SYNTHESE DES TRAVAUX DU GROUPE MECAMAT
« INTERFACES DANS LES MILIEUX SOLIDES »

D. Leguillon, E. Martin

http://www.lmm.jussieu.fr/MEMBRES/LEGUILLON/mecam.html

MECANIQUE / MATERIAUX

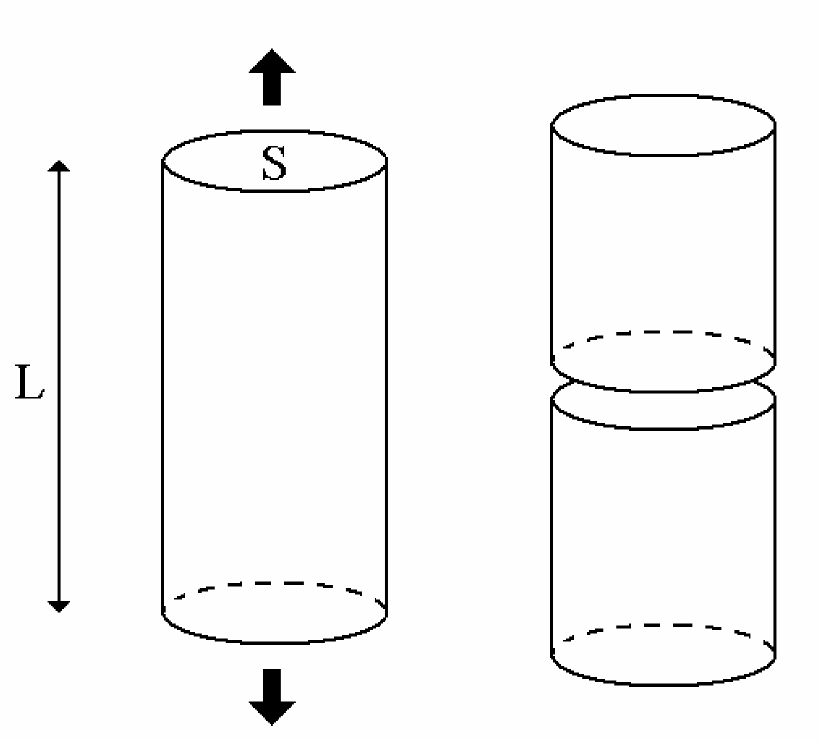
MODELISATION / ESSAIS

INTERFACE / INTERPHASE

RUPTURE / ENDOMMAGEMENT

- adhérence, adhésion
- collage
- concentration de contraintes, singularités
- contraintes résiduelles
- couches minces, interphases
    - barrières thermiques
    - oxydation
    - revêtements
- endommagement
    - modèles type « LMT »
    - modèles de zone cohésive
- rupture
    - critères, initiation, <u>longueur</u>
    - délaminage
    - déviation, décohésion
    - rupture dynamique

RUPTURE D'UN BARREAU EN TRACTION



- ε_a déformation appliquée $\Rightarrow \sigma_a = E\varepsilon_a$ effort appliqué,
- E module d'Young

Variation d’énergie potentielle :

$$-\delta W_p = W_p = \frac{1}{2}\ SL\ \frac{\sigma_a^2}{E}$$

Critère en énergie (G_c ténacité) :

$$\frac{1}{2}\ SL\ \frac{\sigma_a^2}{E} \geq G_c S \quad \Rightarrow \quad \sigma_a \geq \sqrt{\frac{2EG_c}{L}}$$

Paradoxe : quel que soit l’effort appliqué et quelle que soit la section du barreau, il se rompt s’il est suffisamment long !

