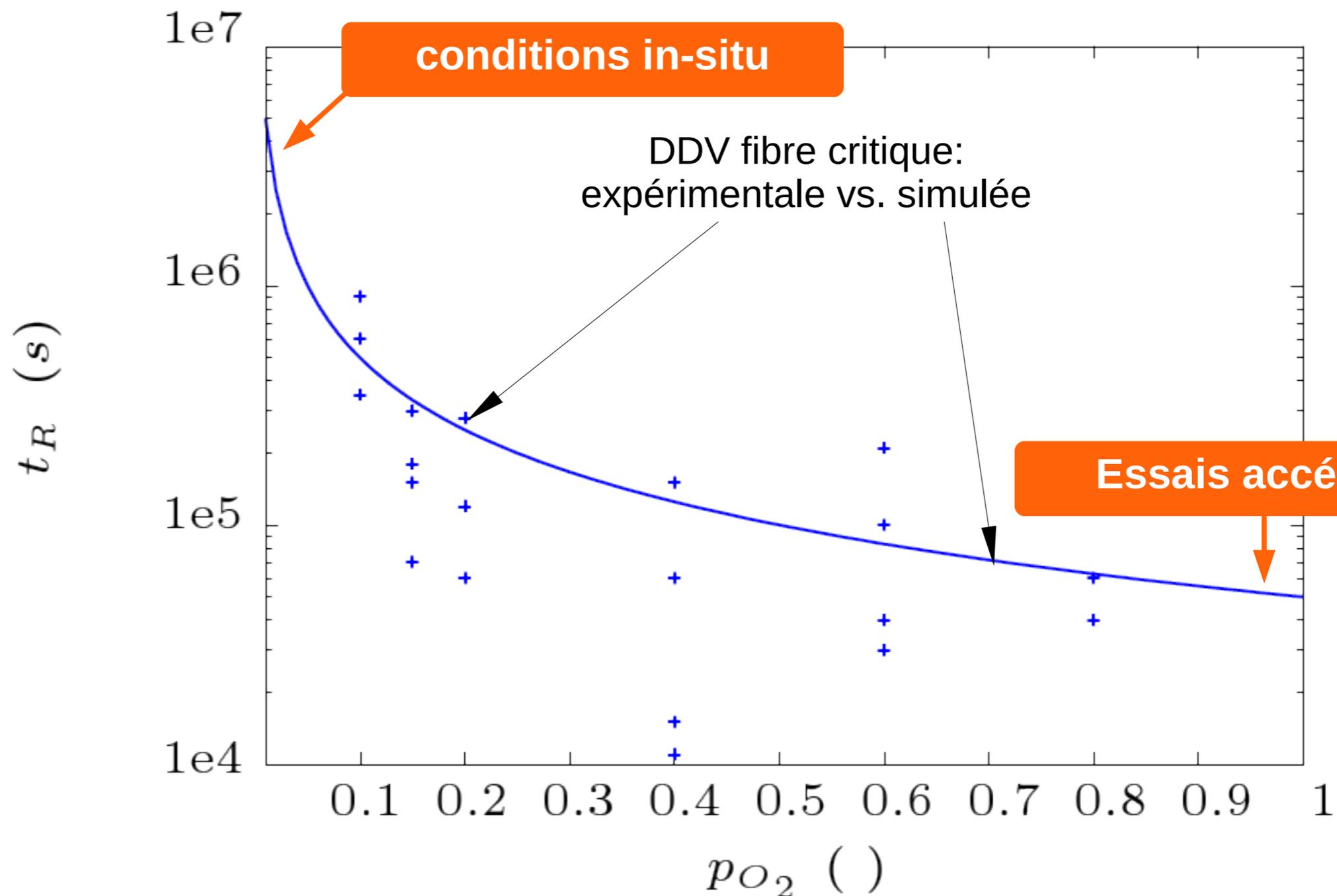


(b) $T = 800^\circ C, \sigma = 1100 MPa$

Durée de vie des fibres

Élément de validation

- Dépendance à la pression d'oxygène extérieure
 - Données expérimentales de [Gauthier et Lamon, 2007] sur mèches de fibres



Durée de vie des fibres

Bilan 3/3

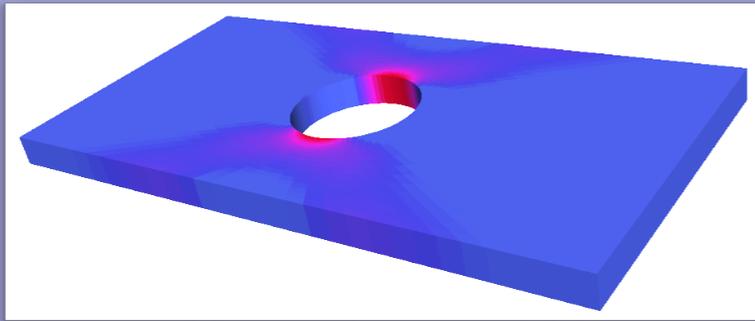
- ☺ Nouvelle approche de la **propagation sous-critique**
 - ☺ Formulation **intrinsèque**
 - **Propagation** (mécanique de la rupture)
 - **Dégradation** par oxydation/corrosion
 - **Environnement chimique**
 - ☺ **Unification**
 - Propagation **classique** / propagation **sous-critique**
 - Propagation contrôlée par la **réaction** / la **diffusion**

