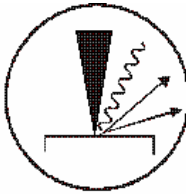


GN  
MEBA



GROUPEMENT NATIONAL DE  
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE  
ET DE MICROANALYSES

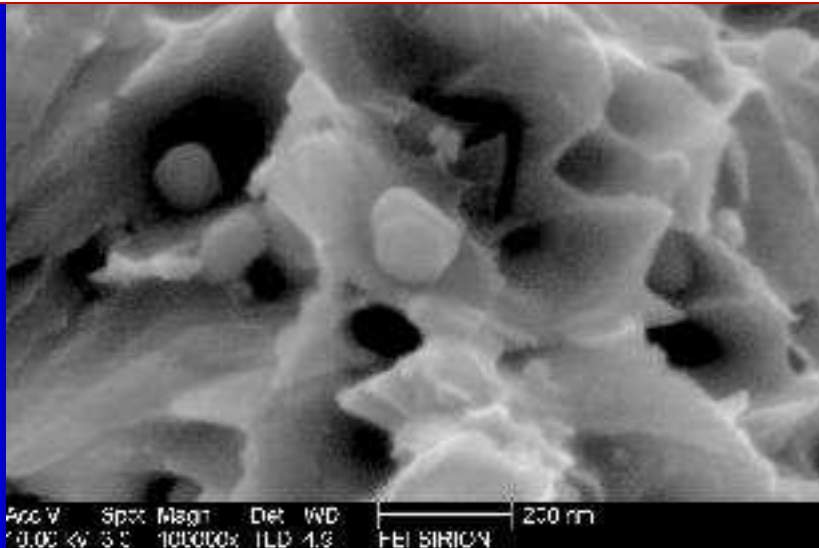


*En convention de coopération avec la Société Française de Physique*

4 – 5 décembre 2008

**Expertise de la rupture et autres défaillances**

## **Introduction : Sollicitation mécanique, endommagement et mécanique de la rupture**

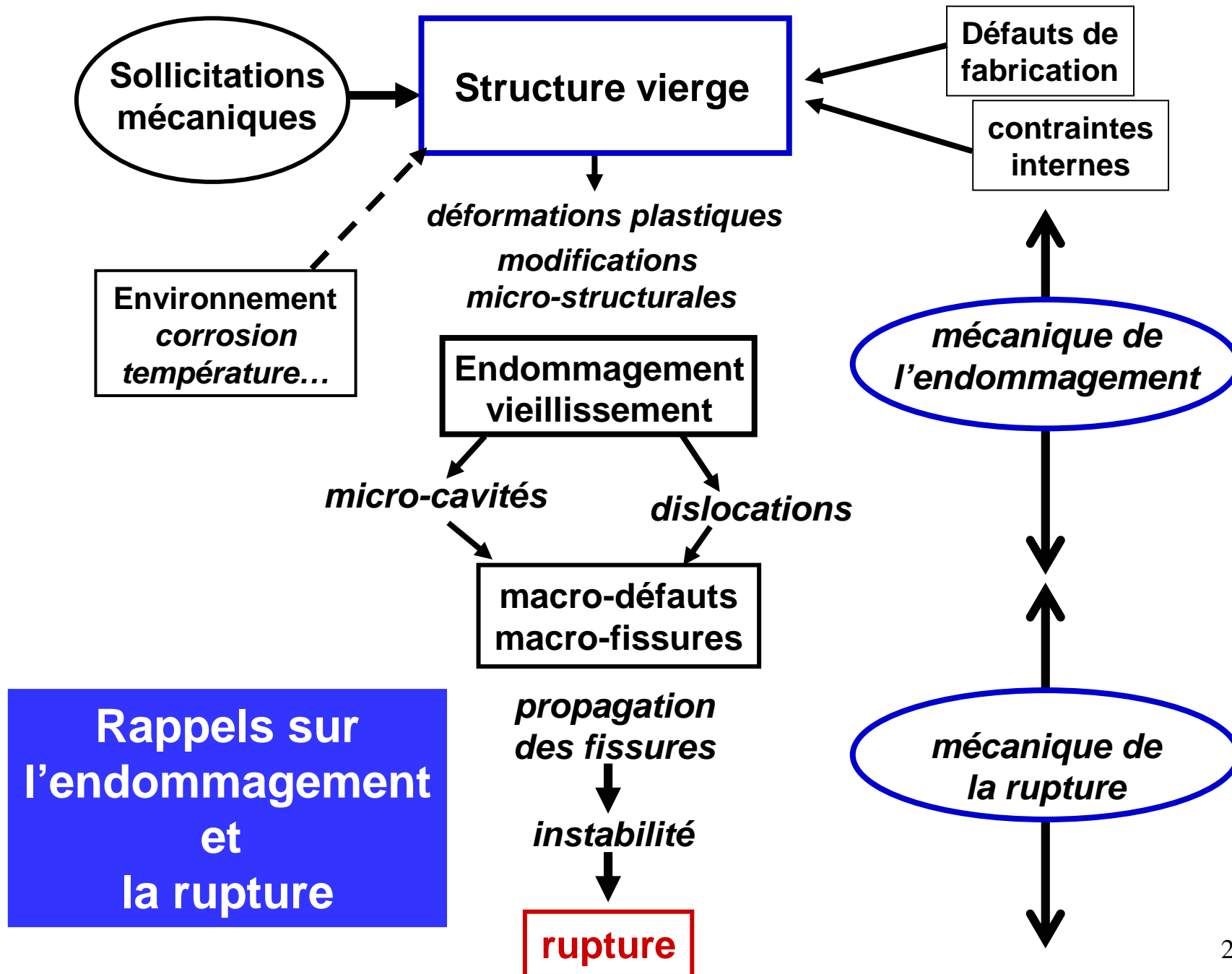


J. Ruste

GN-MEBA

(EDF R&D Les Renardières)

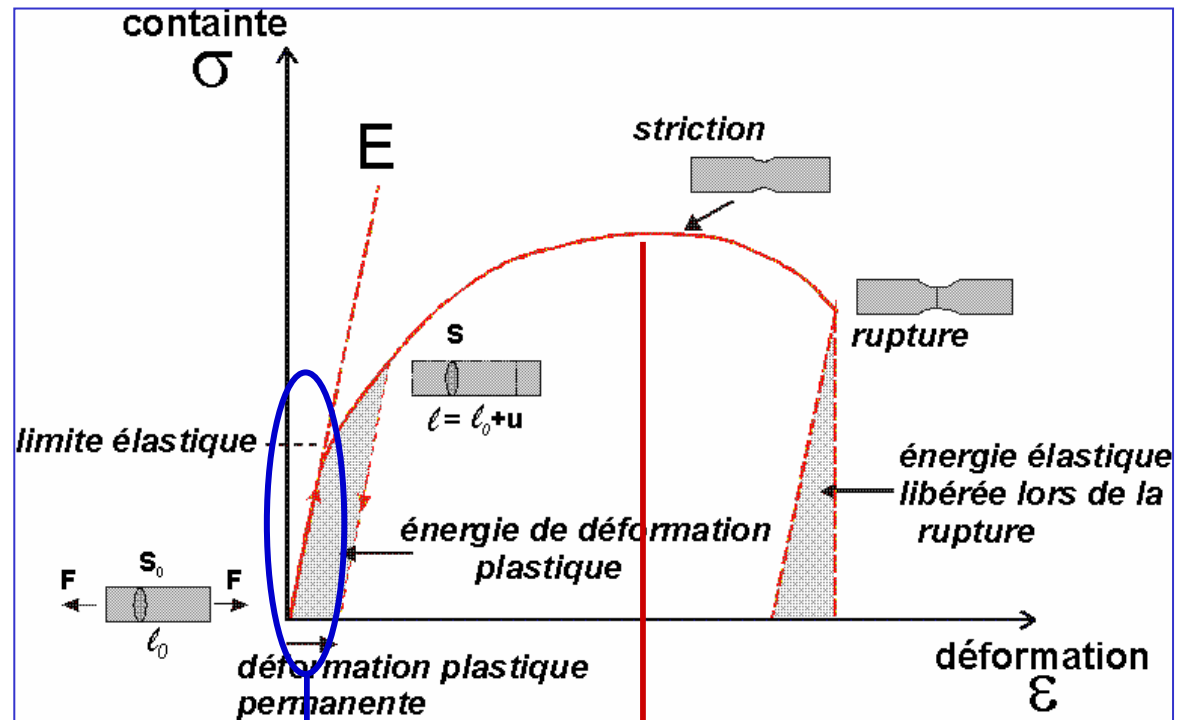
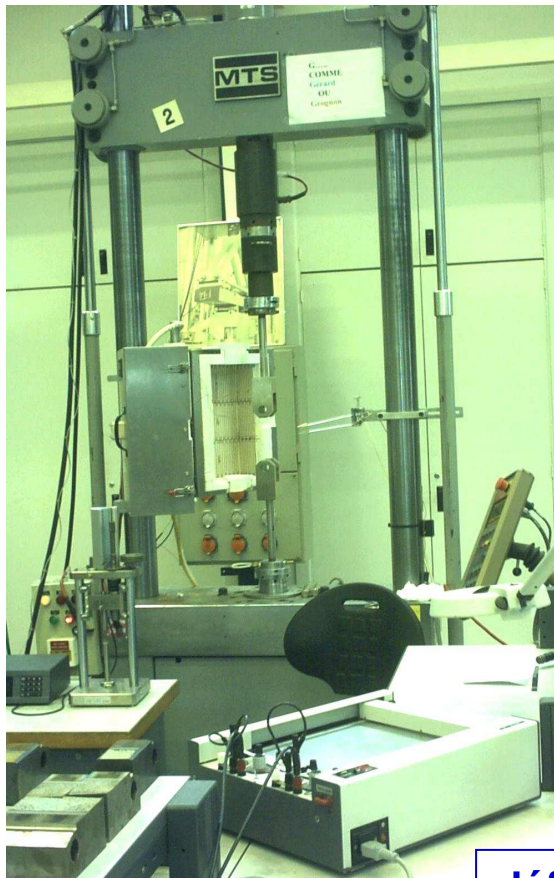




