

# **Endommagement et rupture des matériaux**

## Endommagement et rupture des matériaux

Concevoir une pièce de structure

optimisation des performances en service

sûreté d'utilisation

→ {  
prévenir le risque de défaillance brutale  
maximiser la durée de vie en service

Analyser les sollicitations mécaniques

modes de chargement

présence de défauts géométriques

prévoir la propagation de défauts existants (inspections périodiques)

## Durcissement et renforcement des matériaux

### Plan du cours

Modes d'endommagement et de rupture macroscopiques

→ différentes familles de comportements

Description des fissures : mécanique de la rupture

→ mécanique linéaire et non linéaire

Prévision de la rupture immédiate sous chargement monotone (cf. TD)

Prévision de la rupture différée : fatigue, fluage, corrosion (TD)

## Modes de chargement d'une structure

### Chargement monotone

charge imposée, déplacement imposé

modes de défaillance : chargement limite, rupture

### Chargement cyclique (fatigue)

charge ou déplacement imposé

paramètres de chargement : amplitude, rapport de charge

durée de vie : nombre de cycles à rupture

### Chargement constant (fluage, corrosion sous contrainte)

phénomènes dépendant du temps : fluage, diffusion, corrosion

« hautes températures » :  $> 0.5$  fois la T de fusion

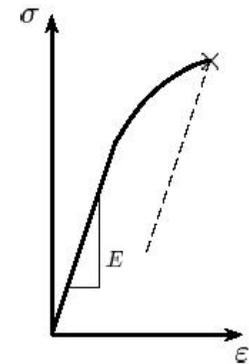
durée de vie : temps à rupture

## Modes de rupture

### Modes de rupture macroscopiques

comportement global de la structure, « mode de ruine »

exemples : fragile, quasi-fragile, ductile... : « signes précurseurs »



### Modes de rupture microscopiques

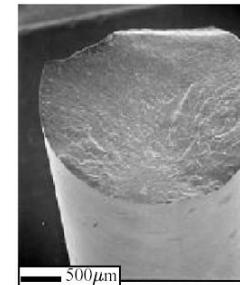
mécanismes de rupture à l'échelle de la microstructure

interprétation physique des observations microscopiques

surfaces de rupture

coupes transverses : évaluation de l'endommagement

exemples : fragile (clivage, intergranulaire), ductile, à stries...



Les grandes familles de matériaux se retrouvent dans toutes les classes

équivalence temps-température pour certains phénomènes

des mécanismes différents conduisent au même mode de rupture macro

## Modes de rupture macroscopiques

### Rupture élastique-fragile

faible déformation à rupture, pas de signe précurseur

exemples : céramiques massives, verres, certains bétons en traction...

### Rupture quasi-fragile

comportement non linéaire dû à un endommagement dissipatif

exemples : composites, bétons en compression voire en traction

### Rupture plastique fragile

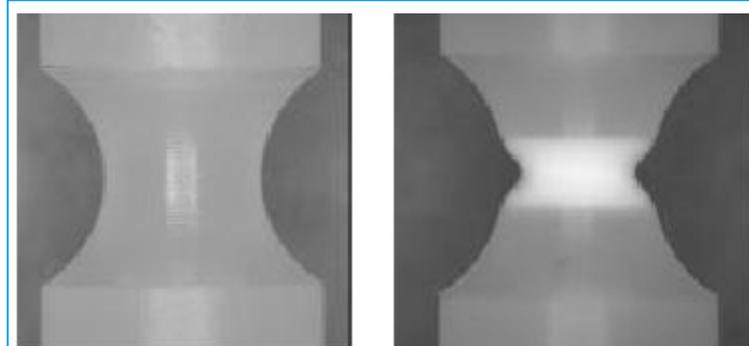
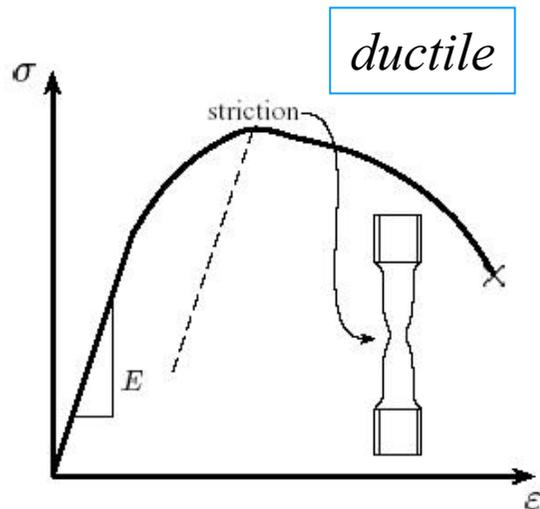
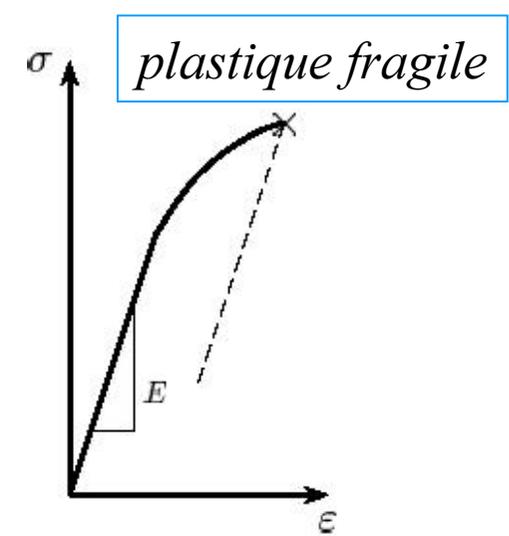
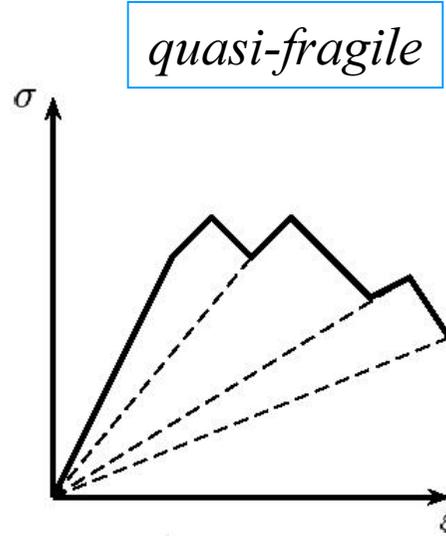
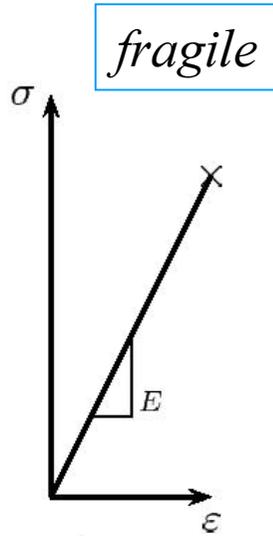
plasticité présente mais faible déformation à rupture

exemples : métaux cubiques centrés à basse température (Titanic)