- ☺ Modèle de **durée de vie** pour les **fibres Hi-Nicalon**
 - ☺ Compatible avec les données expérimentales
 - À **basses et hautes températures**
 - À **différentes contraintes**
 - À **différentes pressions partielles d'oxygène**
 - ☹ **Validation à poursuivre**



Bilan, conclusions et perspectives

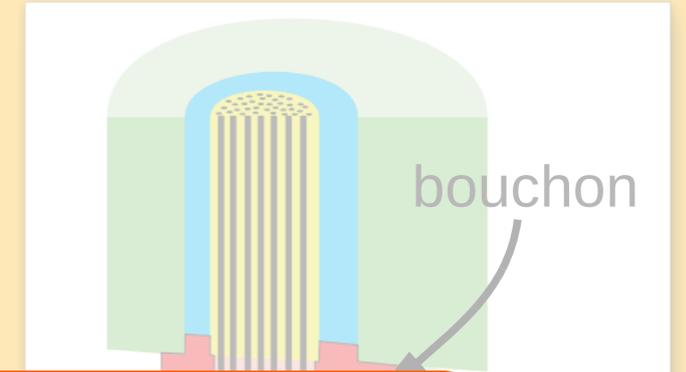
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres

Densité / Ouverture
des fissures

Échelle fibre



bouchon

Comportement macroscopique

Implémentation « robuste » et « efficace »
d'un modèle d'endommagement anisotrope et unilatéral
dans Coffee/LMT++ et dans Abaqus