# 1 – Caractéristiques mécaniques et lois de comportement

## - Caractéristiques mécaniques classiques

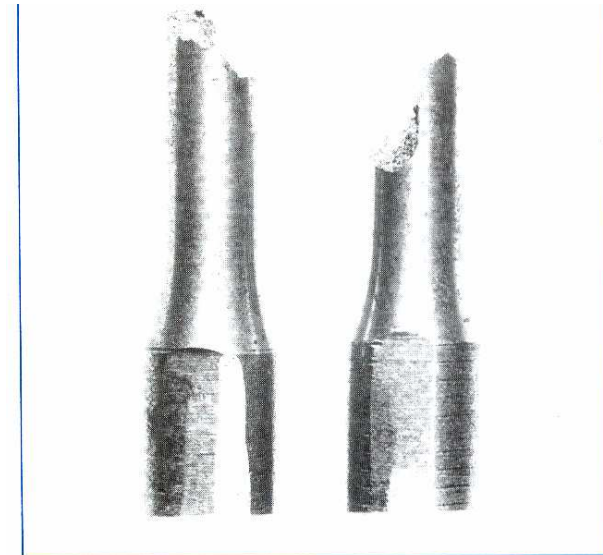
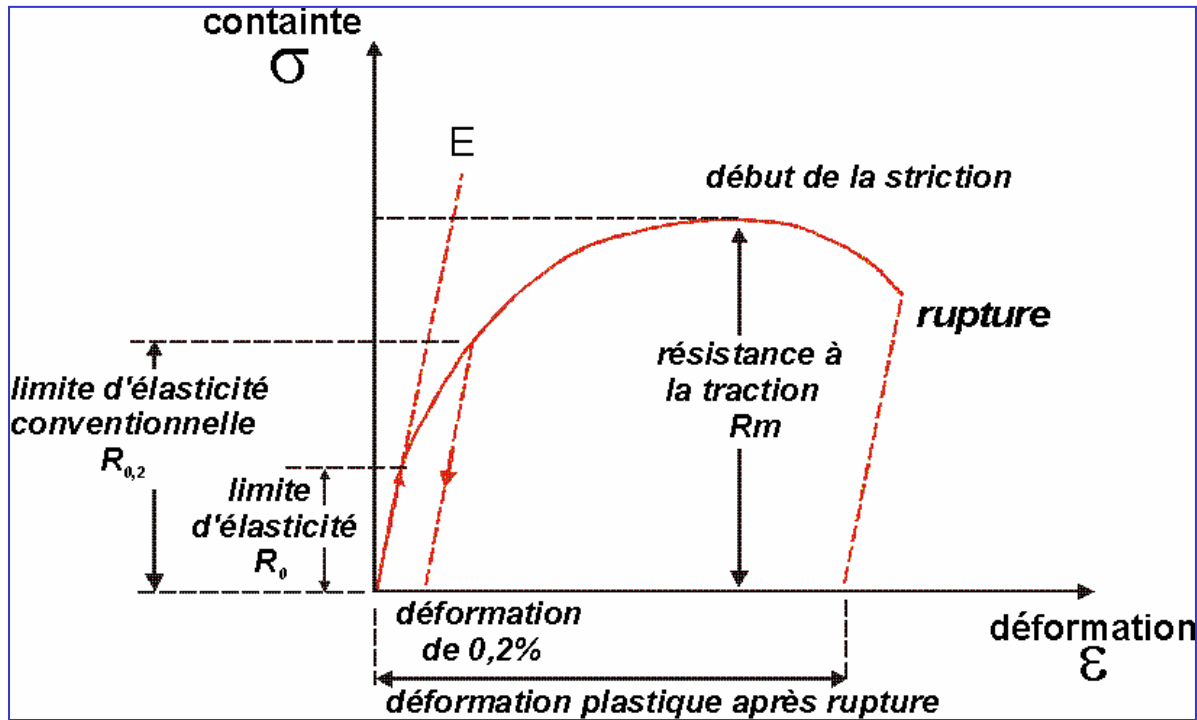
### Essai de traction sur éprouvette normalisée



2 domaines :

**déformation élastique, réversible**

**déformation plastique, irréversible**



Rupture à caractère fragile d'une éprouvette en fonte grise Ft 20 sollicitée en torsion ; on notera l'inclinaison à 45° de la cassure.

$R_0$  : limite d'élasticité

$R_{p0,2}$  : limite d'élasticité conventionnelle

E : module de Young (pente de la droite d'élasticité)

$R_m$  : résistance à la traction

$A_R(\%)$  : allongement plastique après rupture

$$A_R(\%) = 100 (l_{rup} - l_0) / l_0$$

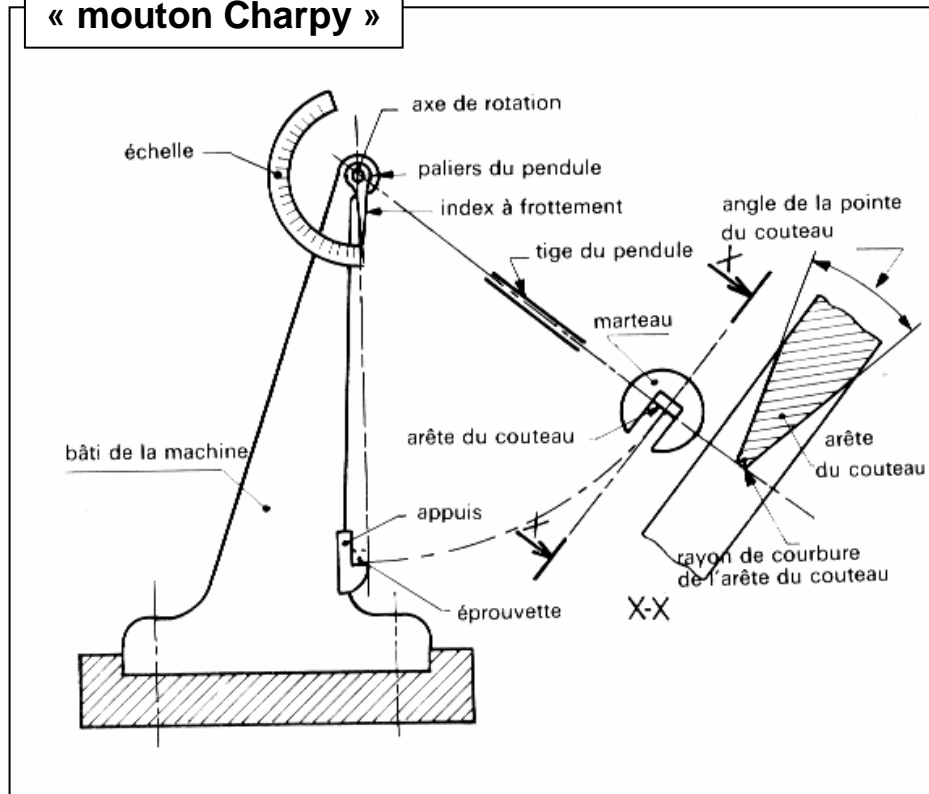
Z : coefficient de striction

$$Z = 100 (S_0 - S_{rup}) / S_0$$

## Autres caractéristiques :

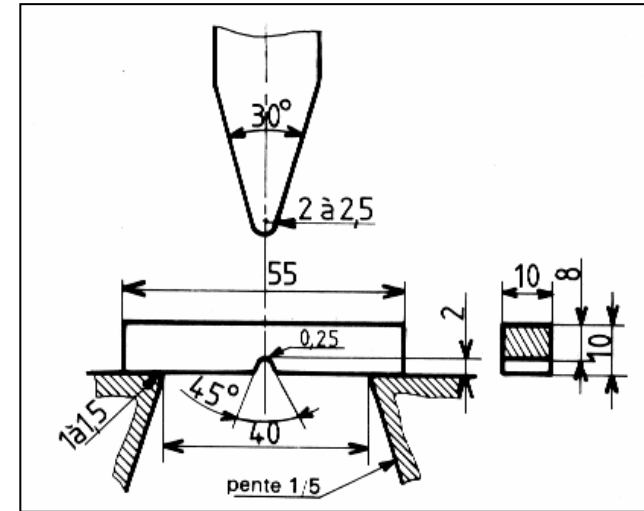
### 1 - La résilience (résistance au choc)

#### « mouton Charpy »

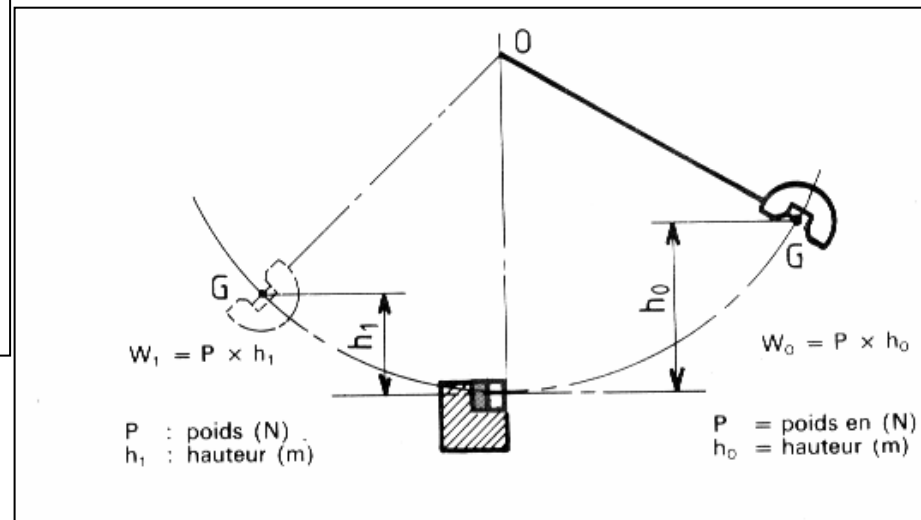


l'énergie absorbée lors du choc est égale à  $W_0 - W_1$

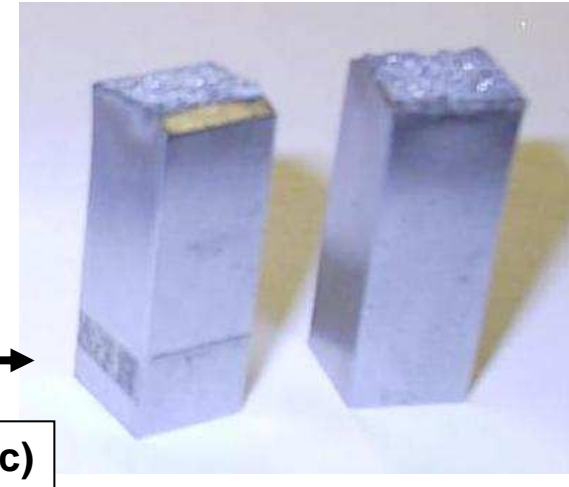
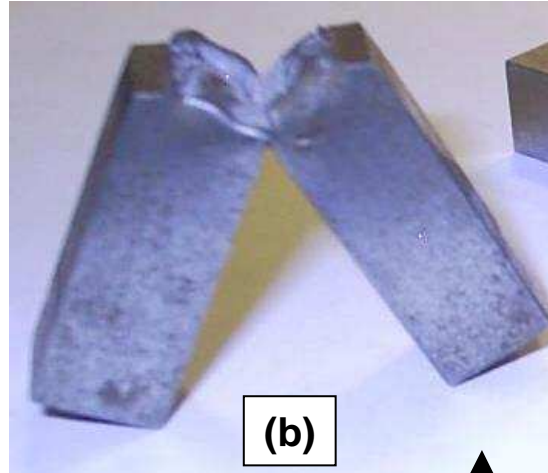
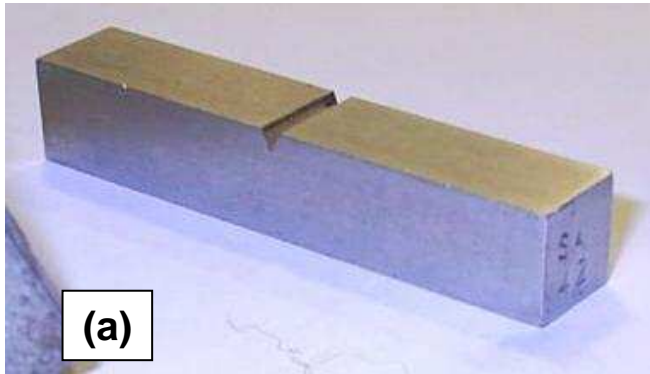
résilience :  
énergie absorbée par unité de surface



épreuve Charpy normalisée  
(avec entaille en V)



$$\text{KCV (daJ/cm}^2\text{)} = (W_0 - W_1)/S$$



éprouvette Charpy (avec entaille en V)  
(a) avant le choc  
(b) déformée mais non rompue  
(forte résilience)  
(c) cassée (résilience faible)

Caractérise le comportement « fragile » (faible résilience)  
ou « ductile » (résilience élevée)

## 2 - La ténacité (résistance au déchirement ou à la propagation de fissure)

L'état mécanique à l'extrémité d'une fissure peut être défini par un facteur K :