→ Lorsque le barreau est long, ce n’est pas le critère en énergie qui gouverne la rupture mais le critère en contrainte :

$$\sigma_a \geq \sigma_c$$

Il existe une longueur minimale L_0 telle que la situation se renverse :

$$L_0 = \frac{2EG_c}{\sigma_c^2}$$

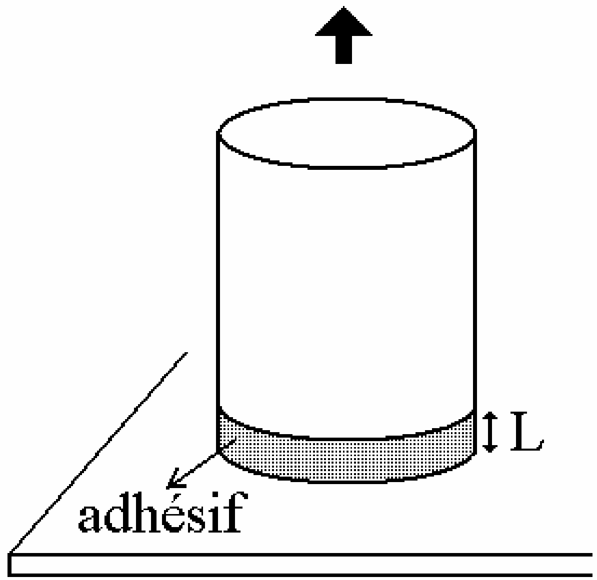
Quand $L \geq L_0$ (critère en contrainte), la rupture produit de l'énergie cinétique :

$$\delta W_k = W_p - G_c S = G_c S \,\frac{L - L_0}{L_0}$$

Si $L \leq L_0$ c'est le critère en énergie qui gouverne. Il faut augmenter la contrainte appliquée $\sigma_a = \sigma_c \sqrt{\frac{L_0}{L}}$ pour obtenir la rupture.

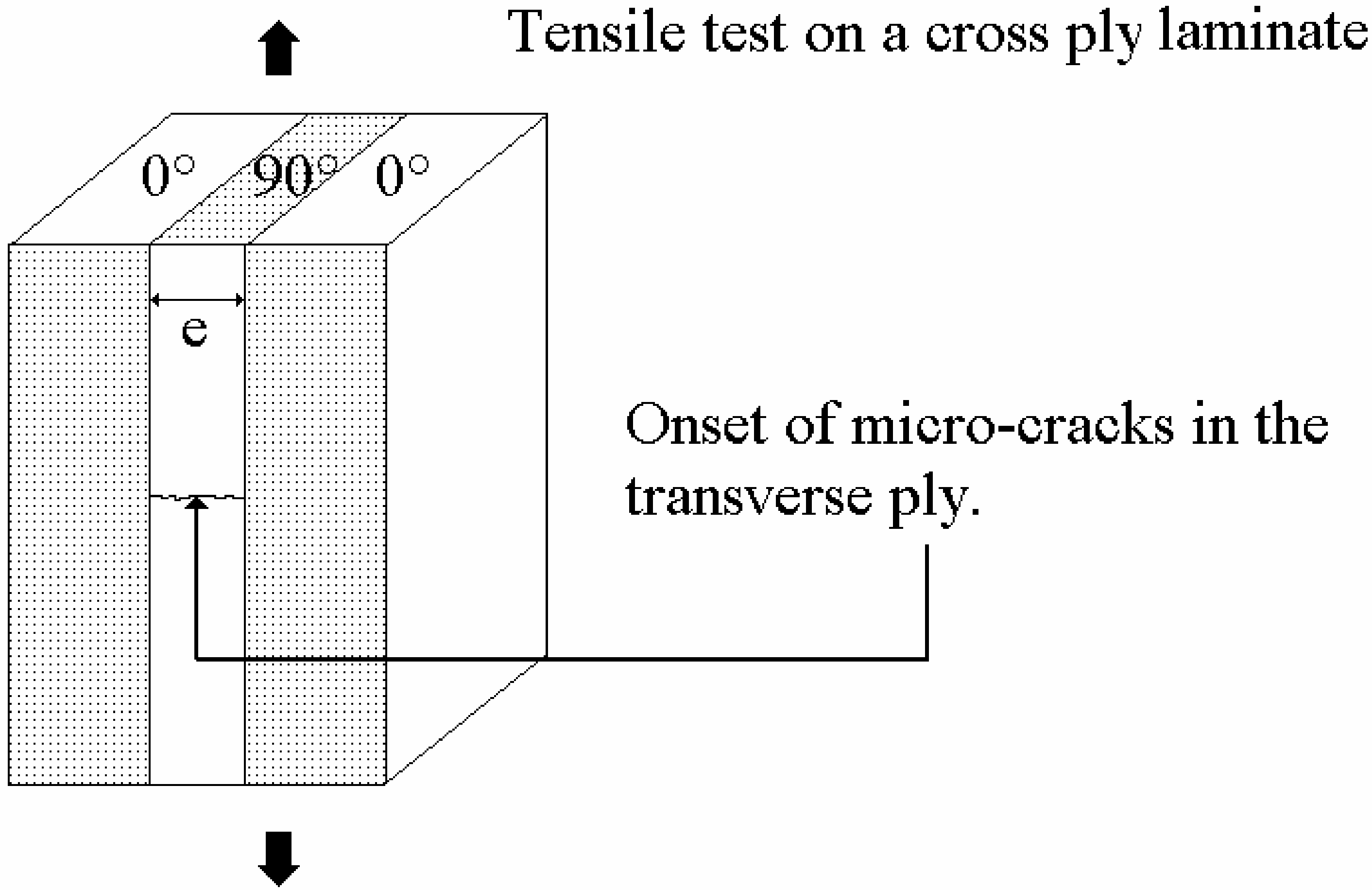
Il existe des confirmations expérimentales de cet effet de volume.