### Rupture ductile

forte déformation à rupture, au moins locale (réduction d'aire)

exemples : métaux cubiques à faces centrées

**Modes de rupture macroscopiques**

avant essai

avant rupture

PVDF, traction à 20°C, M. Lafarge

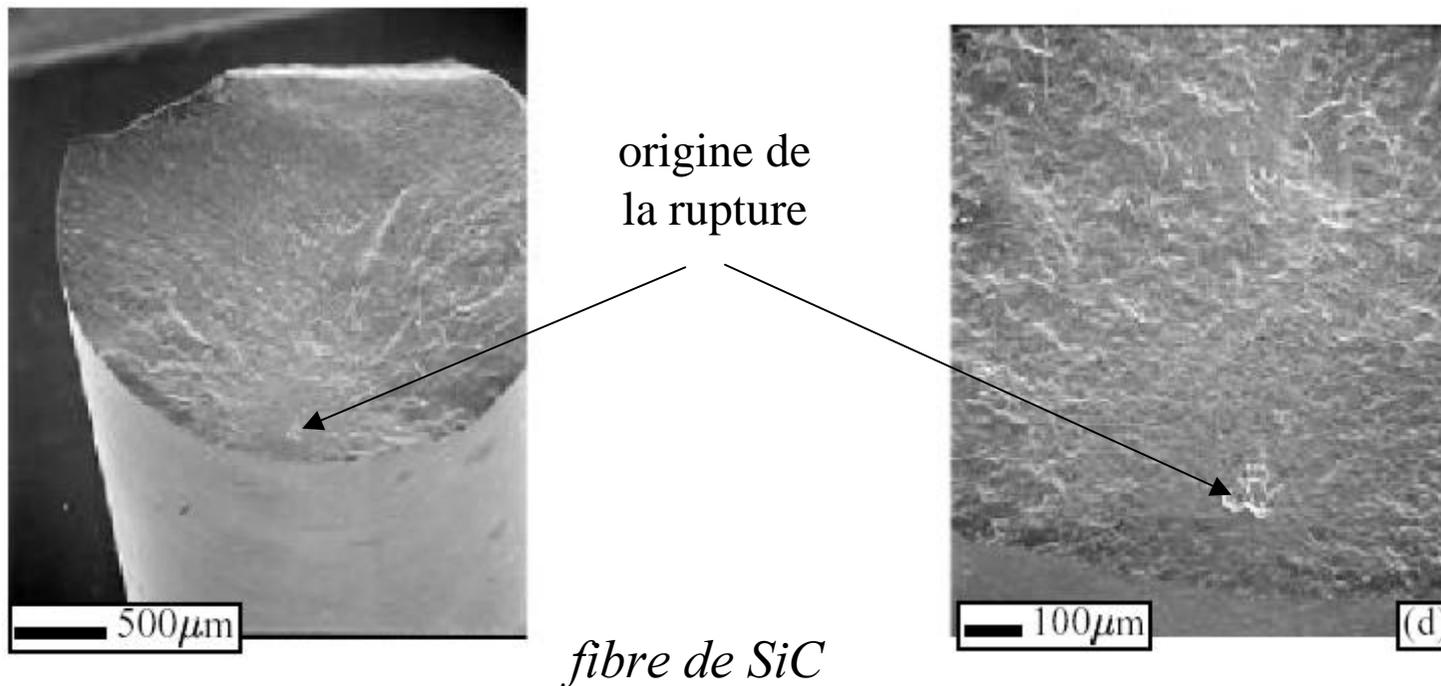
## Mécanismes de rupture microscopiques

### Rupture « fragile »

modes de rupture macro : fragile, plastique fragile

surface de rupture : souvent plate et lisse

amorçage sur un défaut (ou une fissure de fatigue)



## Mécanismes de rupture microscopiques

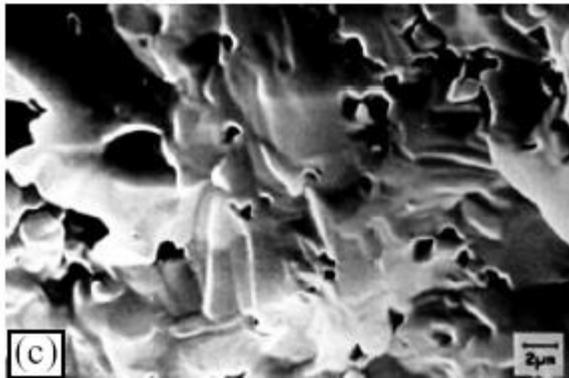
Rupture « fragile » par clivage (métaux et céramiques)

modes de rupture macro : fragile, plastique fragile

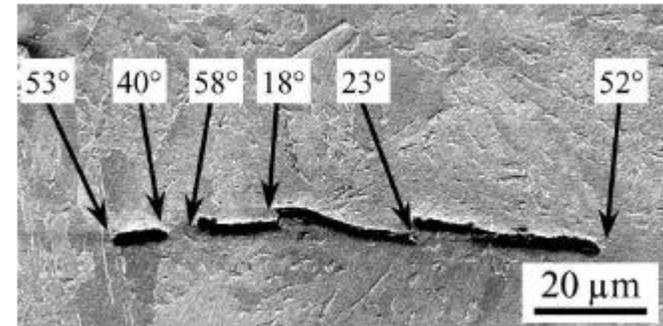
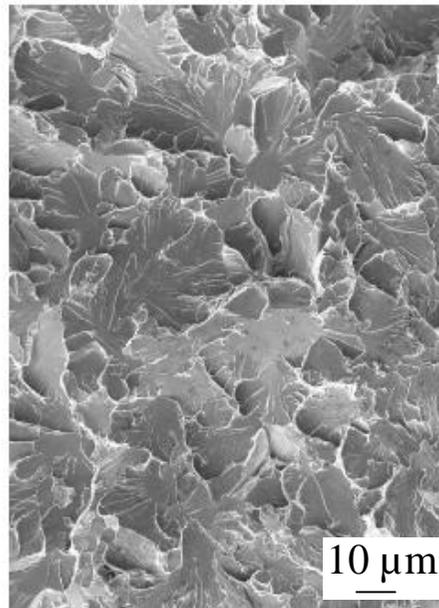
décohésion selon des plans cristallins bien précis