- qui dépend de :
- la longueur  $a$  de la fissure
  - la contrainte appliquée  $\sigma$
  - un paramètre de forme lié à la structure en fond de fissure

l'expression la plus simple : 
$$K = \sigma \sqrt{\pi a}$$

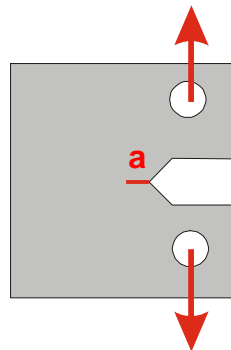
Il y a propagation de la fissure si  $K \geq K_C$   $\rightarrow$   $K_C$  : ténacité

$$K_C = \sqrt{E G_C}$$

→ énergie absorbée pour créer une fissure

↓  
module élastique (Young)

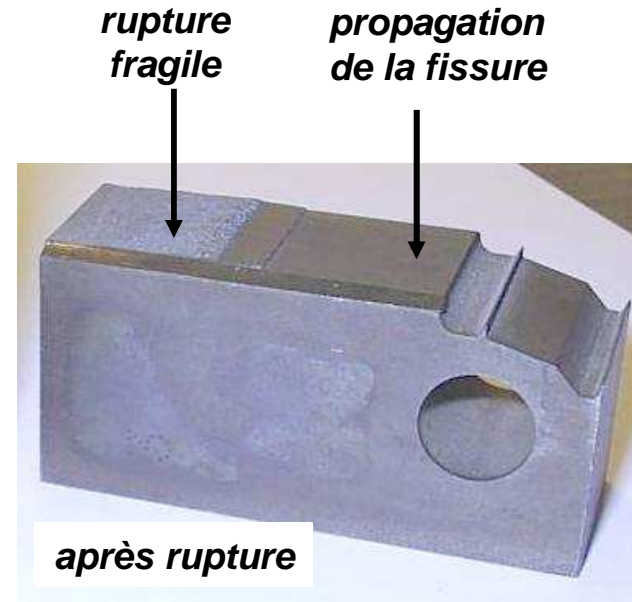
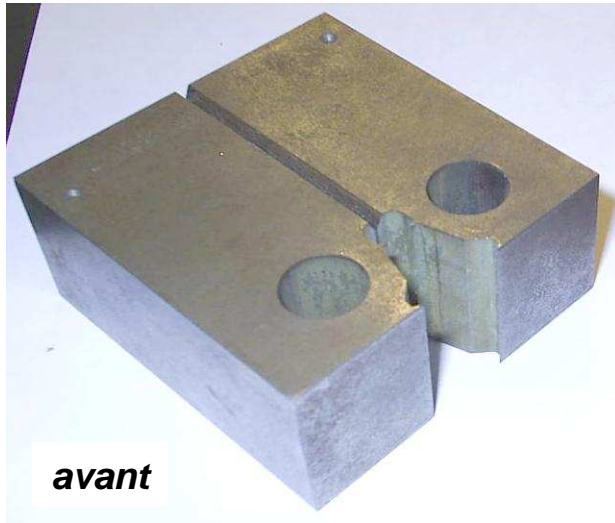
détermination de  $K_c$  et  $G_c$  :



éprouvette fissurée (longueur  $a$ )

-  $\sigma_c$  (rupture)  $K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a}$

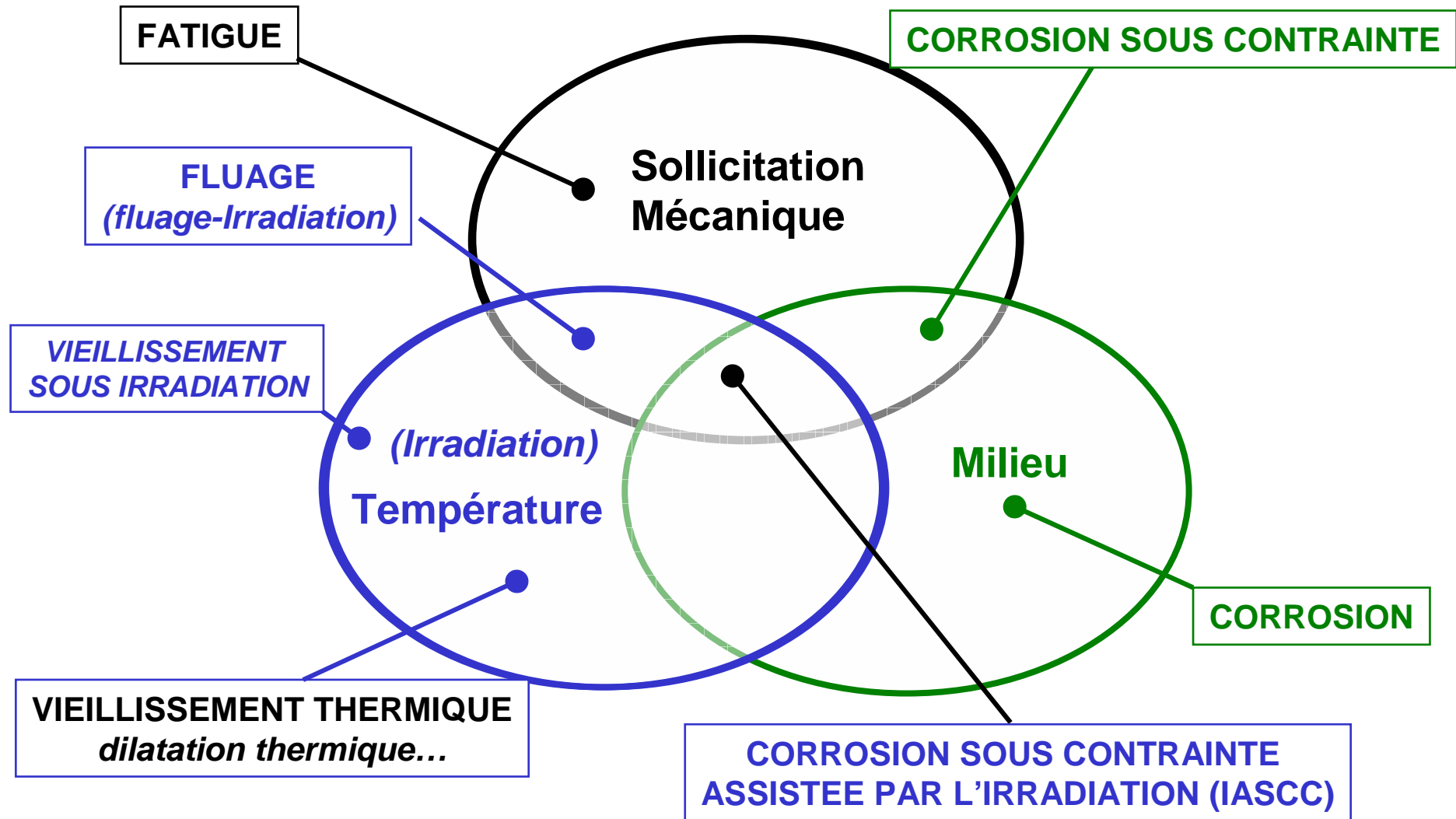
-  $G_c = K_c^2 / E$



*énergie absorbée  
pour créer une fissure*

<b>matériau</b>	<b><math>G_c</math> (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>K_c</math> (MPa√m)</b>
métaux purs ductiles	100-1000	100-350
acier à rotors	220-240	204-214
acier à haute résistance	15-118	50-154
acier doux	100	140
alliages de Ti (TA6V)	26-114	55-155
acier au carbone	13	51
fonte	0,2-3	6-20
Be	0,08	4
<i>béton</i>	0,03	0,2
<i>verre</i>	0,01	0,7-0,8

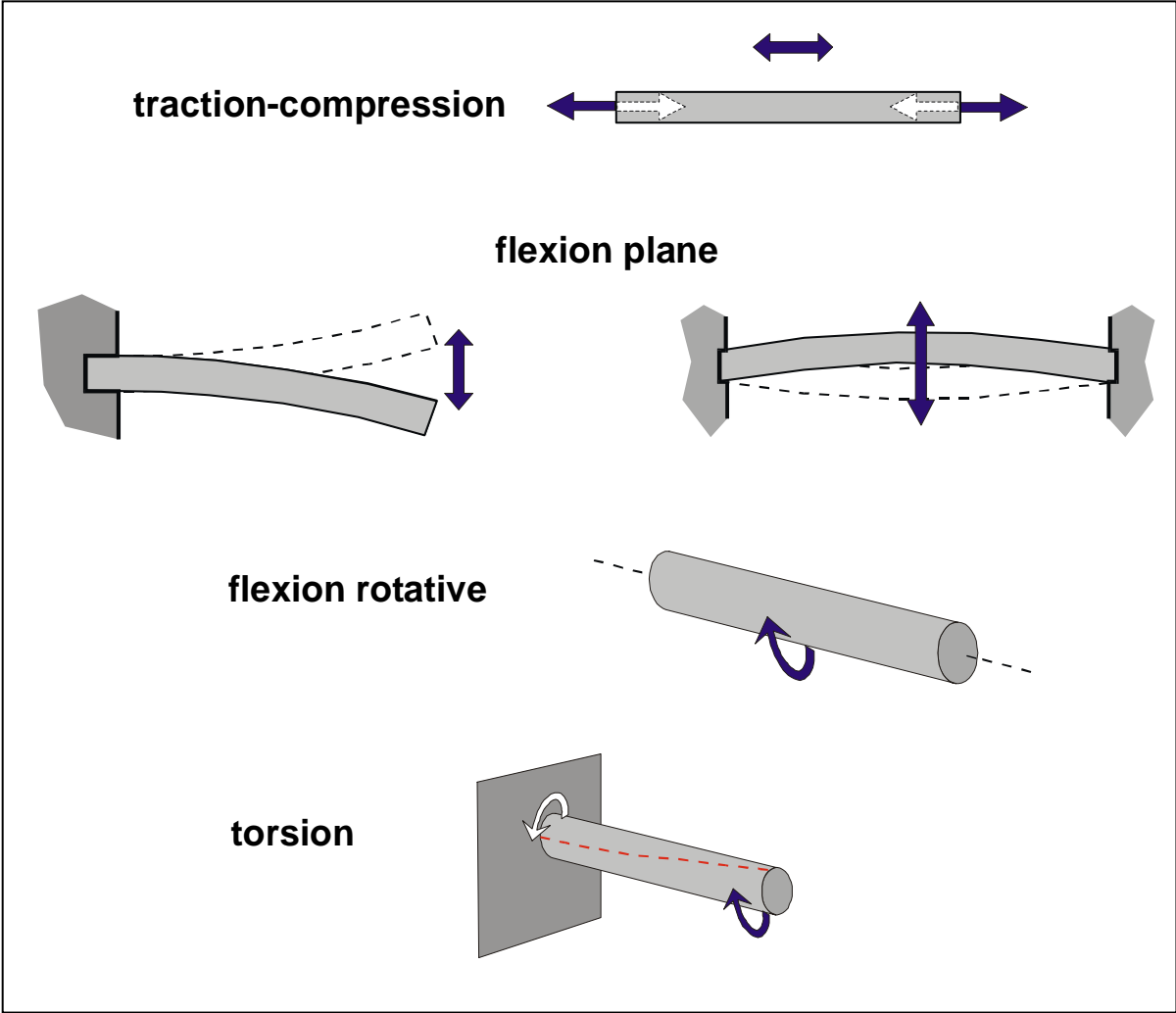
# LES PRINCIPAUX TYPES DE VIEILLISSEMENT ET D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES PARAMETRES PRINCIPAUX



*! « vieillissement » ne signifie pas forcément « dégradation » mais « évolution »<sup>9</sup>*