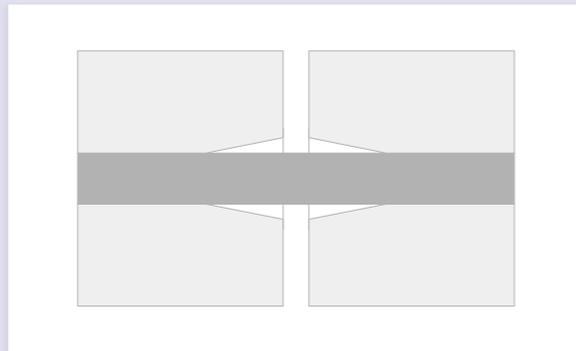
Illustration sur une éprouvette trouée



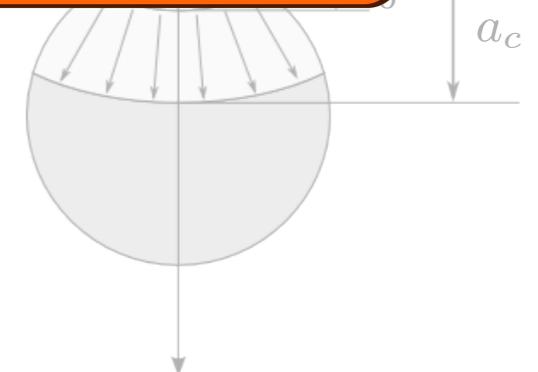
+ r



Échelle



fissures intra trans
+ ruptures fibres

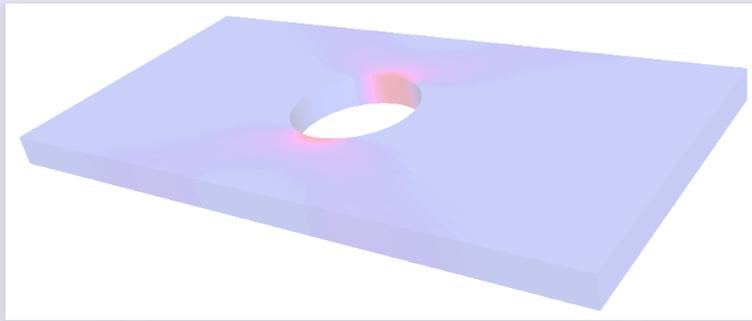


a_c

rupture sous-critique

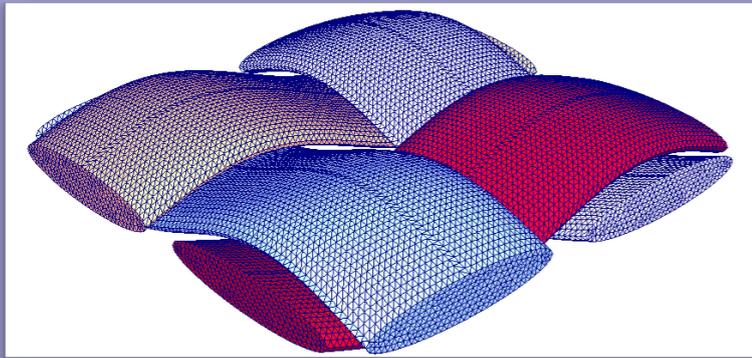
Bilan 2/3

Échelle composite



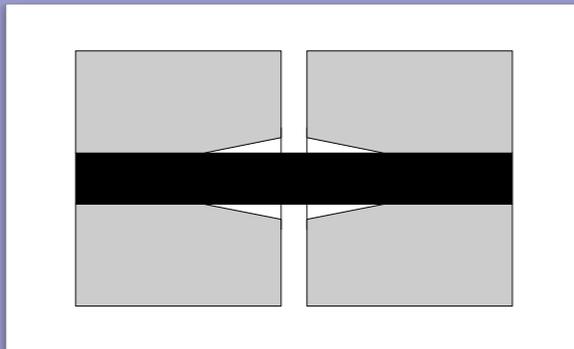
fissures
+ ruptures fibres

Échelle fil



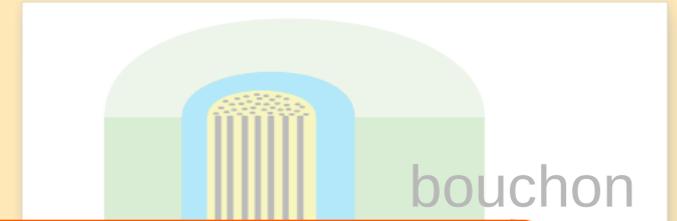
fissures
+ ruptures fibres

Échelle fibre



fissures intra trans
+ ruptures fibres

Échelle fibre



bouchon

Fissuration intra-fil transverse

Homogénéisation non linéaire d'une fissure frottante

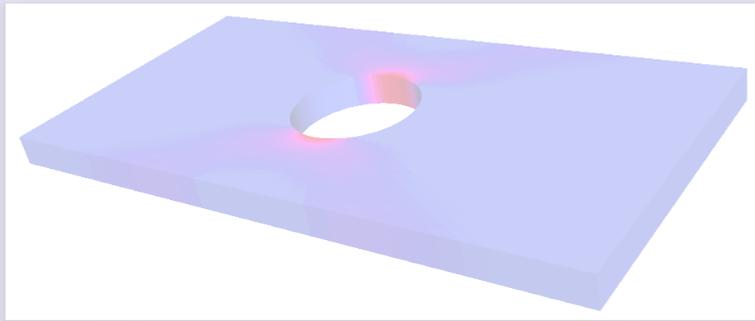
Modèle continu à l'échelle fil

Pont complet entre les grandeurs continues et discrètes

Illustration sur une cellule tissée

rupture sous-critique

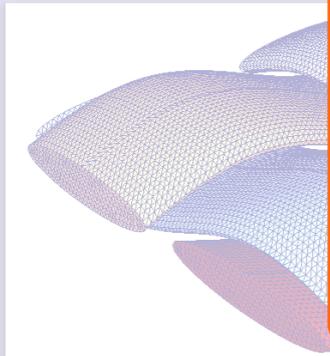
Échelle composite



fissures
+ rupt



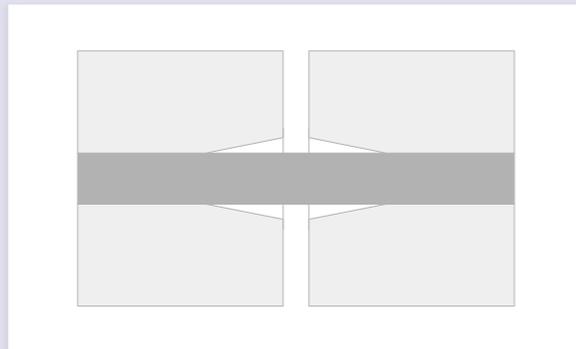
Échelle



fissures
+ ruptures fibres



Échelle fibre



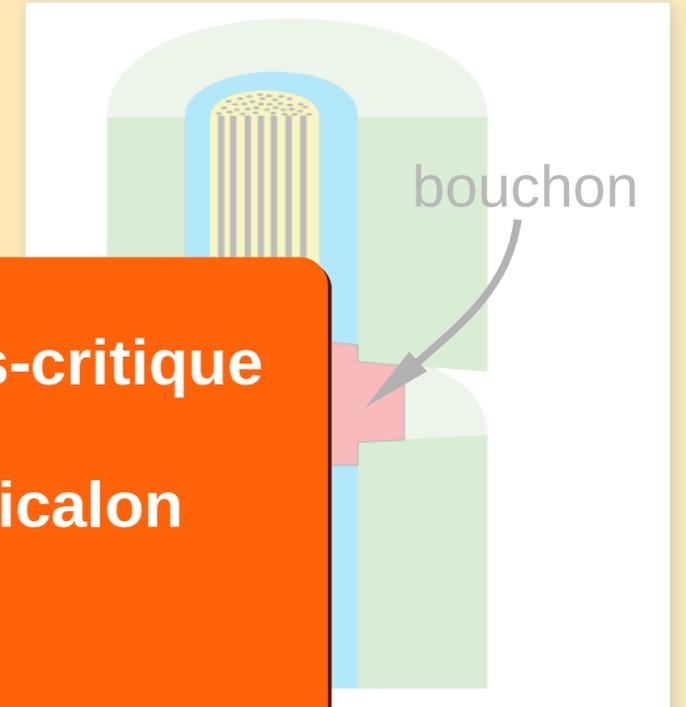
fissures intra trans
+ ruptures fibres

Nouvelle approche de la **propagation sous-critique**

Modèle de **durée de vie des fibres Hi-Nicalon**
[Ladevèze et Genet, 2010]