surface de rupture : facettes avec « rivières »

coupes : éventuellement endommagement par micro-fissuration



*fibres de SiC :  
surface de rupture*



*acier : surface de rupture et vue en coupe (A. Lambert-Perlade)*

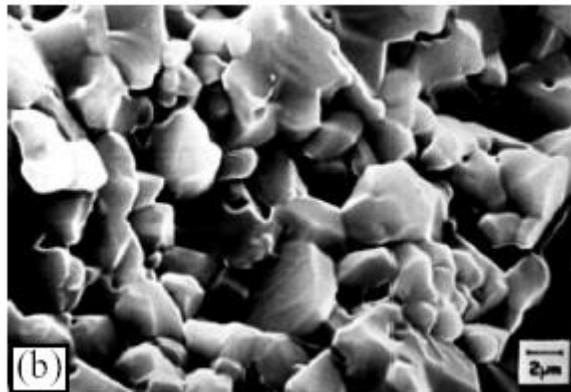
## Mécanismes de rupture microscopiques

Rupture « fragile » intergranulaire

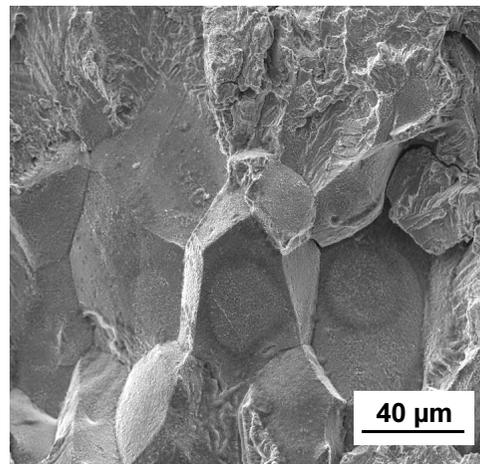
modes de rupture macro : fragile, plastique fragile, fluage

surface de rupture : facettes = joints de grains

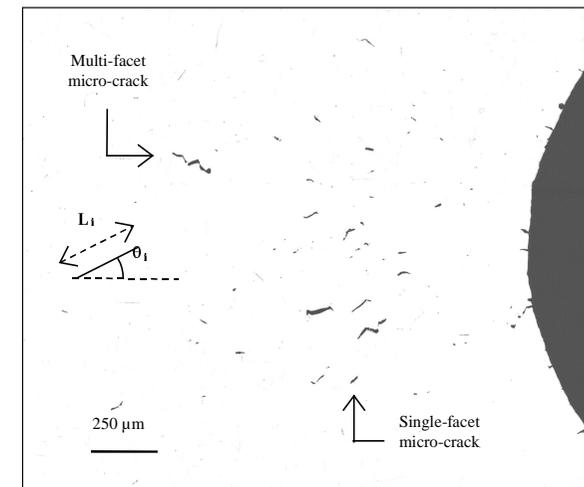
causes : ségrégations chimiques, fluage, abaissement de l'énergie de surface...



*SiC*



*acier inoxydable à 600°C (Q. Auzoux)*



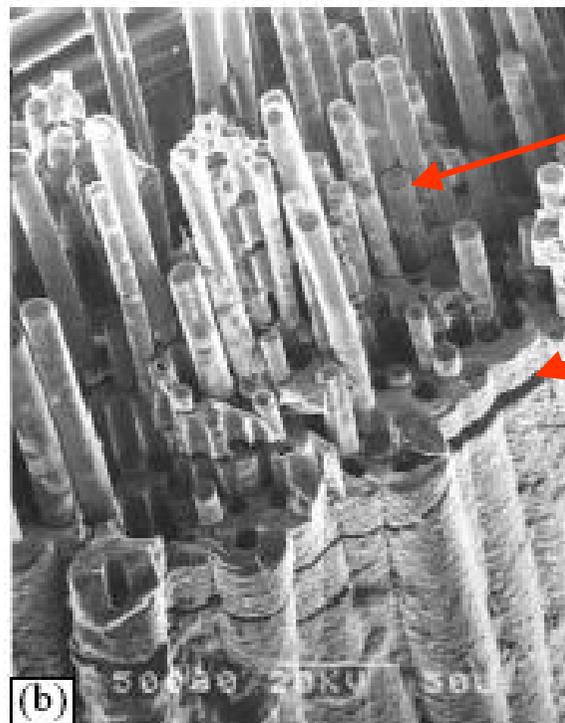
## Mécanismes de rupture microscopiques

Rupture « quasi-fragile »