# Les différents types de sollicitation

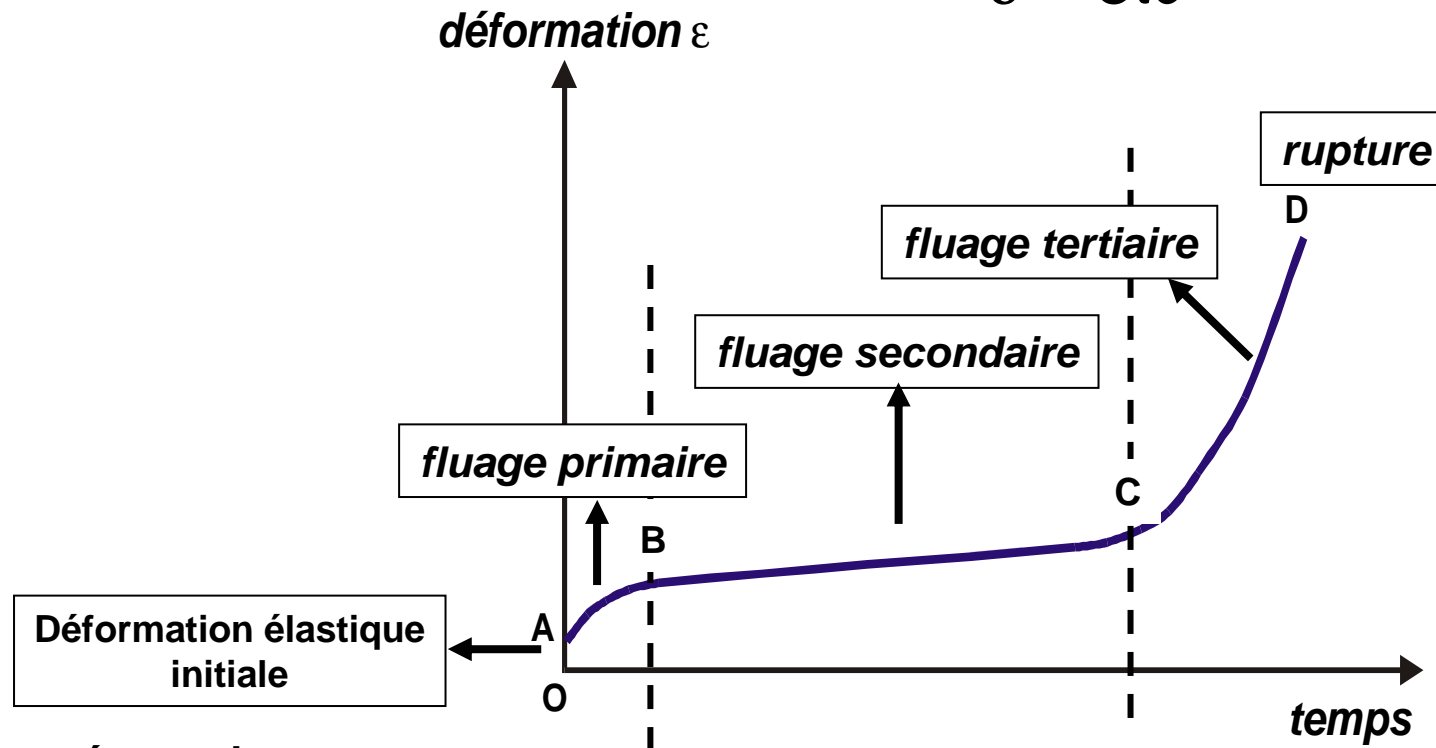
## Contraintes mécaniques statiques simples



# Contraintes complexes dynamiques

1 - Fluage : faible contrainte statique appliquée sur une longue durée et à haute température

$$\sigma = Cte$$



Données typiques  
(matériaux métalliques) :

T 500 à >700 °C  
durée : 10.000 à >100.000 h

**Courbe caractéristique  
du fluage**

*Le fluage ne concerne pas uniquement des  
matériaux métalliques mais aussi des céramiques*

## 2 - Fatigue : contrainte plus ou moins importante appliquée de manière répétitive

**3 stades :**

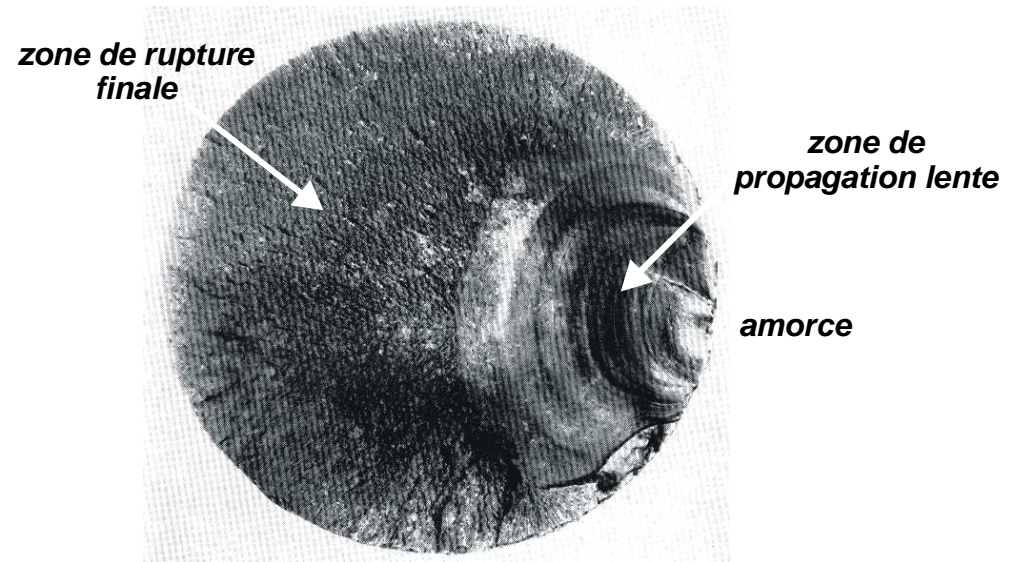
**1 - stade d'amorçage ou d'initiation**

**2 - stade de propagation lente**

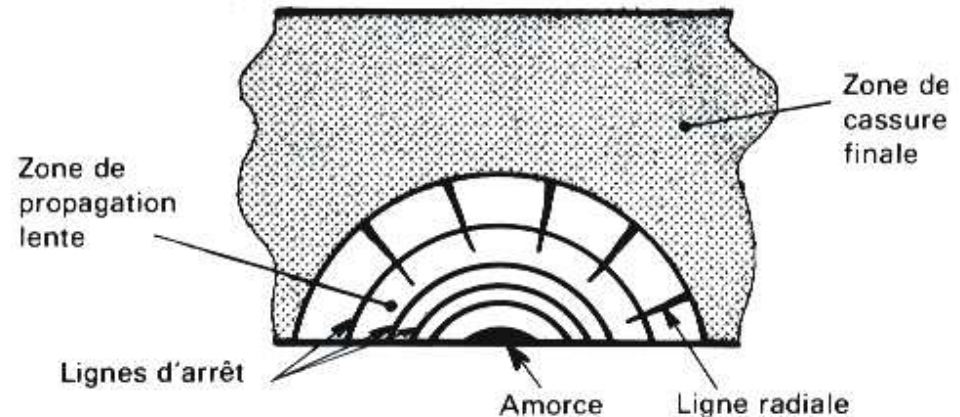
**3 - stade de rupture finale**

**échelle macroscopique :**

- *une zone lisse à grains fins  
(région de propagation par fatigue,  
souvent transgranulaire)*
- *une zone ductile, semi-fragile ou fragile  
(région de rupture instantanée final*

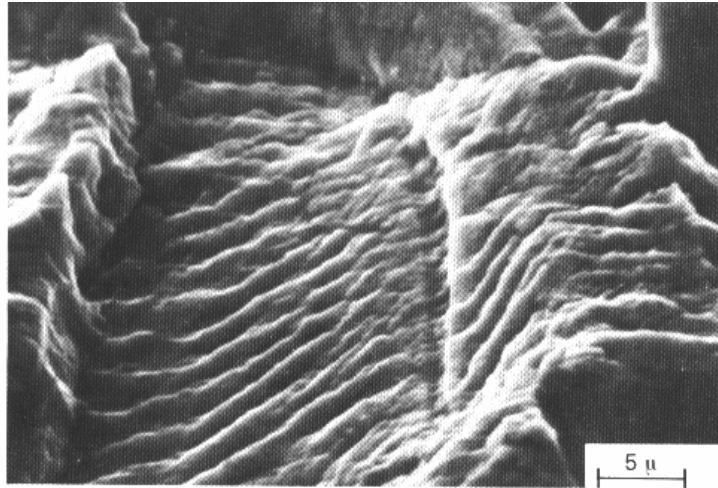


*rupture de fatigue d'un tige de piston  
de 25cm de diamètre*

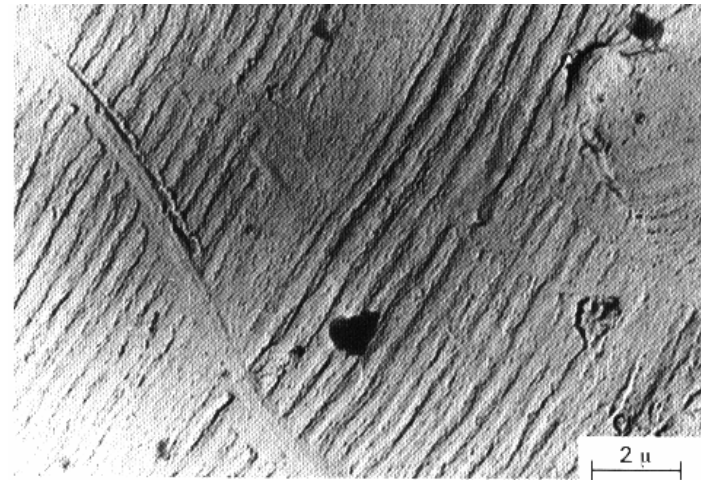


**échelle microscopique :**

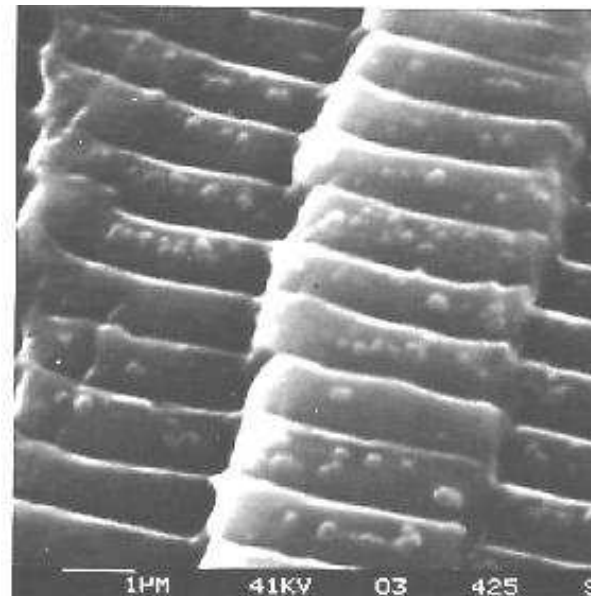
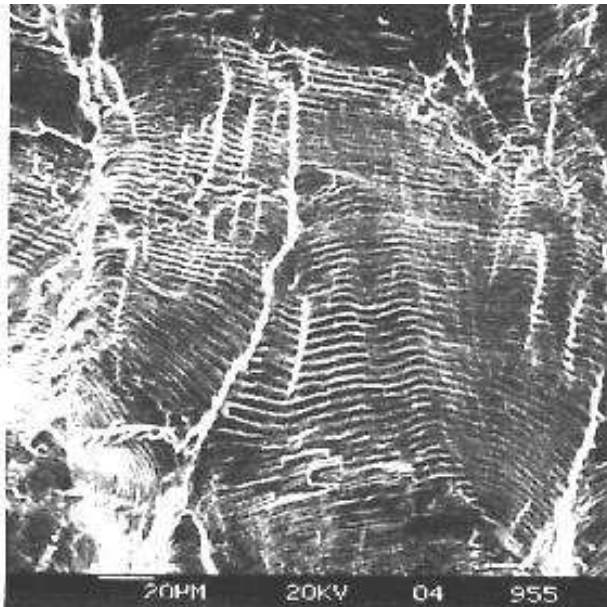
***apparition de stries de fatigue, correspondant aux cycles de sollicitation  
(consolidation en extrémité de fissure à chaque arrêt de la contrainte)***