Élément de **validation**

Échelle fibre

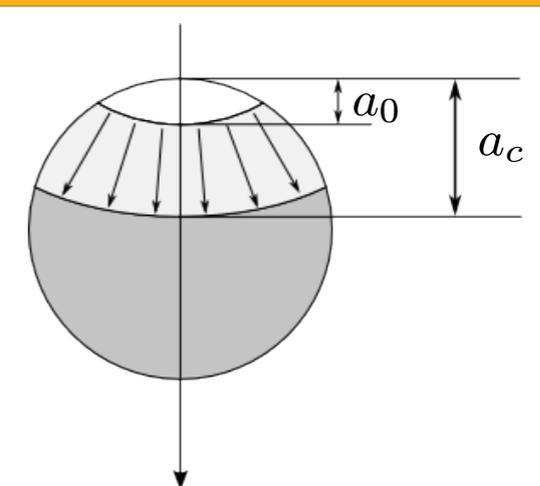


bouchon

matricielle

Ruptures fibres

Échelle fibre



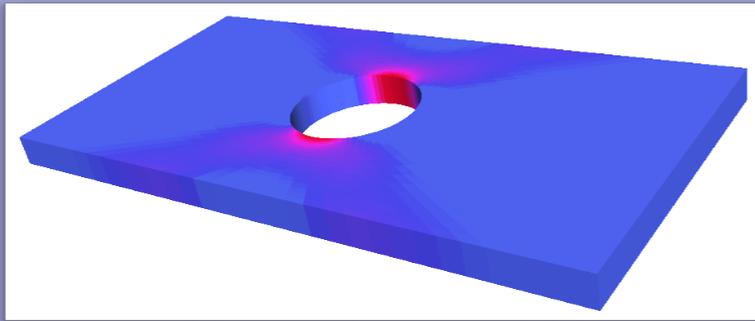
rupture sous-critique

Conclusions

- **Objectif général:** Un **matériau virtuel** pour les CMCs
 - Aujourd'hui, pour la communauté « modèle »: cadre théorique **structurant**
 - Demain: pour l'**ensemble** de la communauté?
- **Objectif 1:** Représentation « micro » des densités/ouvertures de **fissures**
 - Approche satisfaisante pour la **fissuration intra-fil transverse**
 - Mais le reste?
- **Objectif 2:** Représentation « micro » de la dégradation des **fibres** par oxydation
 - Approche satisfaisante
 - Validation?

Perspectives

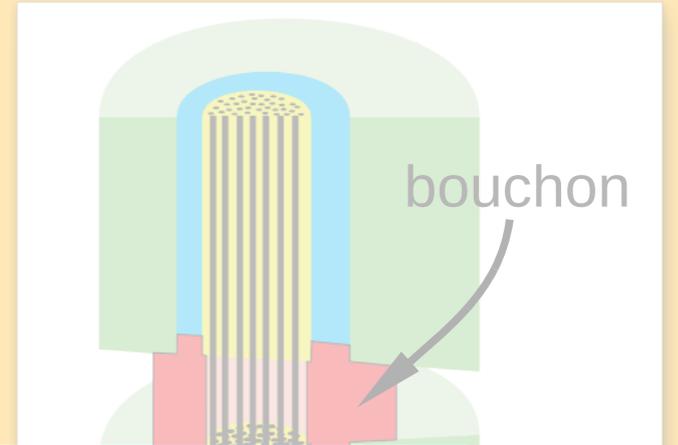
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres

Densité / Ouverture
des fissures

Échelle fibre



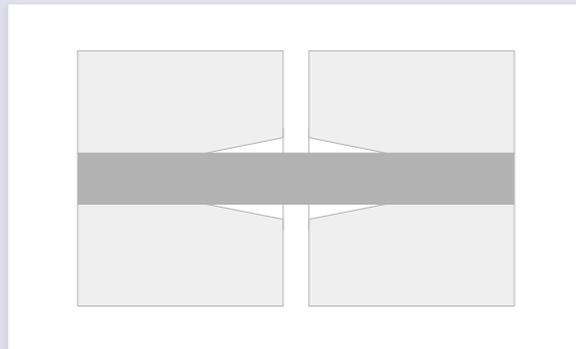
bouchon

Calculs jusqu'à rupture d'éprouvettes industrielles (trouée, entaillée, CT, ...): lois d'évolution, localisation, inversion RdC