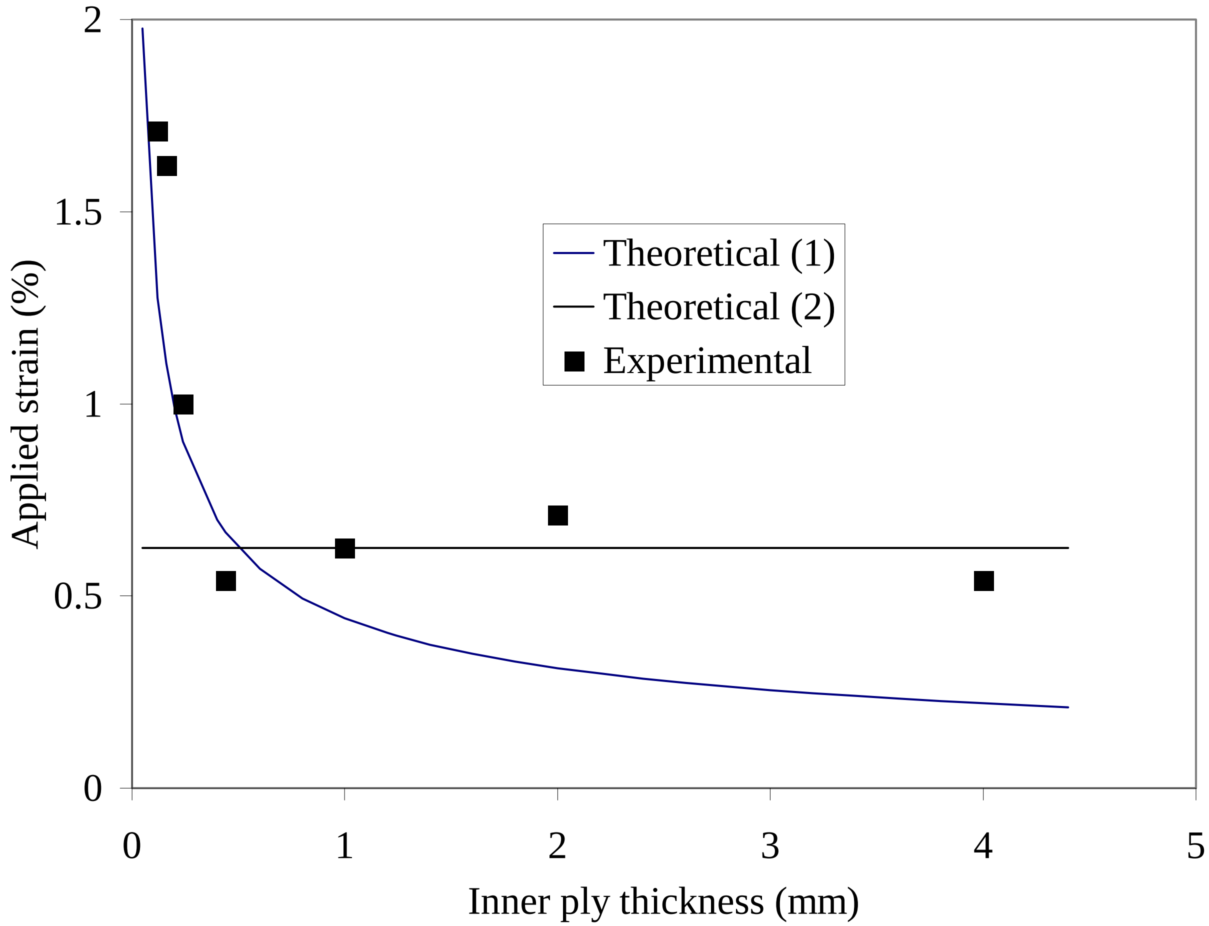
C. Creton (Aussois, 2003) : test de traction sur couche confinée.