**observations en MEB**



**observations en TEM**



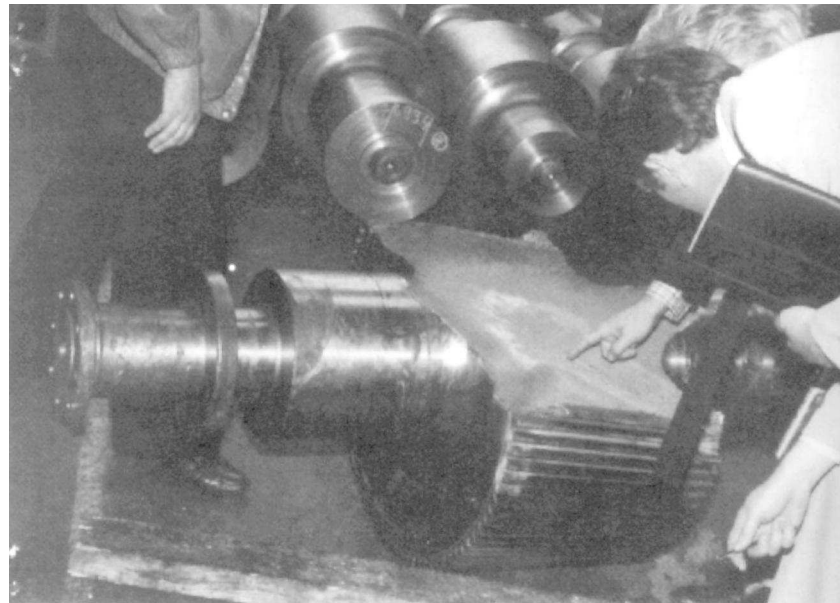
**exemples de rupture de fatigue**



**fuselage d'un Boeing 737 (1988)**

*des ruptures similaires eurent lieu sur les premiers jet (Comet), les fissures de fatigue ayant pris naissance au niveau des hublots*

**rupture d'une roue d'engrenage  
lors d'un essai de survitesse  
(fatigue en flexion rotative)**



### 3 – fissuration par corrosion sous contrainte

SCC : Stress Corrosion Cracking  
IASCC : Irradiation Assisted SCC

Corrosion généralement inter cristalline  
qui se produit lorsqu'il y a simultanément :

présence de contraintes  
appliquées

- *externes*
- *de soudage*
- *traitement thermique...*

présence d'un  
milieu corrosif

- *gaz*
- *électrolyte*
- *sels fondus*
- *métal liquide...*

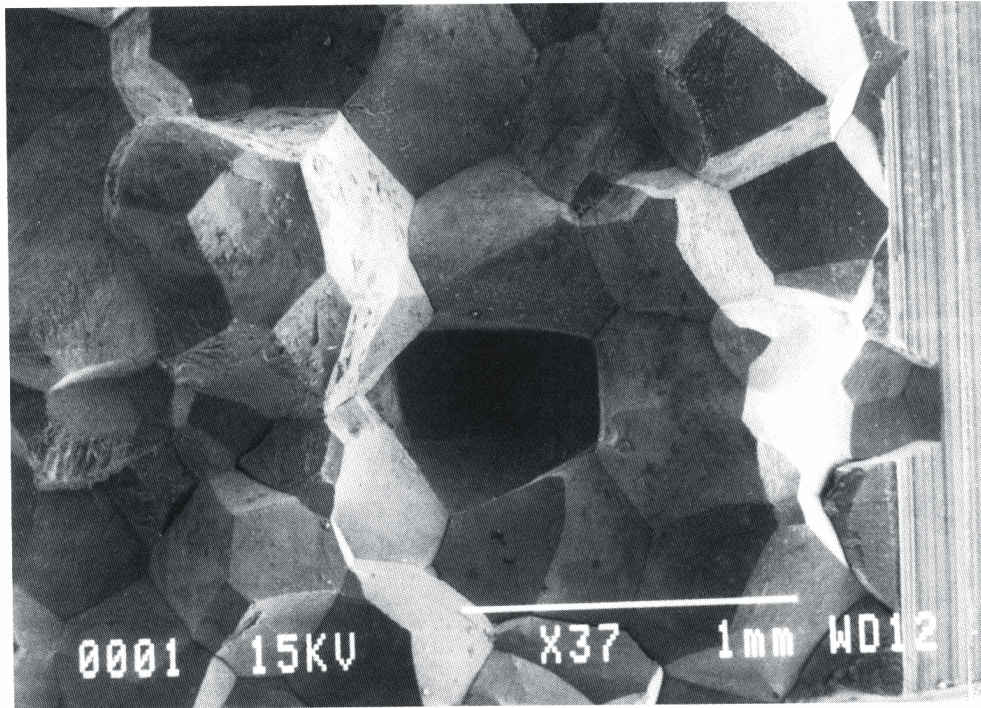
*et qui séparément n'auraient pas d'action...*



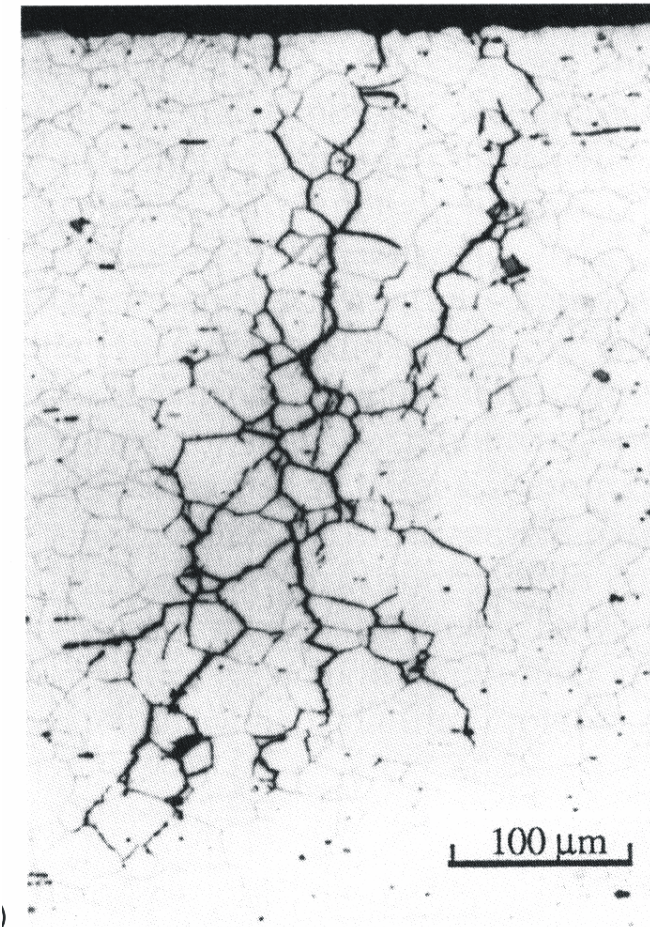
tube de générateur de vapeur  
fissuré en service par CSC dans  
sa partie coudée (contrainte)

→ *fissuration intergranulaire ou transgranulaire*

*touche essentiellement les aciers inoxydables austénitiques, les alliages de Ni  
mais peu les ferritiques (aciers courants)...*



**Surface de rupture fragile observée par microscopie électronique à balayage**

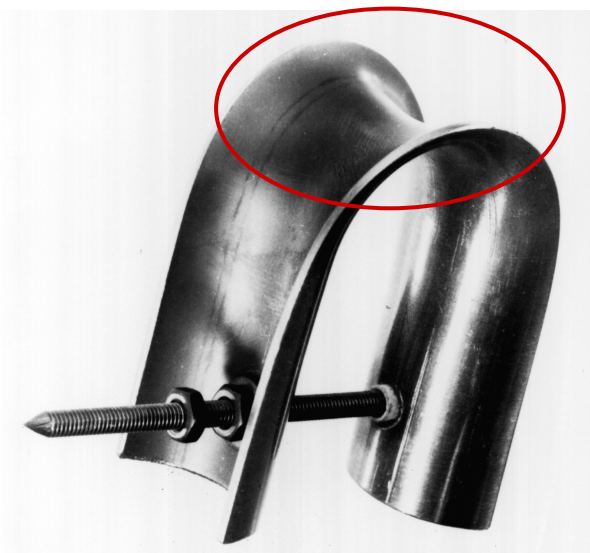


**micrographie optique**

**Fissuration intergranulaire par corrosion sous contrainte d'un acier austénitique (Z2 NCDU 25-20) en milieu caustique à 200°C**

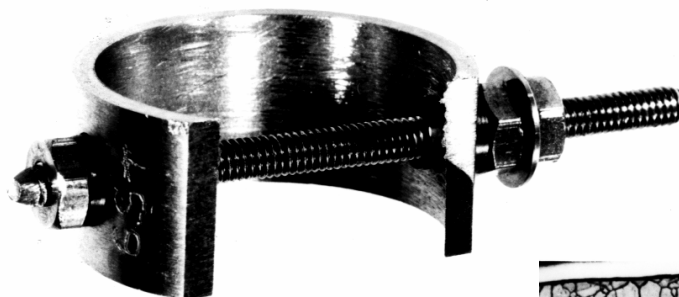
# Éprouvettes de test de la corrosion sous contrainte

*concentration de contraintes résiduelles*

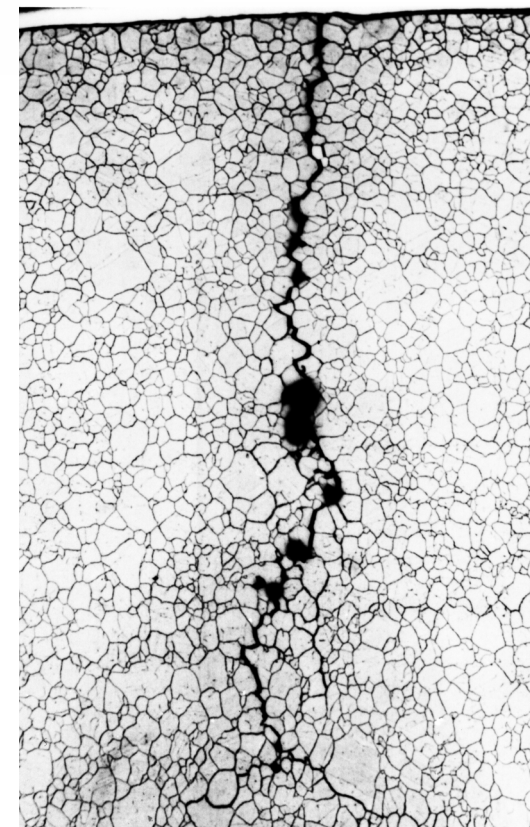
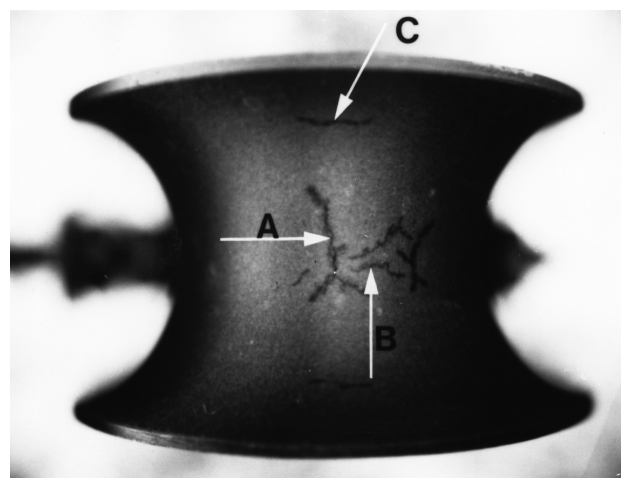