+ ruptures fibres

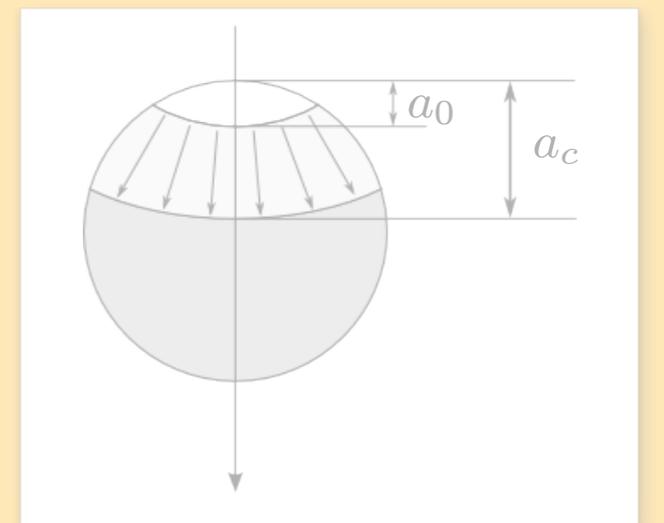
Ruptures fibres

Échelle fibre



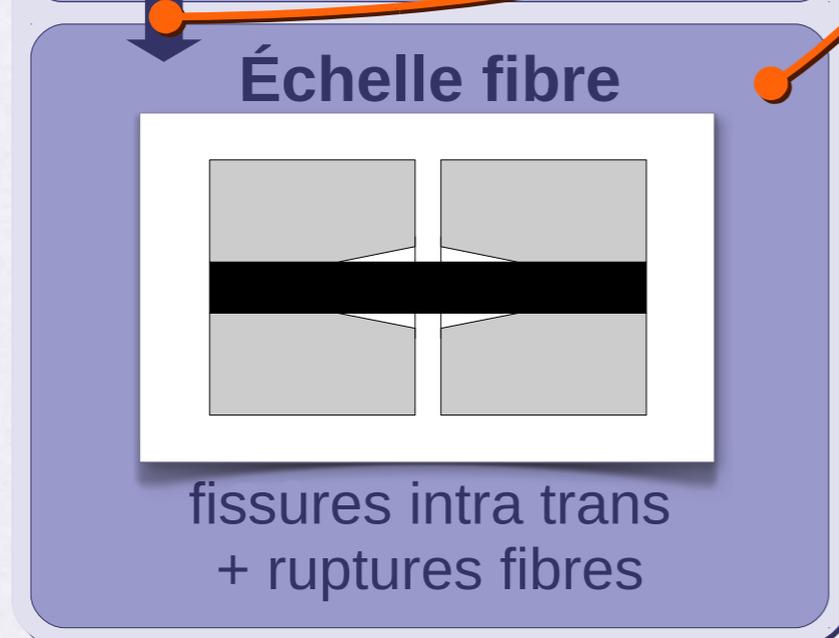
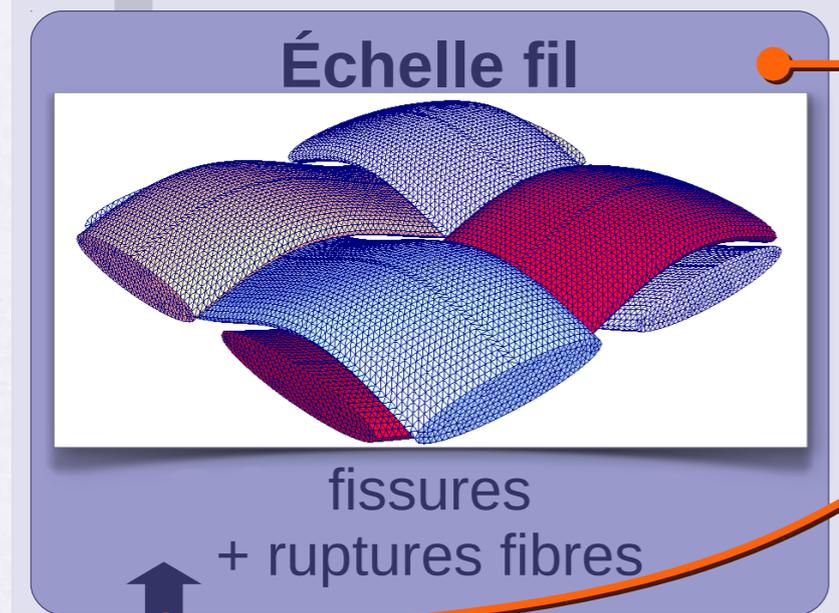
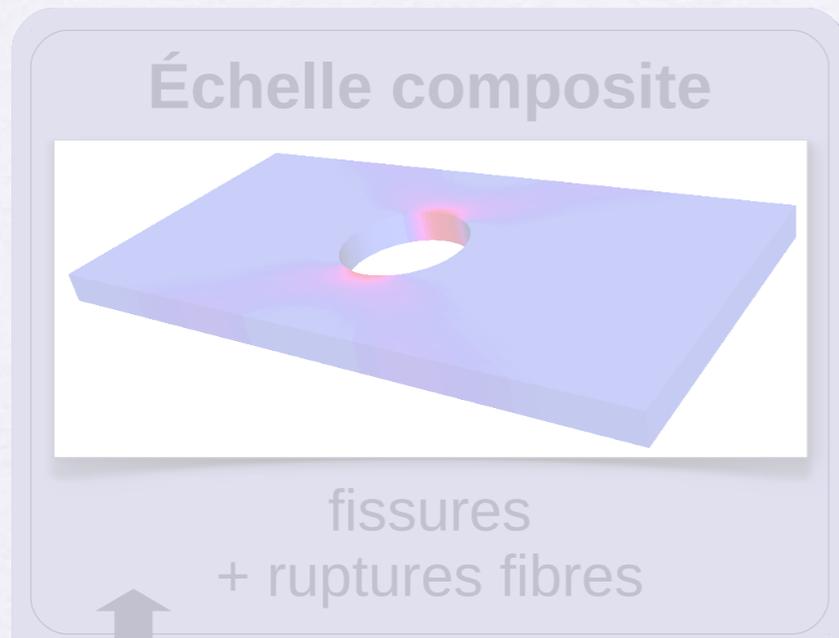
fissures intra trans
+ ruptures fibres