« En fait ce que nous voyons est que pour les couches épaisses le critère semble être un critère de contrainte critique (ce que nous interprétons comme dû au fait que le critère en énergie est toujours satisfait). Par contre pour les couches minces la rupture se fait pour des contraintes d'autant plus élevées que la couche est mince => critère plutôt d'énergie. » (C. Creton, 20 mars 2003)

PARVIZI, GARETT AND BAILEY EXPERIMENTS (1978).





Applied strain at onset of the first micro-crack in the transverse ply *vs*. inner ply thickness.

Parvizi *et al.*, using the shear-lag model showed that the change in potential energy prior and after the onset of the first transverse crack writes

$$-\delta W_p = A\sigma_a^2\, e^2\, d$$

- A scaling coefficient
- σ_a applied stress
- d sample thickness (plane elasticity)

The energy criterion gives

$$A\sigma_a^2\, e^2\, d \geq G_c\, e^2\, d \quad \Rightarrow \quad \sigma_a \geq \sqrt{\frac{G_c}{Ae}}$$

There are two regions in the above figure:

- the right part governed by the stress criterion,
- the left part governed by the energy criterion.

However, both are always fulfilled but one hides the other.

The ply thickness :

$$e_0 = \frac{G_c}{A\sigma_c^2}$$

plays a particular role: below, the energy criterion governs the fracture and there is no kinetic energy production ; above, the stress criterion is predominant and there is additional kinetic energy

$$\delta W_k = -\delta W_p - G_c\ e\ d = G_c\ e\ d\ \frac{e - e_0}{e_0}$$

<u>Influence des défauts</u> ? Effets d’échelles, Weibull.

CRITERE FRANCFORT-MARIGO

1998 (J. Mech. Phys. of Solids) : minimiser l'énergie potentielle + l'énergie de surface.

$$\text{Min}\,(W_p(s) + G_c s)$$

où s est la surface fracturée : $s = 0$ ou S, $W_p(0) = W_p$, $W_p(S) = 0$.

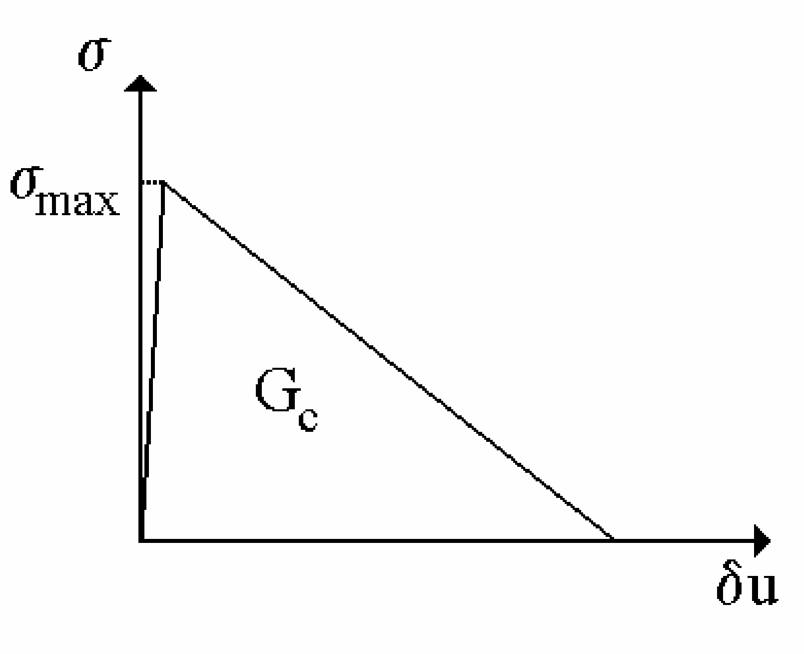
Tant que $W_p \leq G_c S$, le minimum est réalisé pour $s = 0$. Quand $W_p \geq G_c S$, le minimum est obtenu avec $s = S$ et $W_p = 0$. On retrouve alors le paradoxe précédent.