modes de rupture macro : quasi-fragile

processus d'endommagement fragile mais dissipatif

exemple : frottement des fibres sur la matrice



déchaussement des fibres

fissuration fragile de la matrice

*composite SiC-SiC*

## Mécanismes de rupture microscopiques

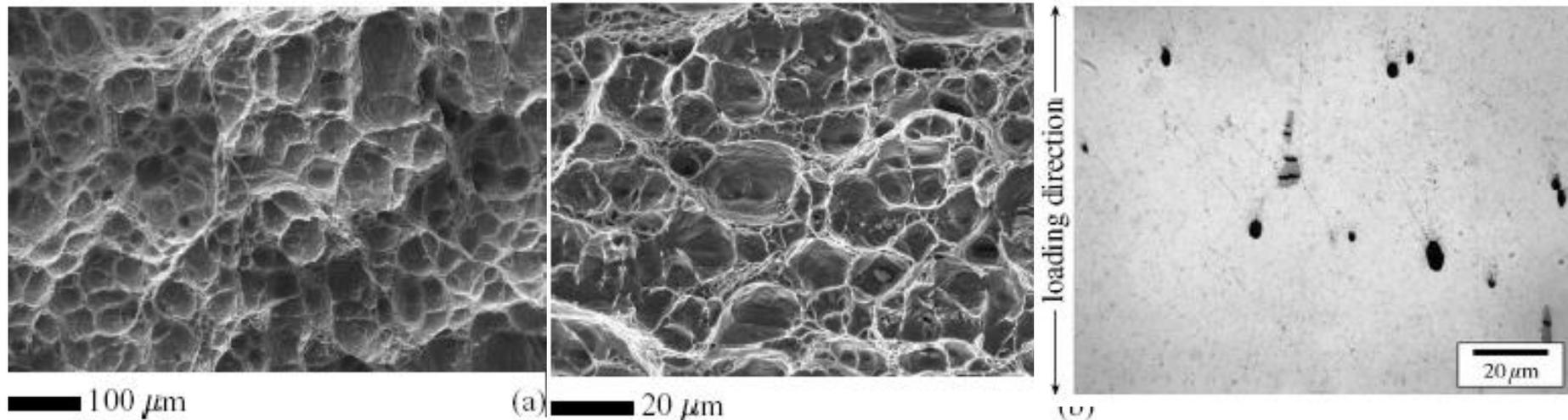
### Rupture « ductile »

modes de rupture macro : ductile

surface de rupture : cupules (demi-cavités)

coupes : endommagement par cavitation, généralement transgranulaire

causes : croissance d'un défaut par déformation plastique



*acier pour gazoducs (T.T. Luu)*

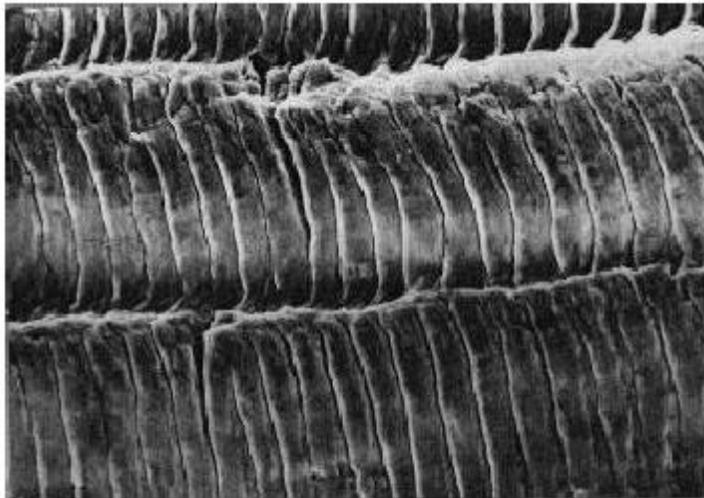
*alliage d'aluminium 2024 (F. Bron)*

## Mécanismes de rupture microscopiques

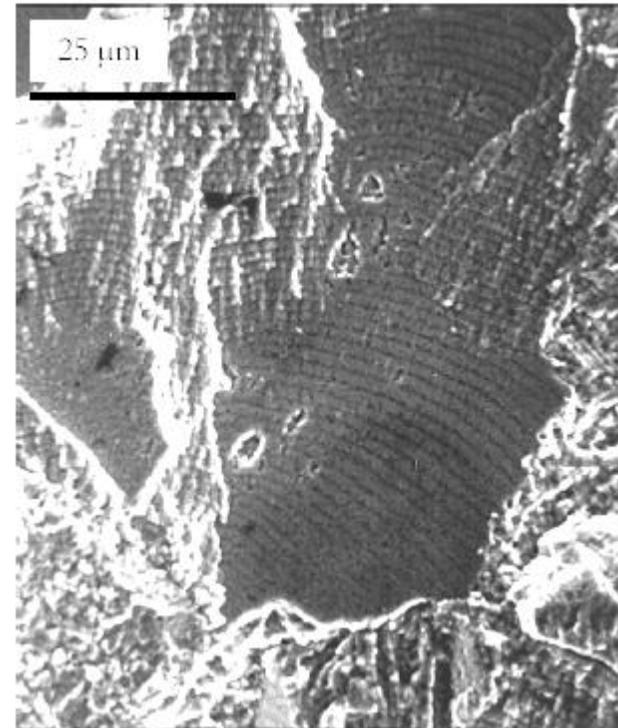
### Rupture par fatigue

propagation lente d'une fissure, cycle par cycle

déformation plastique cyclique : stries



5  $\mu\text{m}$



*superalliage base nickel N18 (F. Sansoz)*

## Mécanismes de rupture microscopiques

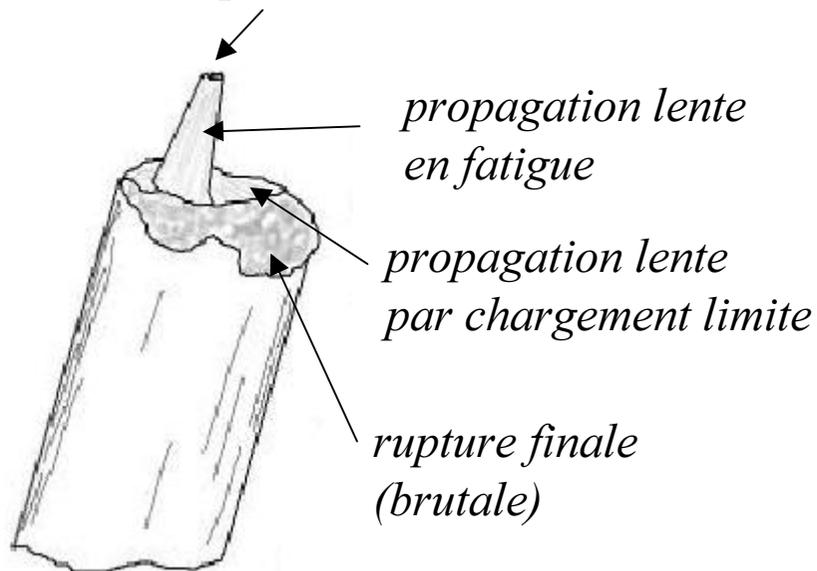
Transition de mode de rupture

propagation lente (fatigue, rupture ductile)