selle-de-cheval

après essai :  
apparition de fissures



C-ring



# Les différents modes de rupture

## 1 – La rupture fragile

### rupture trans ou intergranulaire

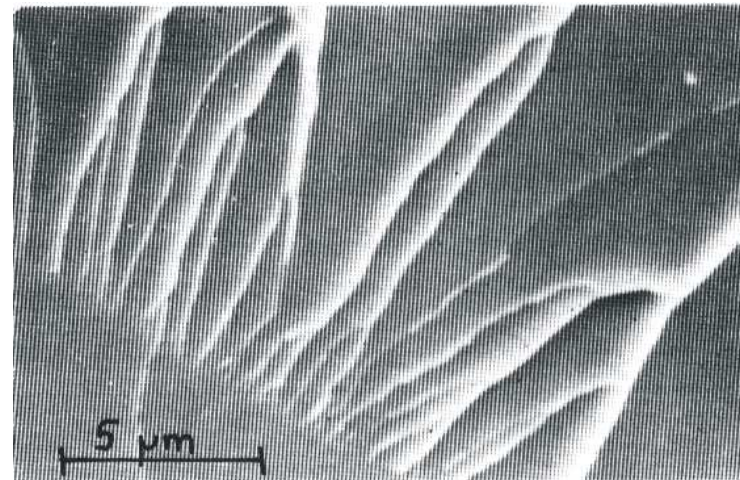
pas de déformation plastique macroscopique  
(propagation rapide de fissures  
sans grande consommation d'énergie )

#### a - La rupture transgranulaire

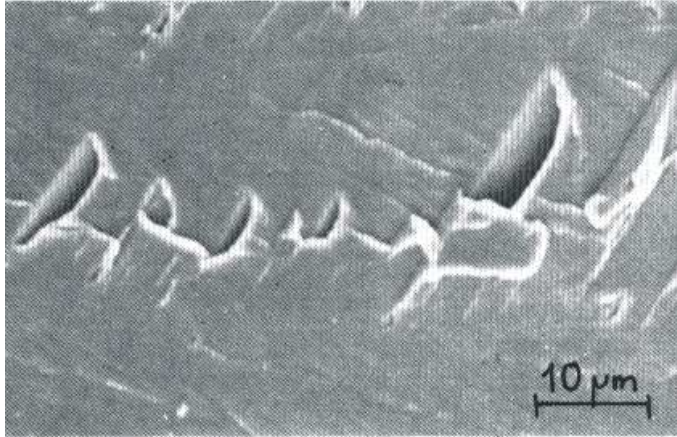
*rupture par clivage*

- Selon des plans cristallographique bien définis (plans de clivage)
- fréquente pour les structures BCC et HC (BCC : {100} )
- inexistante dans les FCC
- se produit à basse température ( $T < 0,2 T_F$ ) (contrainte de clivage < limite élastique)

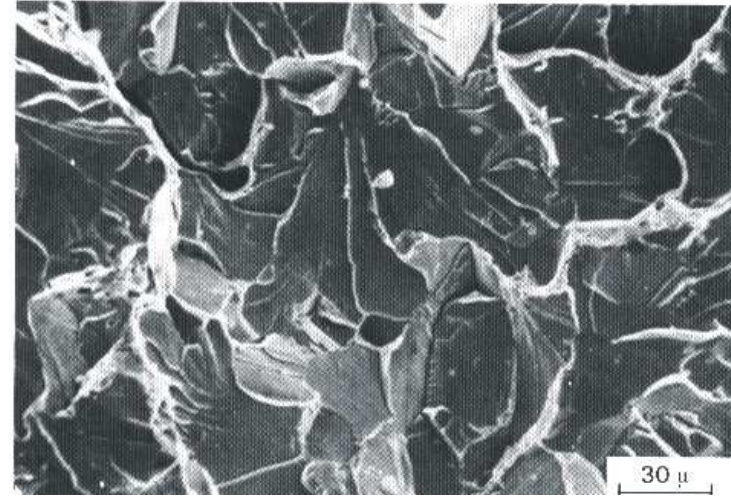
*métaux, minéraux...*



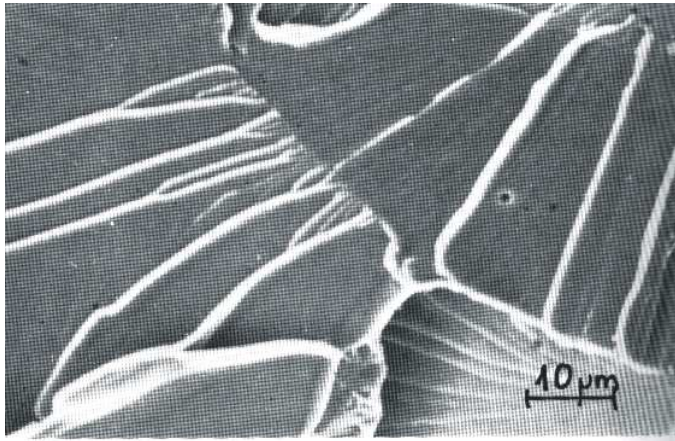
*rupture fragile à clivages (rivières)(MEB)*



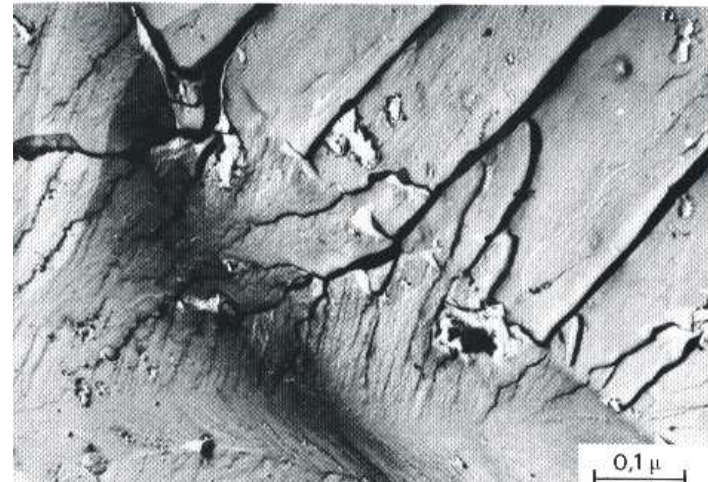
***rupture fragile à clivages (laguettes)(MEB)***



**observation en MEB**



***rupture fragile à clivages  
(franchissement d'un joint)(MEB)***

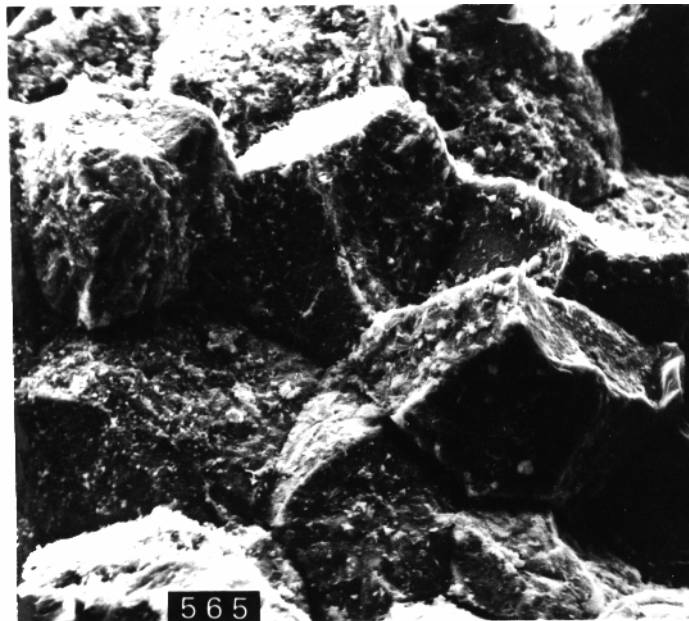


**observation en TEM**

## b - La rupture intergranulaire

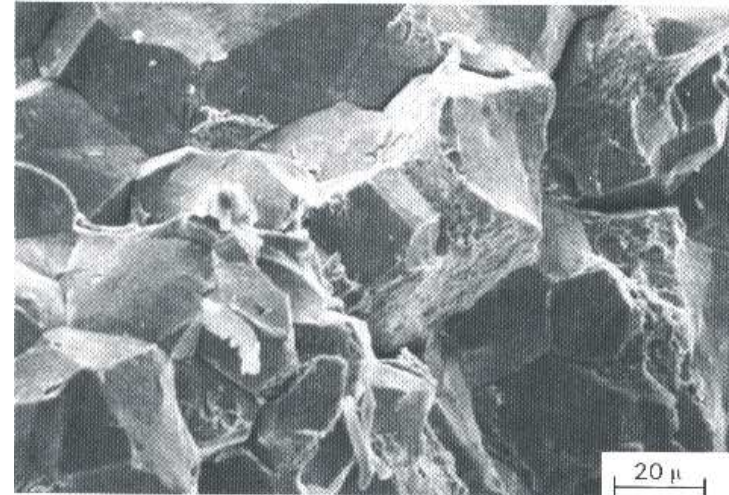
*par décohésion intergranulaire*

- fragilité des joints de grains
- phase précipitée
- pollution
- ségrégation de soluté  
(fragilité de revenu des aciers)



x 1000

**Base Ni : rupture fragile  
par pollution chimique  
intergranulaire**



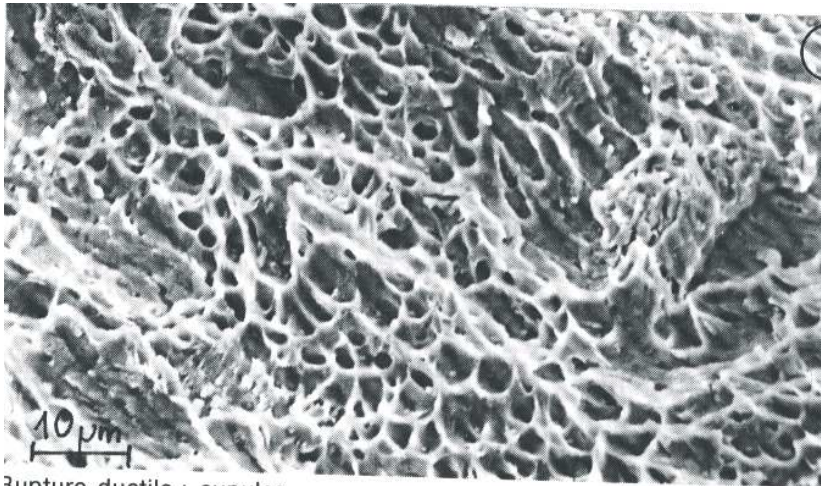
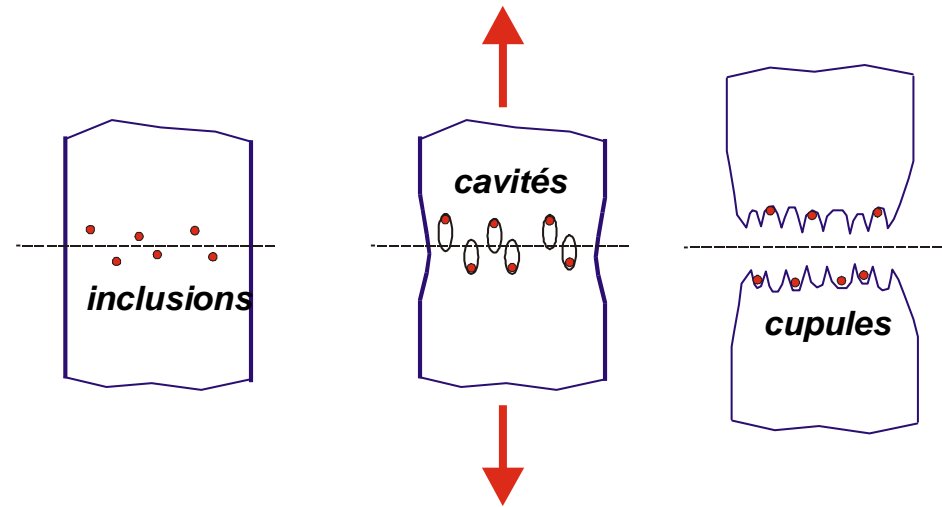
**observation en MEB**