→ Condition de convexité sur l'énergie donnant une condition d'arrêt (Bilteryst, Marigo, 1999, Cr. Acad. Sci.), (Martin, 2003, LCTS)

→ Critère de Barenblatt obligeant à prendre en compte en complément une contrainte maximale (Marigo 2002, ONERA).

MODELE DE ZONE COHESIVE

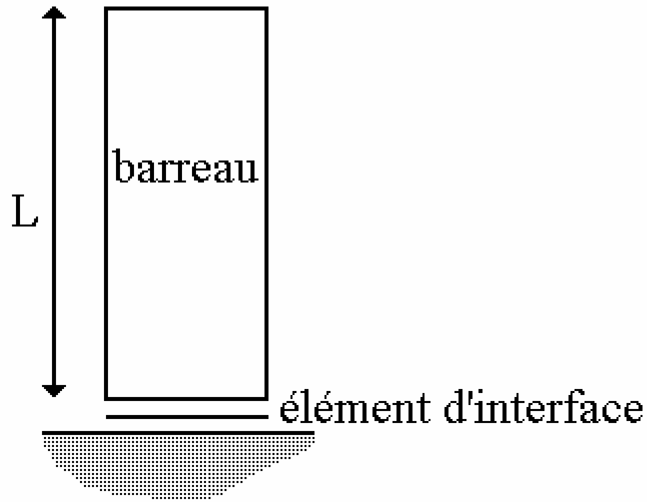
Modèle de Crisfield, loi de séparation d’interface :



Equation de la droite (endommagement)

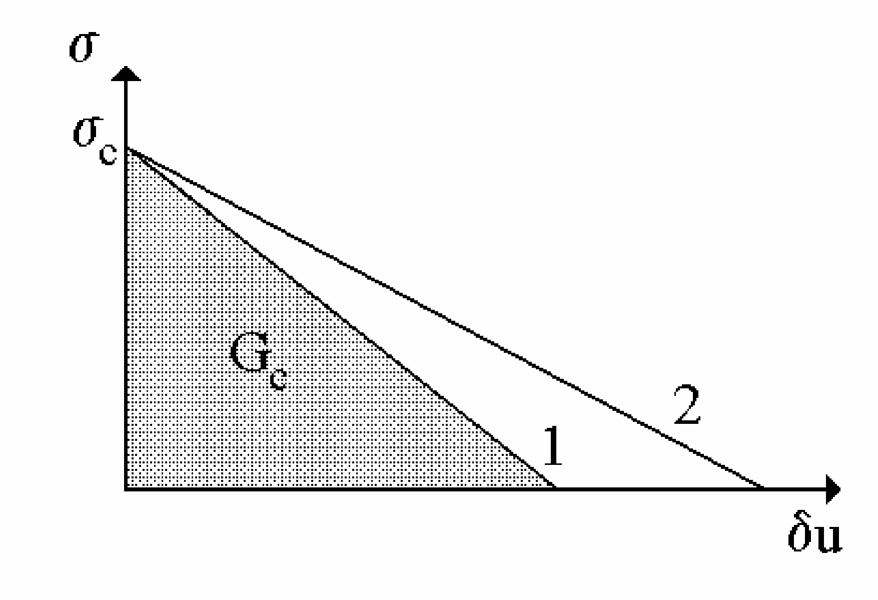
$$\sigma = -\frac{\sigma_{\max}^{2}}{2G_c}\delta u + \sigma_{\max} \qquad (1)$$