Échelle fibre

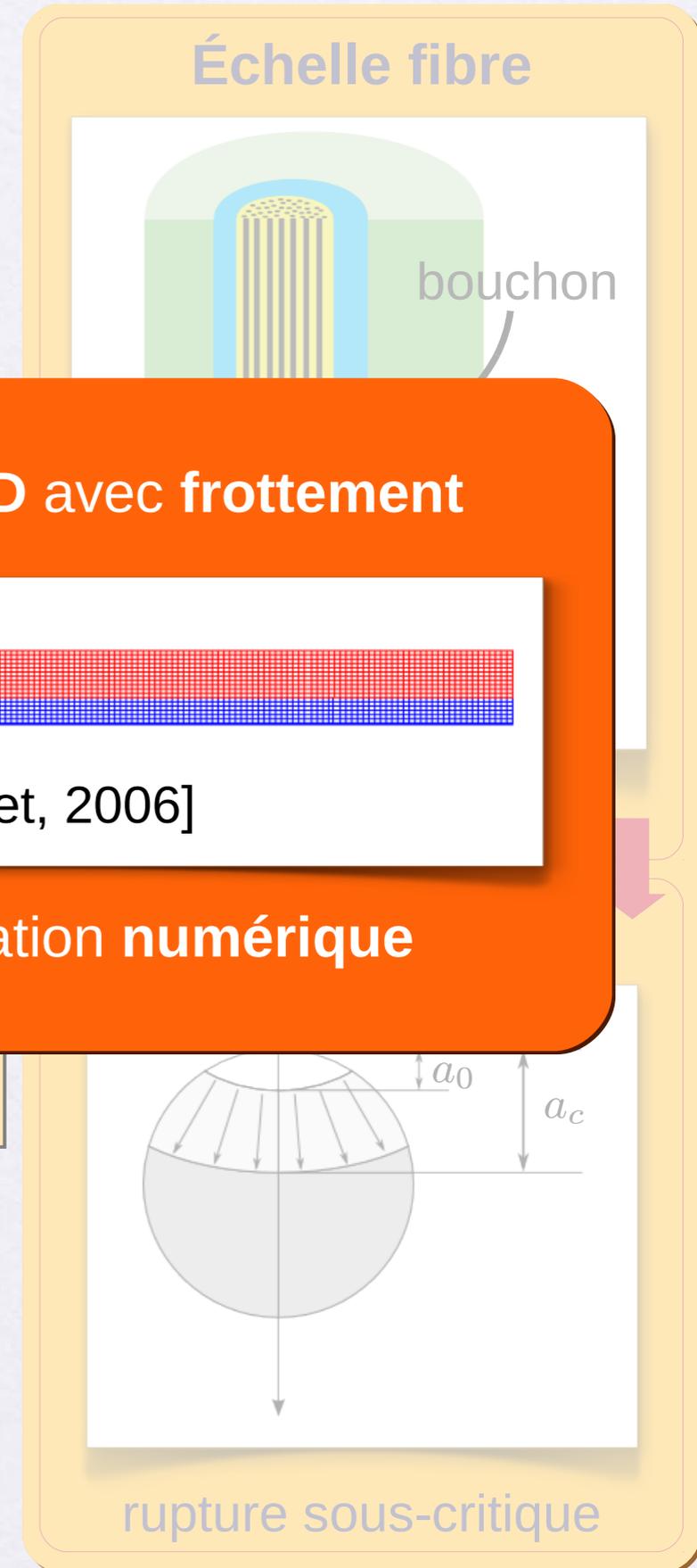
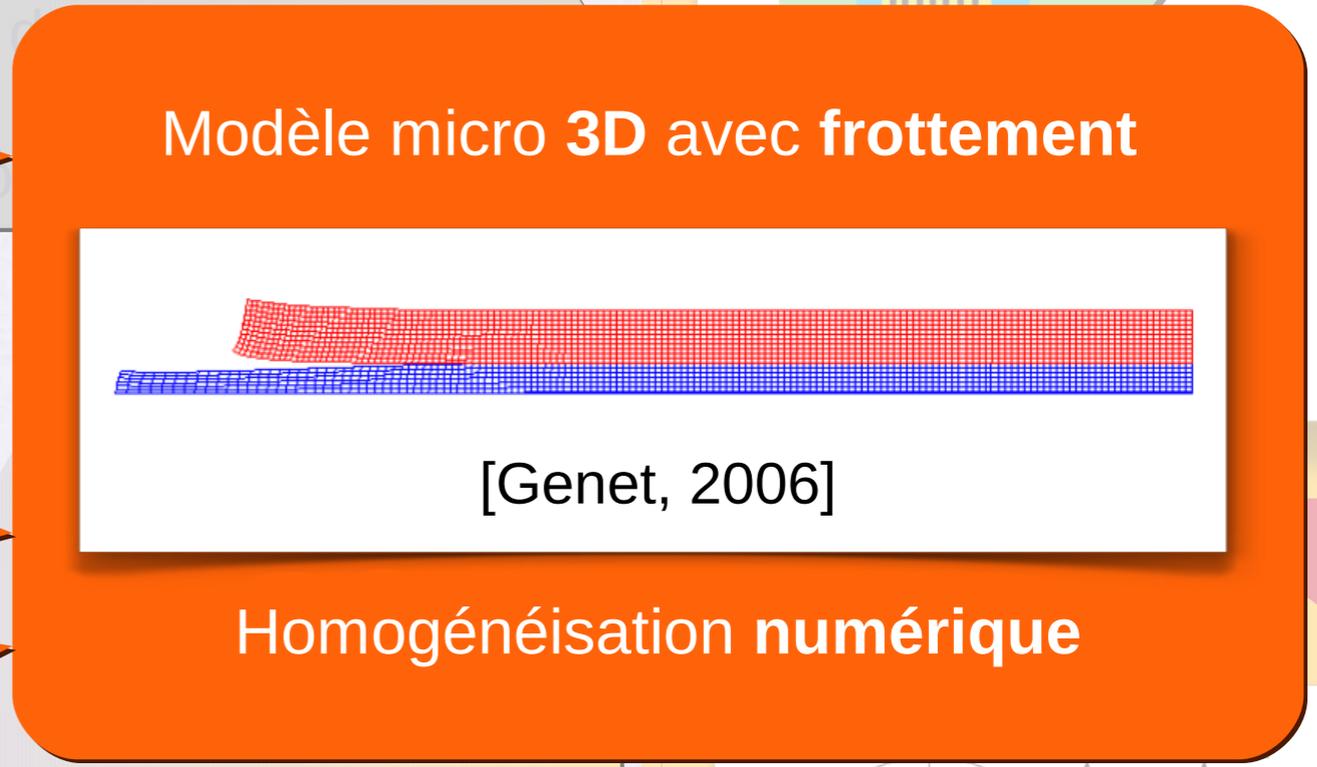