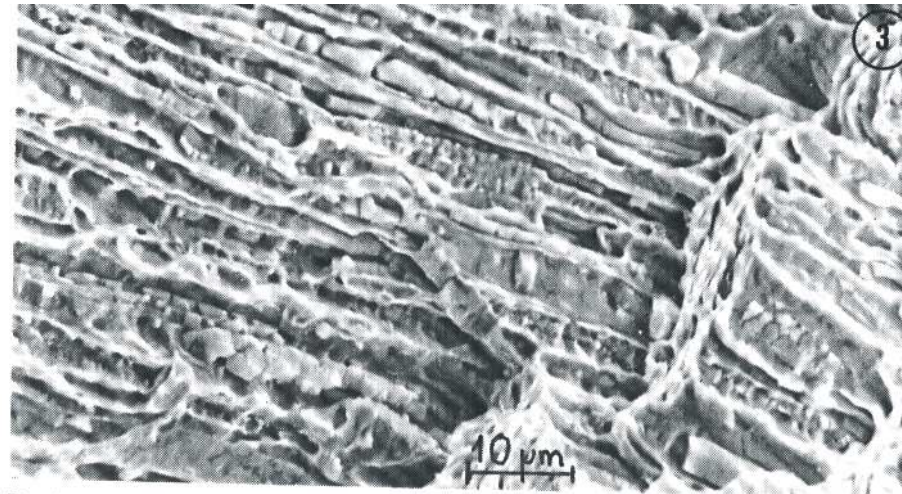
**observation en TEM**

## 2 – La rupture ductile

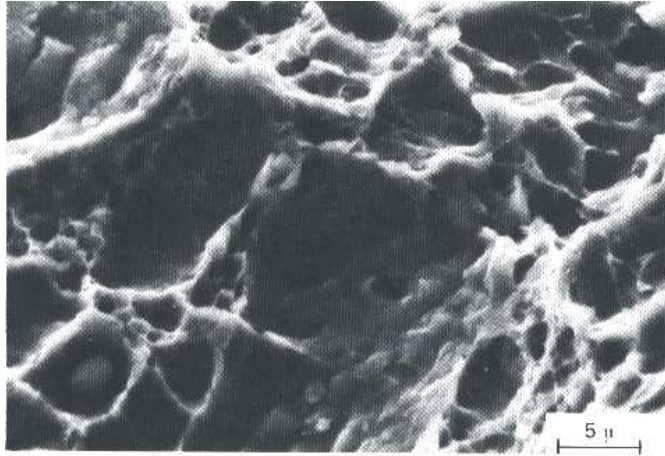
- déformations plastiques autour des inclusions
- formation de microcavités
- allongement de celles-ci dans le sens de la déformation
- coalescence par striction
- rupture finale



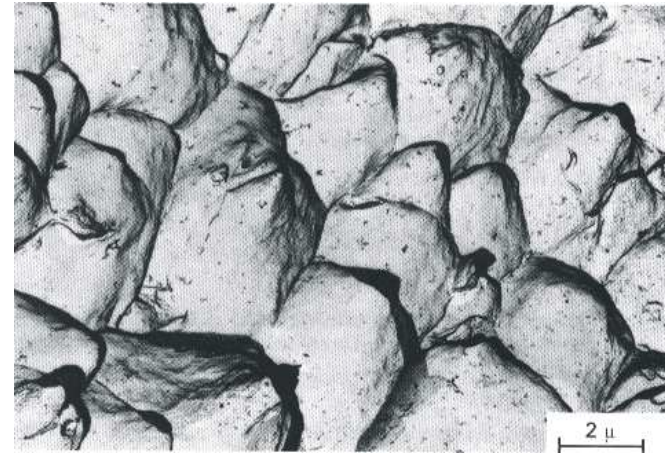
Rupture ductile : cupules.



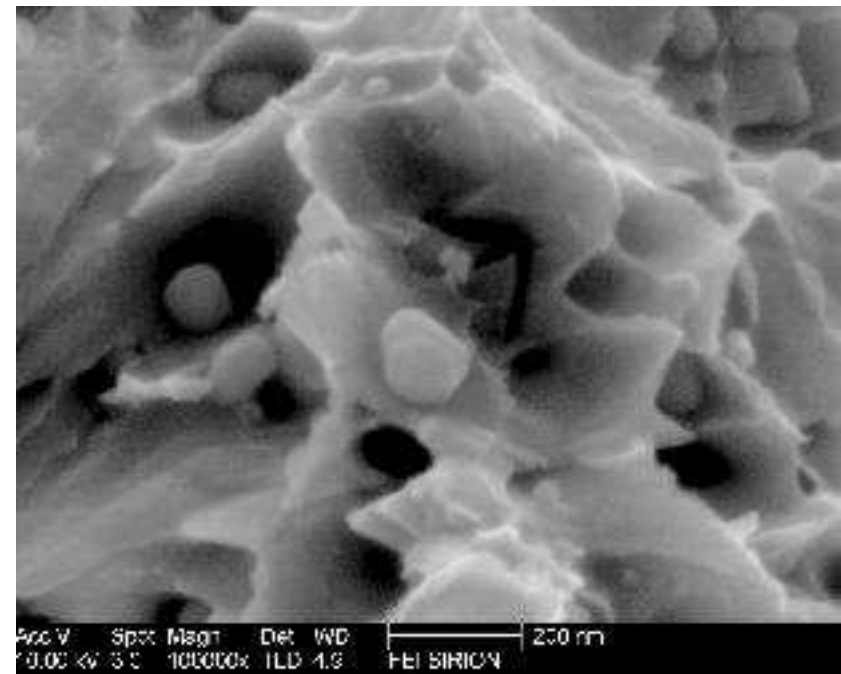
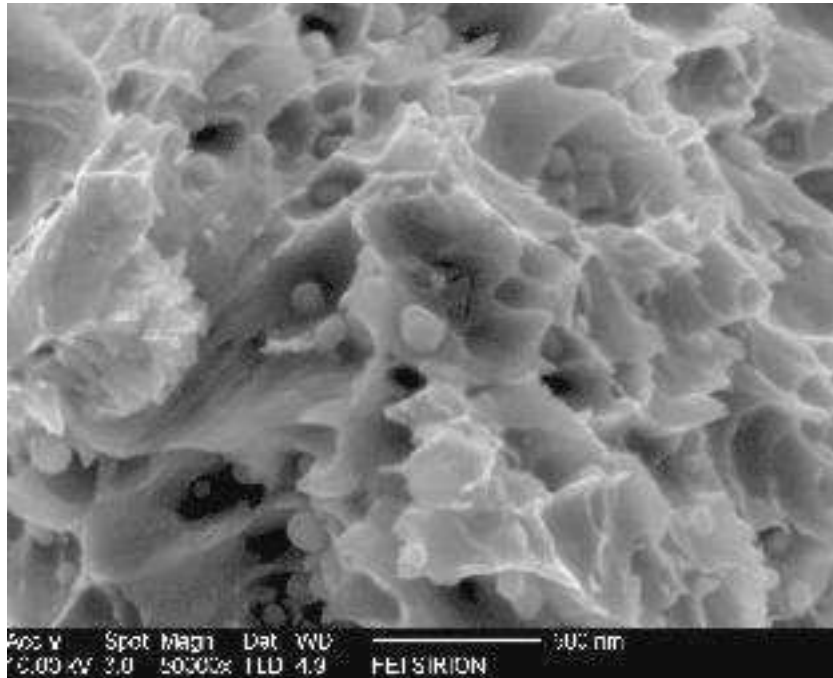
Rupture ductile : « bois pourri ».



*observation en MEB*



*observation en TEM*

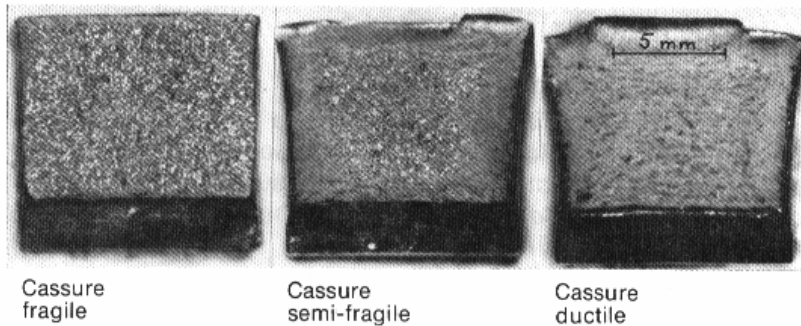
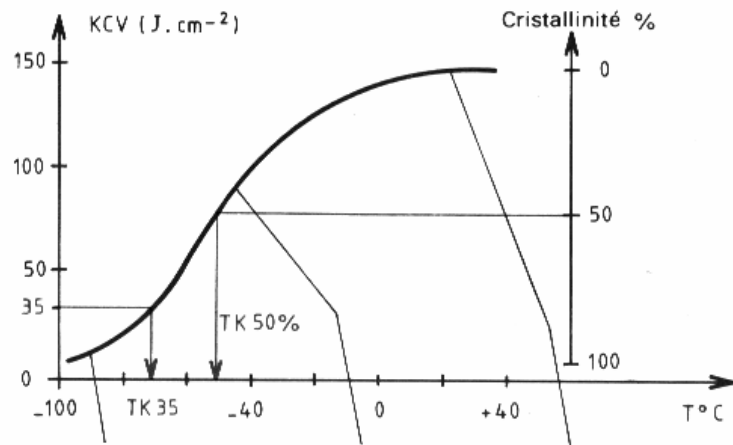


**Observations en MEB d'une rupture ductile dans un TDNi  
(Ni avec une dispersion de fines particules de ThO<sub>2</sub>)**

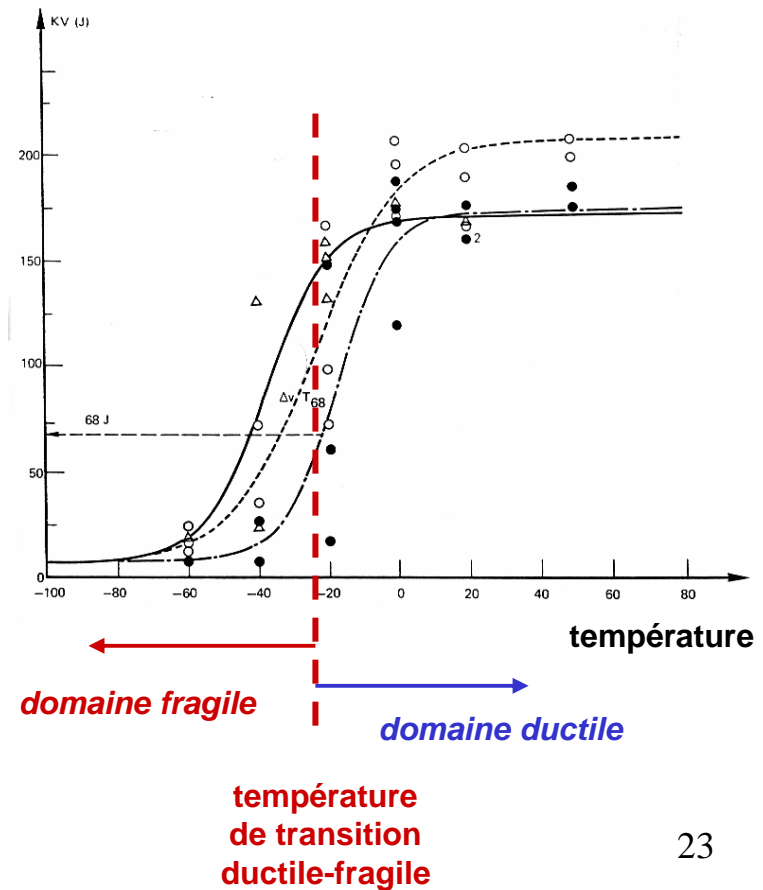
## Cas des aciers ferritiques (aciers courants) : la fragilisation par le froid...