Monerie 2000, thèse, LMA (voir aussi Cangémi, Chaboche, Feyel, Needleman, Raous, Tvergaard …)



Allongement total :

$$\Delta U = \frac{\sigma_a L}{E} + \delta u \Rightarrow \sigma_a = \frac{E}{L}(\Delta U - \delta u) \qquad (2)$$



Les droites (1) et (2) coïncident si :

$$L_0 = \frac{2EG_c}{\sigma_c^2} \quad \text{et} \quad \sigma_{\max} = \sigma_c$$

(Carrère, 2003, ONERA)

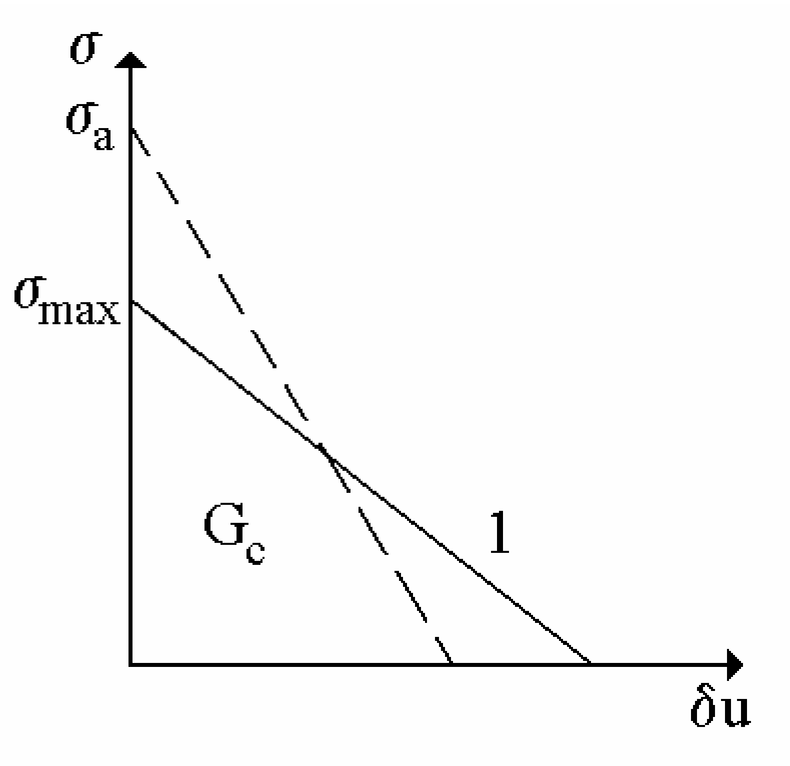
Si $L \geq L_0$ il y a saut de solution → critère en contrainte dominant, la surface entre les deux droites est la densité d’énergie cinétique :

$$\frac{\delta W_k}{S} = \frac{1}{2}\frac{\sigma_c^2}{E}(L - L_0) = G_c \frac{L - L_0}{L_0}$$

Doit-on faire des calculs dynamiques ? (Feyel, 2000)
Distinguer entre chargement dynamique (impact) et effets dynamiques

Si $L \leq L_0$ (?)

- d'après le modèle de Crisfield si δu augmente alors σ décroît en suivant la droite 1
- d'après le modèle de rupture il faut augmenter la contrainte appliquée $\sigma_a = \sigma_c \sqrt{L_0 / L}$.



$$\sigma_a = \sigma_c \sqrt{\frac{L_0}{L}}$$

Paramètres matériaux ou paramètres structures ?