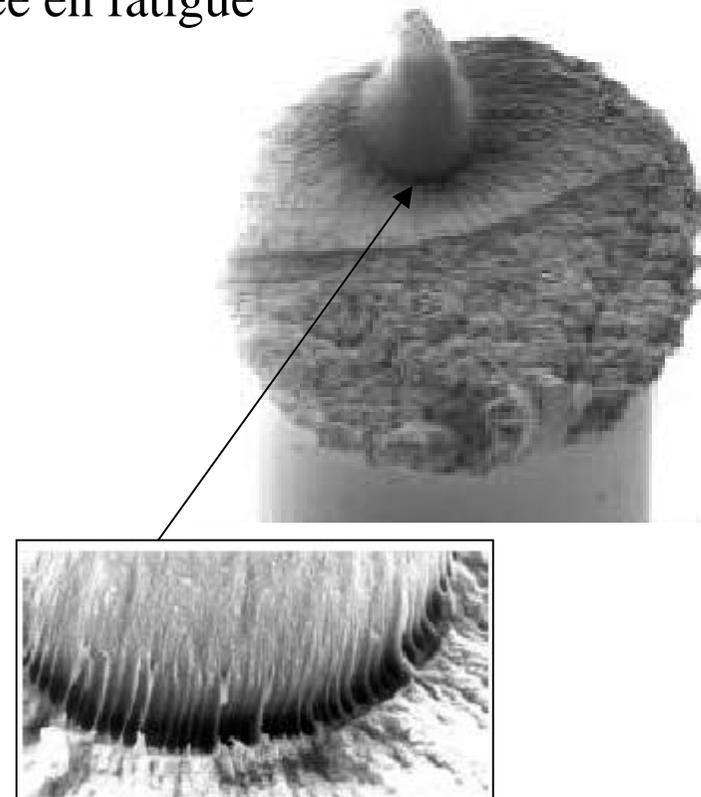
puis propagation brutale (ténacité ou chargement limite)

exemple : fibre de polyamide 6,6 sollicitée en fatigue

*amorçage sur particule*



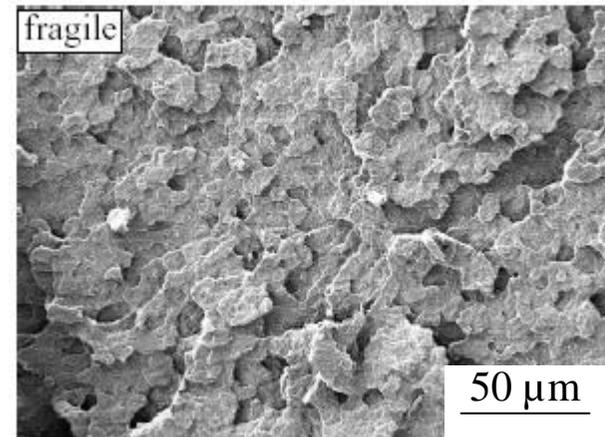
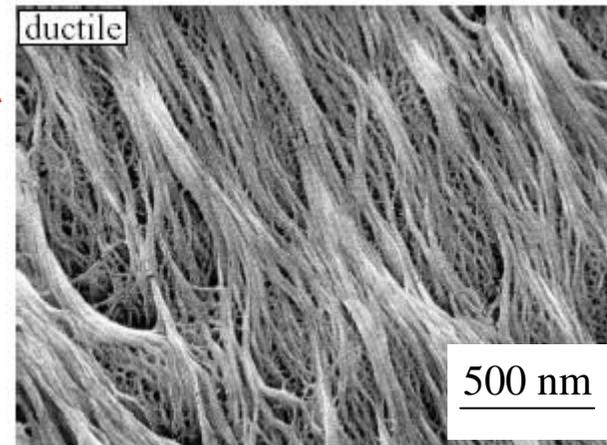
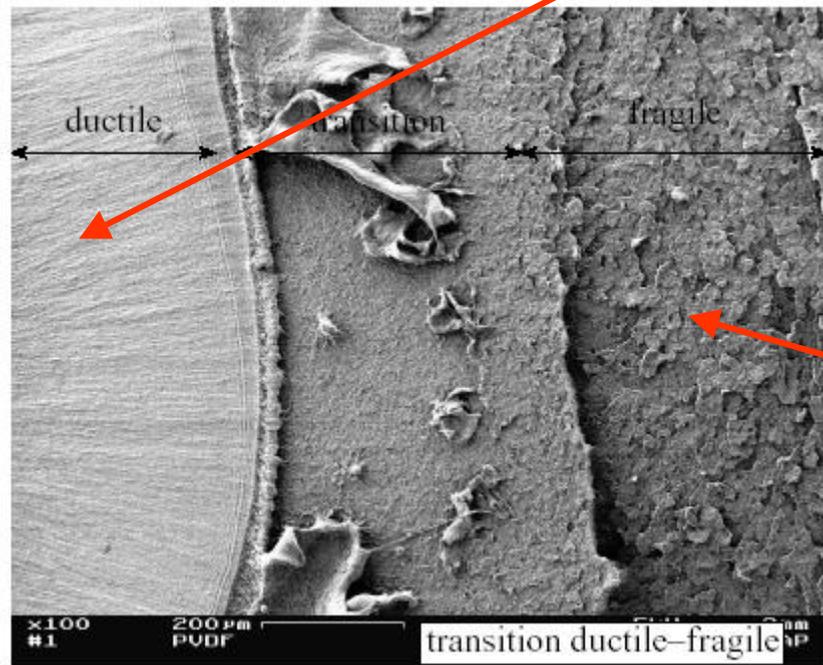
(J.M. Herrera Ramirez)



**Mécanismes de rupture microscopiques**

Transition ductile-fragile

exemple : PVDF

*(M. Lafarge)*

## Mécanique de la rupture

Surcharges dues à la présence d'irrégularités géométriques dans la structure

→ coefficient de concentration des contraintes :  $K_t$

Réponse mécanique d'une structure fissurée

→ champ de contraintes au voisinage d'une fissure

élasticité linéaire (facteur d'intensité des contraintes  $K$ )

plasticité (intégrale  $J$ )

**Facteur de concentration des contraintes**

Prise en compte des irrégularités de géométrie dans le dimensionnement

→ coefficient de concentration des contraintes :  $K_t$

$$\sigma_{\text{locale}} = K_t \sigma_{\infty}$$

Exemple : cavité ellipsoïdale

→  $K_t = 1 + 2 (a/\rho)^{1/2}$

Utilité : dimensionnement à l'entaille

Conséquence : éviter les transitions trop brutales de section

**Fissure dans un matériau élastique**

$K_t$  tend vers l'infini quand le rayon tend vers zéro !