rupture sous-critique

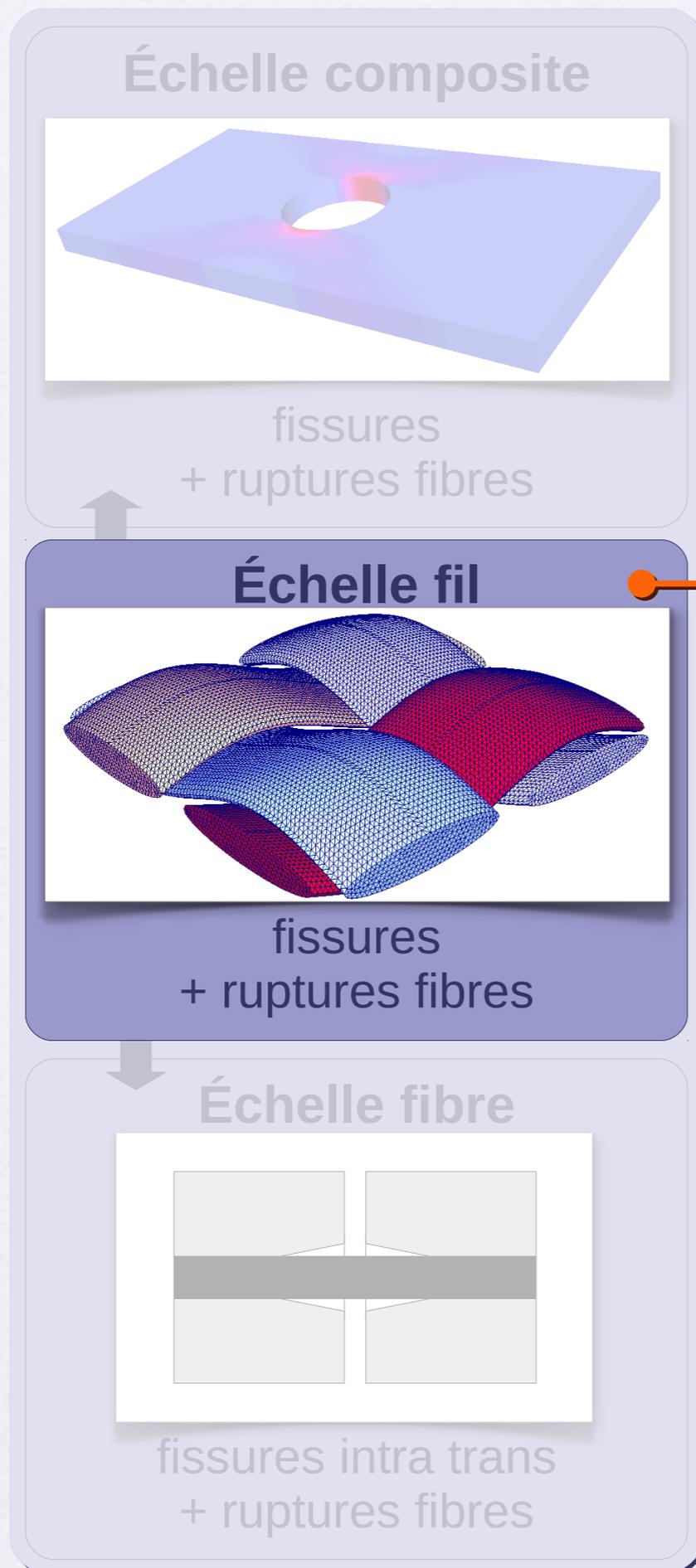
Perspectives



Densité / Ouverture



Perspectives



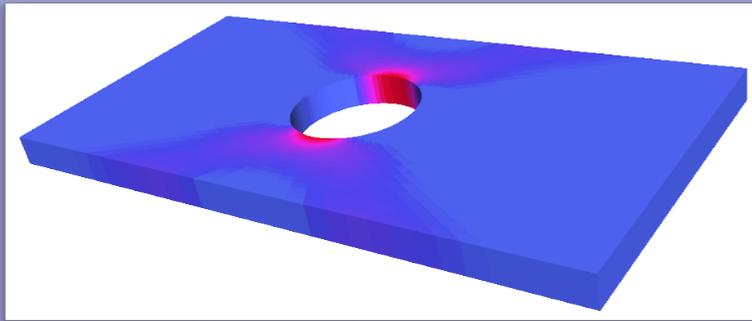
Description morphologique

- Fissuration inter-fil
- Fissuration intra-fil longi
- Décohésion fil-matrice



Perspectives

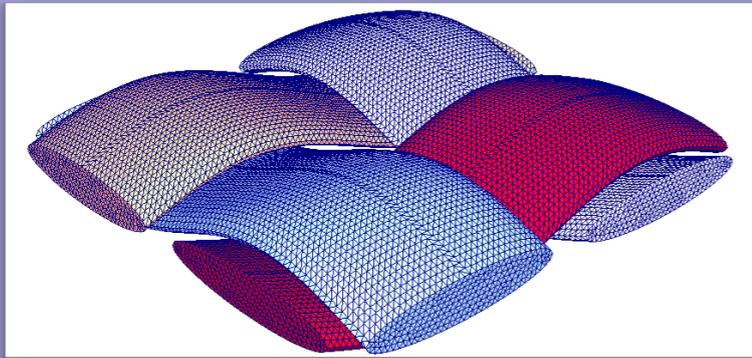
Échelle composite



fissures
+ ruptures fibres



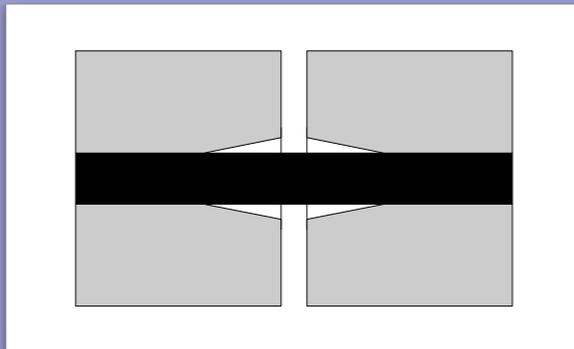
Échelle fil



fissures
+ ruptures fibres



Échelle fibre



fissures intra trans