Autres difficultés :
Si on impose de suivre la partie adoucissante (1) de la loi d'endommagement, le comportement global s'écrit

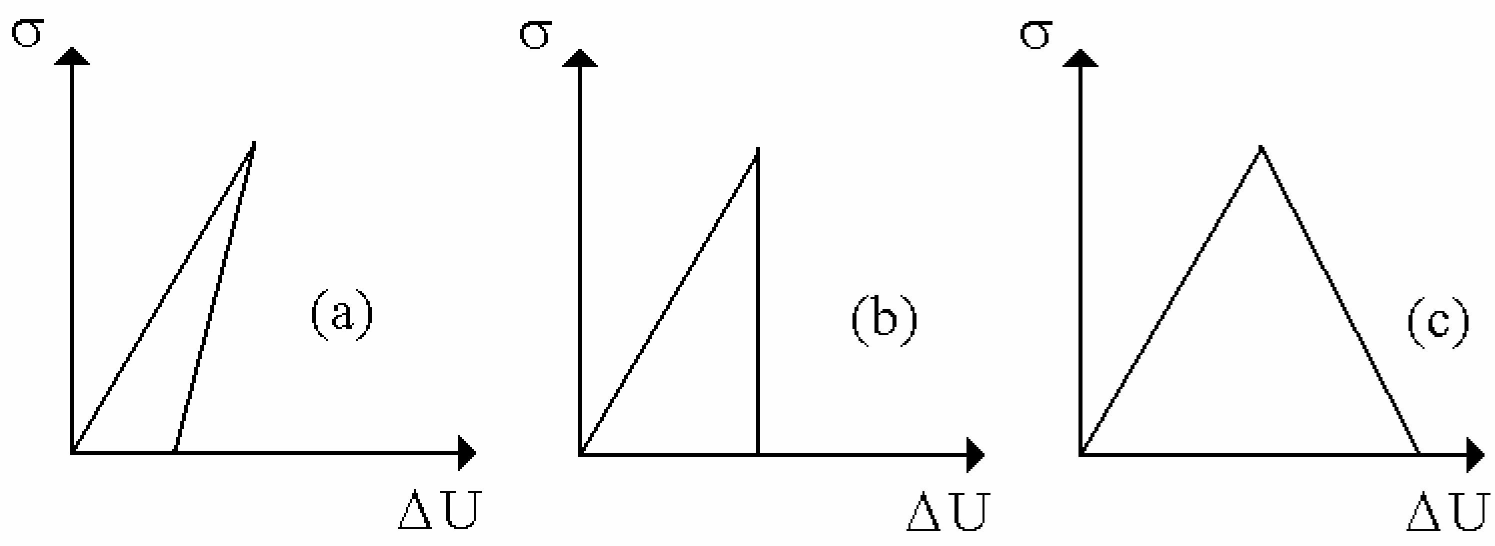
$$\sigma\left(\frac{L}{E}-\frac{2G_c}{\sigma_c^2}\right)=\Delta U-\frac{2G_c}{\sigma_c}$$

Alors si

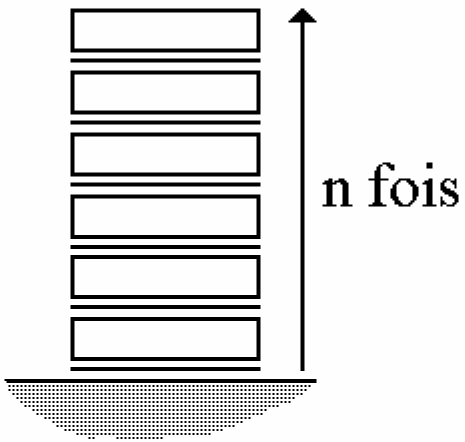
$L>\dfrac{2EG_c}{\sigma_c^2}$ → snap-back (figure (a))

$L=\dfrac{2EG_c}{\sigma_c^2}$ → rupture brutale (figure (b))

$L<\dfrac{2EG_c}{\sigma_c^2}$ → adoucissement (figure (c))


σ
(a)
ΔU
σ
(b)
ΔU
σ
(c)
ΔU

Dépendance au maillage



Pour $\sigma_a < \sigma_c$, avant endommagement :

$$\Delta U = \frac{\sigma_a L}{E} + n\delta u = \frac{\sigma_a L}{E} + n\frac{\sigma_a}{k} = \sigma_a\left(\frac{L}{E} + \frac{n}{k}\right)$$

k raideur initiale dans la loi de séparation.

→ fort effet de dépendance au « maillage » (Caliez, 2002, ONERA)