Champ de contraintes autour d'une fissure de longueur  $a$

$$\rightarrow \sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad i, j = x, y \quad (\text{au premier ordre})$$

$K_I$  : facteur d'intensité des contraintes (en  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

singularité du champ de contraintes : en  $\frac{1}{\sqrt{r}}$

la contrainte locale dépend de la longueur de la fissure !

Trois modes de chargement : ouverture, cisaillement, cisaillement antiplan

$$\rightarrow K_I = Y \sigma_\infty \sqrt{\pi a} \quad \text{où } Y \text{ est une fonction de la géométrie}$$

## Fissure dans un matériau parfaitement plastique

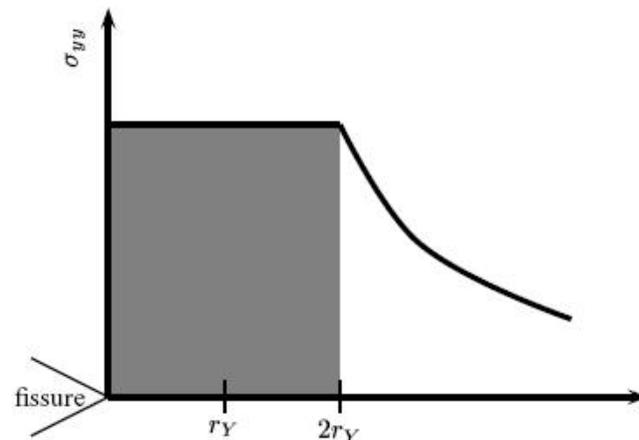
La contrainte atteint la limite d'élasticité près de la pointe de la fissure

Matériaux parfaitement plastiques : modèle d'Irwin

loi de comportement :  $\sigma = \sigma_Y$  au-delà de la limite d'élasticité

→ taille de zone plastique :  $2 r_Y$  où  $r_Y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2$

taille de la fissure « effective » :  $a + r_Y$



## Fissure dans un matériau plastique écrouissable

Matériaux plastiques écrouissables : modèle HRR

loi de comportement :  $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$

→ 
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij} = \sigma_0 \left( \frac{JE}{\sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) \\ \varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{JE}{\sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\varepsilon}_{ij}(\theta, n) \end{array} \right.$$

intégrale de Rice :  $J = \int_S \left( w dy - \vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \right)$  indépendante du contour  $S$

$w = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$  (densité d'énergie)

gradient de déplacement  
vecteur contrainte sur le contour

## Fissuration et bilan d'énergie

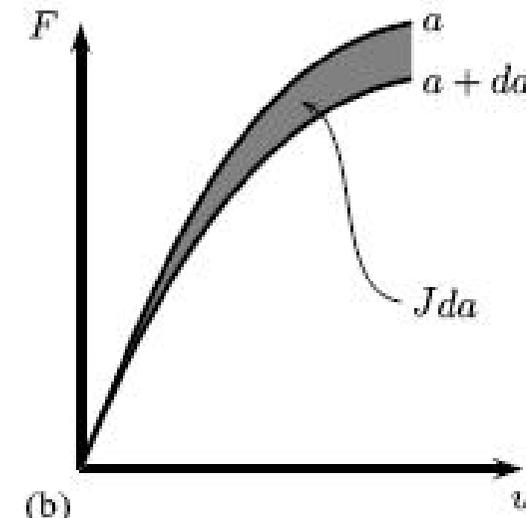
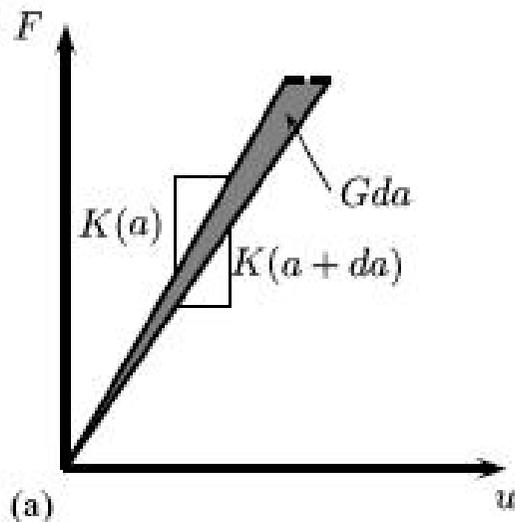
Bilan d'énergie lors de la propagation incrémentale de la fissure

relâchement d'une partie de l'énergie potentielle stockée :

$$G = -\frac{\partial W}{\partial A}$$

← énergie potentielle  
← surface de la fissure

$$G = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial A} F^2$$



élasticité linéaire :  $G = \begin{cases} \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) & \text{déformation plane} \\ \frac{K_I^2}{E} & \text{contrainte plane} \end{cases}$

élast. non linéaire :  
 $J = G$

**Rupture sous chargement monotone : structure fissurée**

Rupture fragile (élasticité)

bilan d'énergie : l'énergie relâchée a servi à créer les surfaces libres

grandeurs caractéristiques du matériau :

constantes élastiques, énergie de surface libre  $\gamma_s$

rupture brutale lorsque  $K_I = K_{Ic} = Y \sigma_\infty \sqrt{\pi a} = \sqrt{2E\gamma_s/\kappa}$

$$\kappa = \begin{cases} 1 - \nu^2 & \text{déformation plane} \\ 1 & \text{contrainte plane} \end{cases}$$