+ ruptures fibres

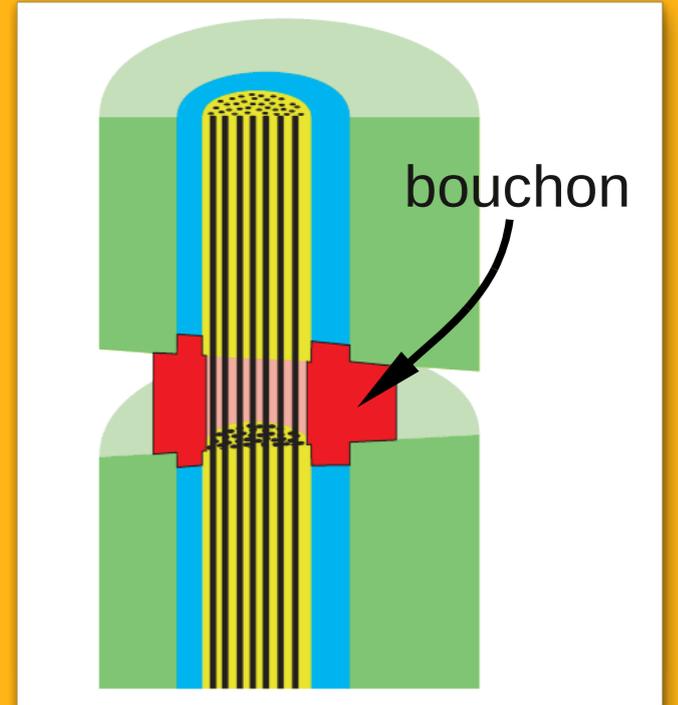
Densité / Ouverture
des fissures

Contraintes fibres

Matériau virtuel

Ruptures fibres

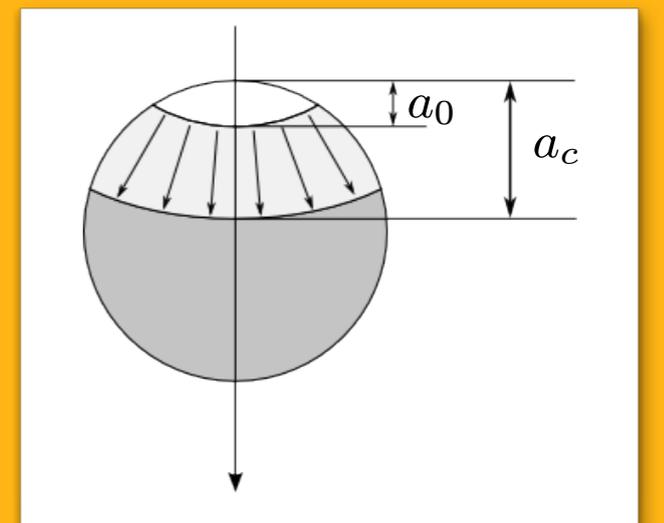
Échelle fibre



bouchon

cicatrisation matricielle

Échelle fibre



rupture sous-critique

[Soutenance de thèse, 26 mars 2010]



Vers un matériau virtuel pour les composites céramiques

Martin Genet

LMT-Cachan (ENS-Cachan / CNRS / Université Paris VI / PRES Universud Paris)



Snecma Propulsion Solide
Groupe SAFRAN