$K_{Ic}$ , la ténacité, dépend du matériau... et de la géométrie

deux applications en dimensionnement :

contrainte maximale supportée par la structure fissurée

taille maximale de défaut admissible

## Rupture sous chargement monotone : structure fissurée

Rupture brutale des matériaux élastoplastiques

bilan d'énergie : l'énergie relâchée a servi à créer les surfaces libres  
et à déformer plastiquement la matière

en pratique : l'énergie sert à >90% à déformer le matériau

mécanismes possibles de dissipation d'énergie :

déformation plastique

changements de phase (ex.  $\text{ZrO}_2$  quadratique  $\rightarrow$  monoclinique)

frottement de fibres sur la matrice (composites)

Deux traitements possibles :

plasticité confinée : ténacité  $K_{Ic}$ , avec éventuellement correction d'Irwin

plasticité étendue : intégrale J

**Rupture sous chargement monotone : structure non fissurée**

Rupture fragile (céramiques)

mécanisme : propagation brutale d'un défaut existant (ténacité)

effet de taille :

volume important

→ probabilité plus élevée de trouver un « gros » défaut

→ rupture précoce

valeurs typiques de la ténacité : quelques  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

forte dispersion : étude statistique indispensable

**Rupture sous chargement monotone : structure non fissurée**

Rupture plastique-fragile (métaux)

mécanisme : clivage après (très peu de) plasticité

Mécanismes d'amorçage des fissures :

Cottrell : verrou sessile à l'intersection de plans de glissement

Stroh : sur-contrainte en tête d'un empilement (joint de grains, précipité)

Conséquences :    ténacité : qq. à  $20 \text{ MPa m}^{1/2}$   
                          fort effet de taille  
                          étude statistique indispensable

**Rupture sous chargement monotone :  
de l'élément de volume à la structure fissurée**

Comment faire avancer « numériquement » les fissures par le modèle ?  
contraintes infinies en pointe de fissure : rupture immédiate !!!

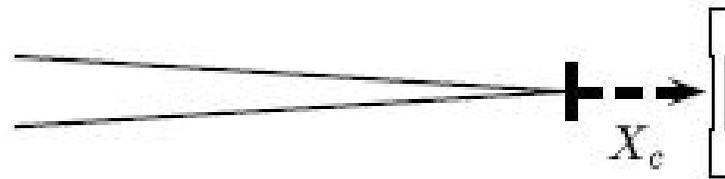
## Rupture sous chargement monotone : de l'élément de volume à la structure fissurée

Comment faire avancer « numériquement » les fissures par le modèle ?  
contraintes infinies en pointe de fissure : rupture immédiate !!!

Intervention des mécanismes physiques de rupture :

on ne casse pas des « points matériels » mais des matériaux réels...

le critère de rupture doit être atteint sur une distance critique  $X_c$



exemple : champ HRR + contrainte critique (clivage) :

$$J_c = \frac{\sigma_0^2}{E} X_c I_n \left( \frac{1}{\alpha_n} \frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^{n+1}$$

## **Endommagement et rupture différée**

Sollicitations pouvant amener à une rupture différée

fatigue : structures non fissurées ou structures fissurées

fluage : charge constante, déformation visqueuse

effets de vieillissement (évolution du matériau dans le temps)

effets d'environnement : corrosion, hydrolyse, UV...

→ ici : fatigue  
(fluage : cf. TD n°18)  
(corrosion : cf. TD n°24)

## **Fatigue d'une structure non fissurée**

Deux domaines extrêmes de chargement

plasticité à chaque cycle : fatigue oligocyclique

pas de plasticité macroscopique : fatigue à grand nombre de cycles

Dimensionnement

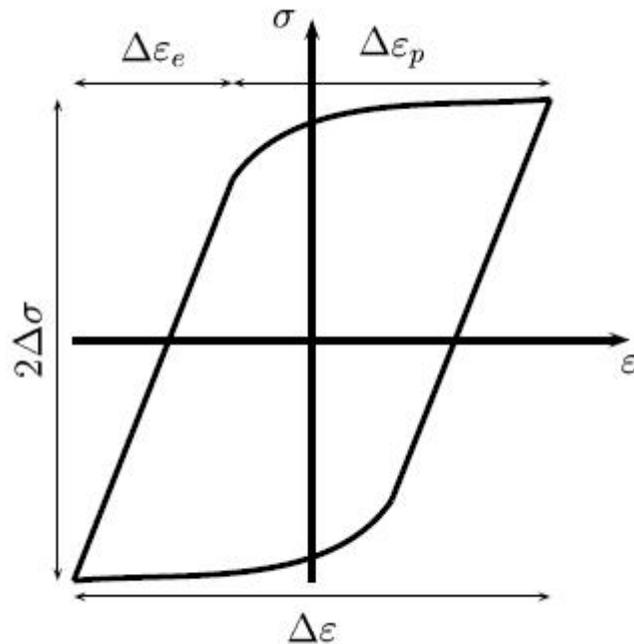
nombre de cycles à rupture

incertitude : typiquement facteur 2 à 10

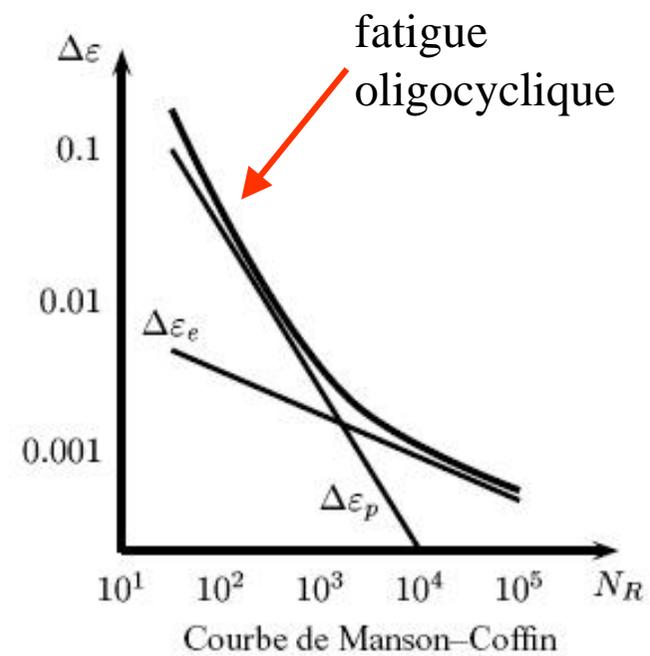
Limite d'endurance : pas de rupture avant un nombre donné de cycles ( $10^6$ )

**Fatigue d'une structure non fissurée**

Fatigue oligocyclique



cycle de fatigue



loi de Manson-Coffin

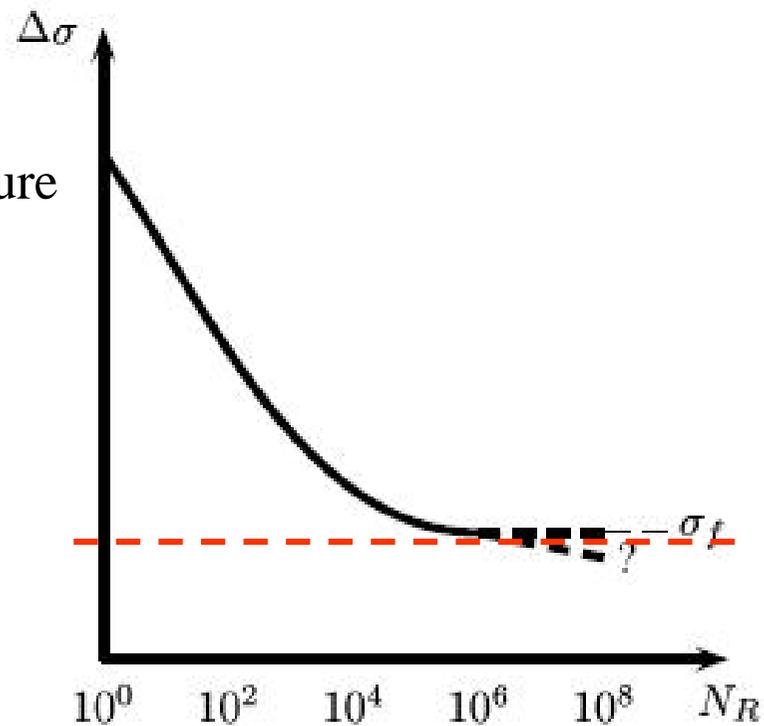
**Fatigue d'une structure non fissurée**

Fatigue à grand nombre de cycles

cycle de fatigue : macroscopiquement élastique

90% de la durée de vie  
= amorçage de la fissure

fort effet de surface

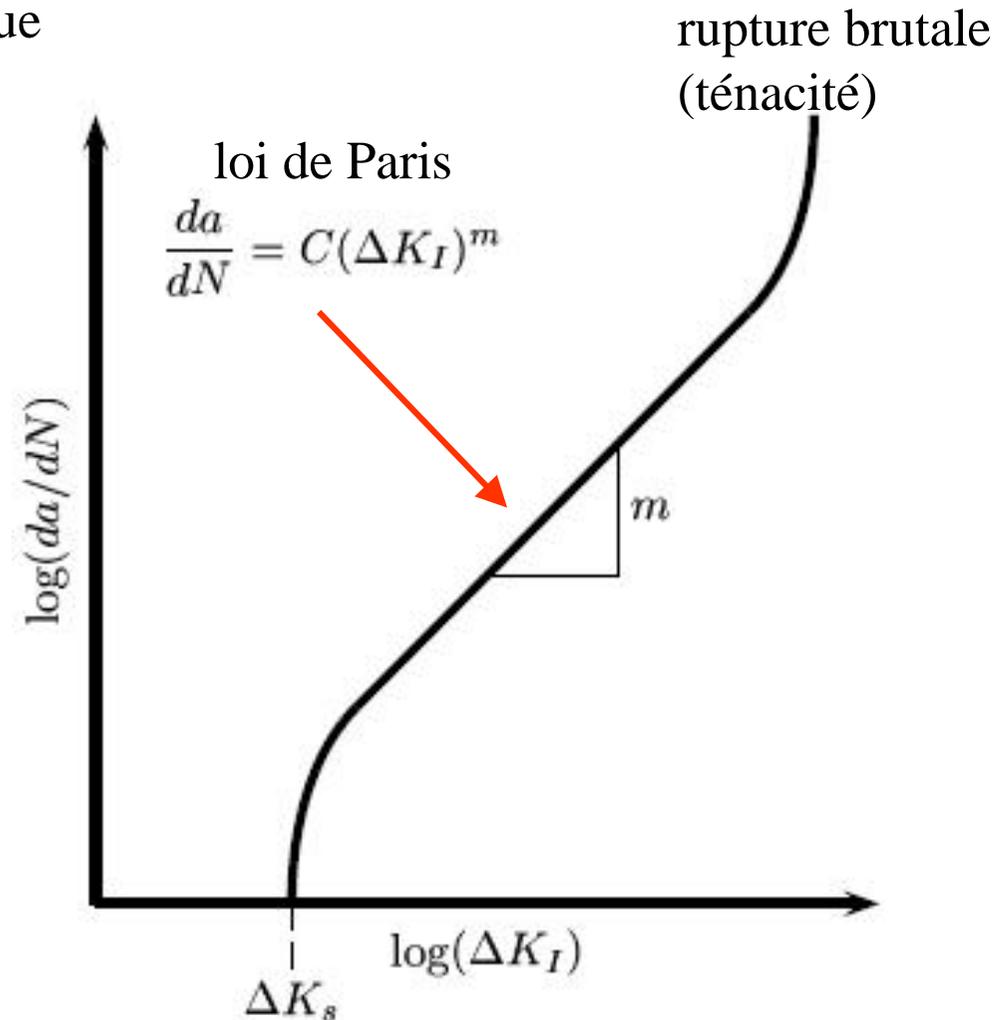


limite  
d'endurance

**Fatigue d'une structure fissurée**

Propagation de fissure en fatigue

hypothèse :  
milieu continu  
(fissure « longue »)



## Conclusions

Durée de vie : un dimensionnement indispensable

{ conditions de service  
conditions « extrêmes »

Outils de dimensionnement

critères de rupture ou de ruine plastique

bien connaître le chargement mécanique et la géométrie

deux approches : globale (K, J...) : paramètres fonction de la géométrie  
locale : paramètres « matériau »

Ne pas oublier les mécanismes de rupture !!!