Lorsque la contrainte de clivage est inférieure à la limite élastique, il y a un risque de rupture fragile par clivage.

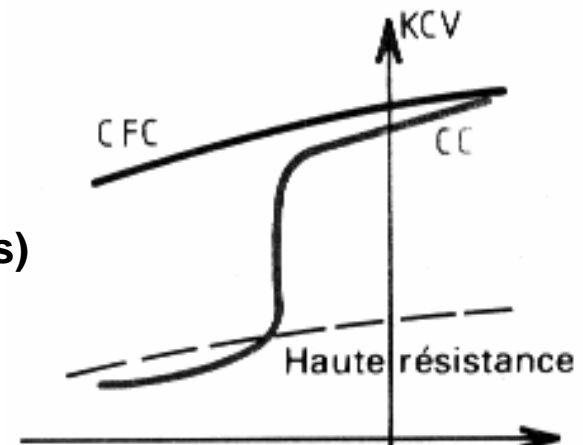
A basse température, la contrainte de clivage est inférieure à la limite élastique. On peut définir une température de transition « ductile-fragile »



résilience  
(résistance aux chocs)



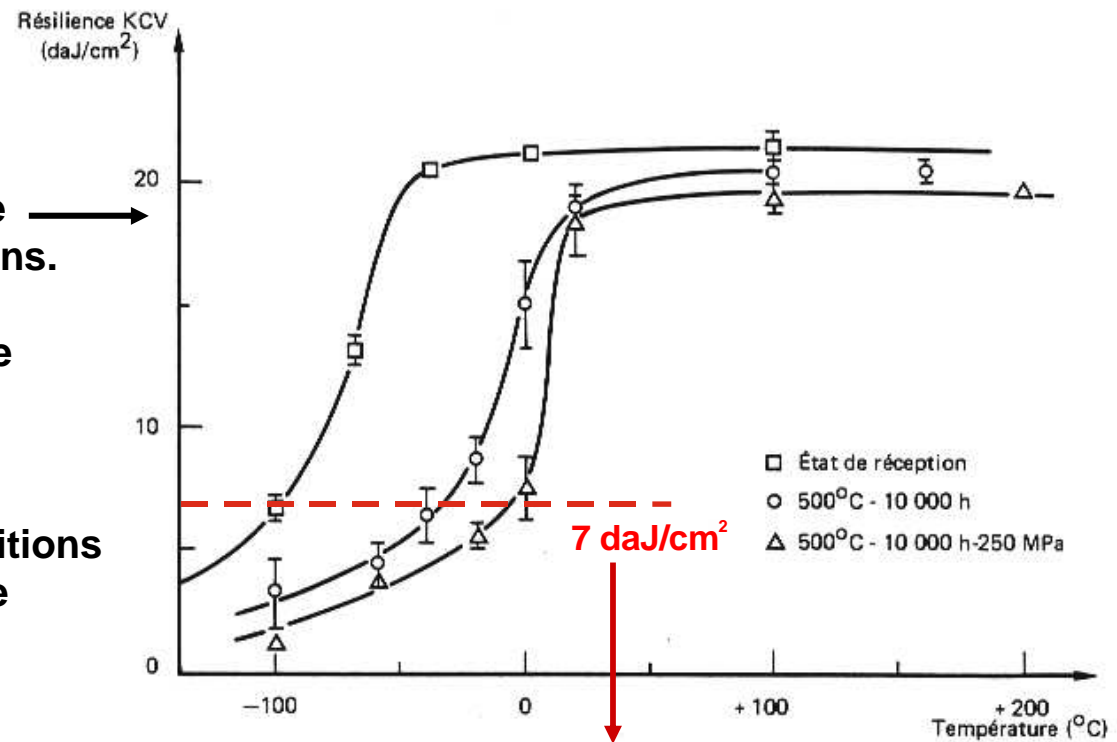
Ce type de comportement ne touche que les aciers ferritique (CC de structure cubique centrée), les aciers austénitiques (CFC de structure cubique à faces centrées) y échappent.



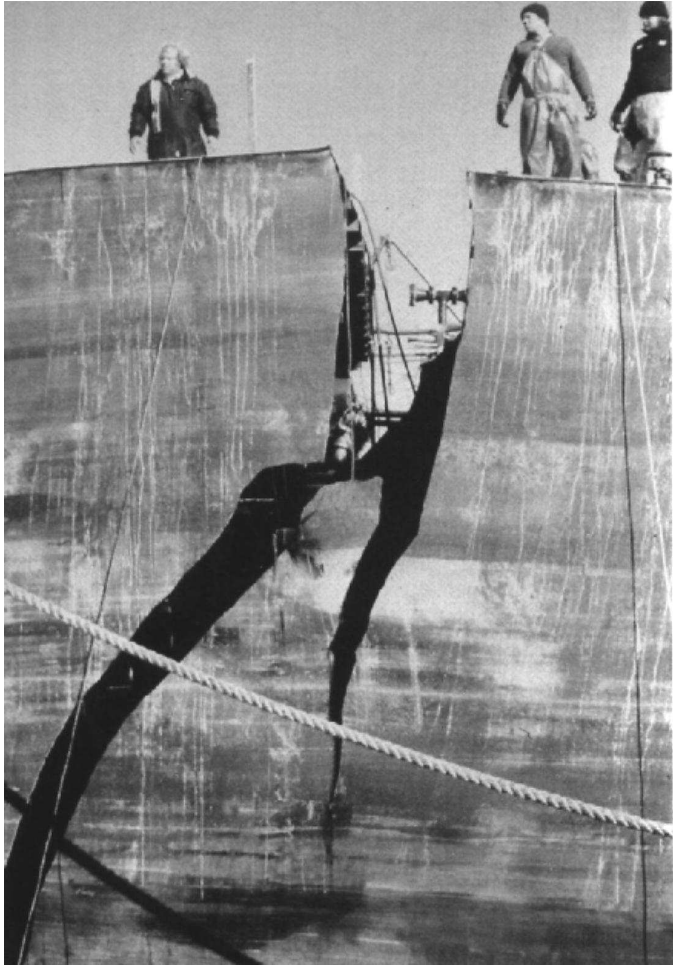
Après une utilisation prolongée à haute température, la température de transition augmente plus ou moins.

Un retour à la température ambiante sous tension peut provoquer une rupture brutale !

De même, un séjour dans des conditions de froid intense peut provoquer une rupture.



*limite conventionnelle permettant de définir une température de transition*



**rupture d'une barge aux USA  
durant un hiver violent**



**rupture d'un câble de soutien du pont de Sully-sur-Loire  
durant l'hiver 85, ayant entraîné la chute du pont**

Dans les aciers faiblement alliés, une fragilité apparaît lors de séjours prolongés à haute température (revenu ou vieillissement en service) vers 500°C.

Cette fragilisation peut disparaître par un traitement thermique au delà de 550°C (fragilisation de revenu réversible)

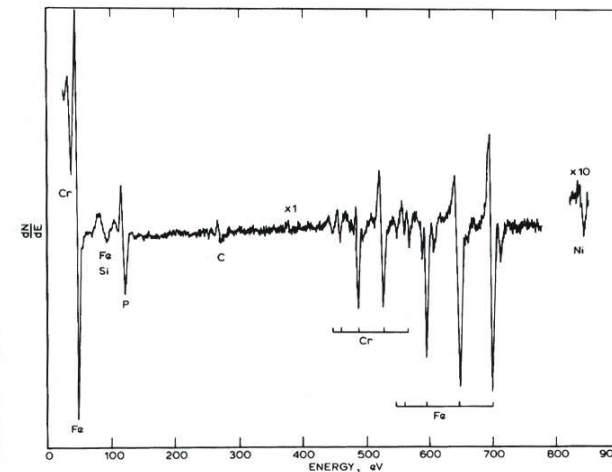
**Explication (modèles de McLean, Guttman)**

Le vieillissement thermique provoque la ségrégation dans les joints de grains d'éléments d'addition

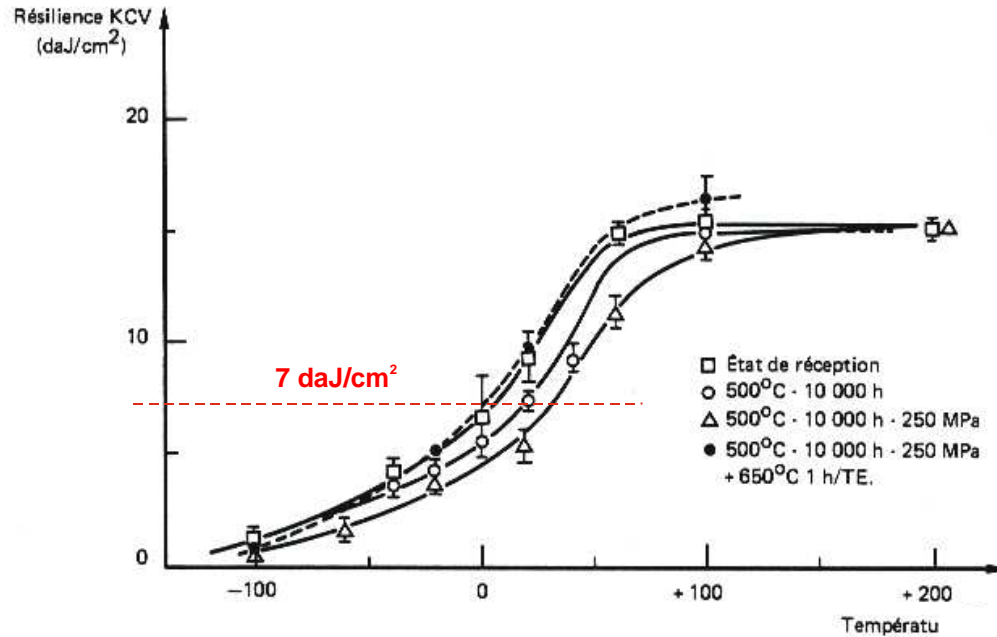
- certains peuvent avoir un rôle favorable (consolidation du joint : carbone dans les aciers)
- d'autres ont un rôle néfaste sur la résistance du joint
  - Sb, Sn, As, S et surtout P (extrêmement nocif même à faible teneur)

*Spectre Auger de la surface de rupture d'un acier ayant présenté une fragilité de revenu (1000h - 500°C)*

on observe la présence de Phosphore



- des éléments d'alliages (Ni, Mn) peuvent favoriser la ségrégation
- certains peuvent co-ségréger (effets synergétiques)
- d'autres (S) peuvent, en saturant le joint empêcher toute autre ségrégation...26



### Essai de vieillissement de l'acier pour boulonnerie 28 CDV5-07

#### Courbes de transition de la résilience

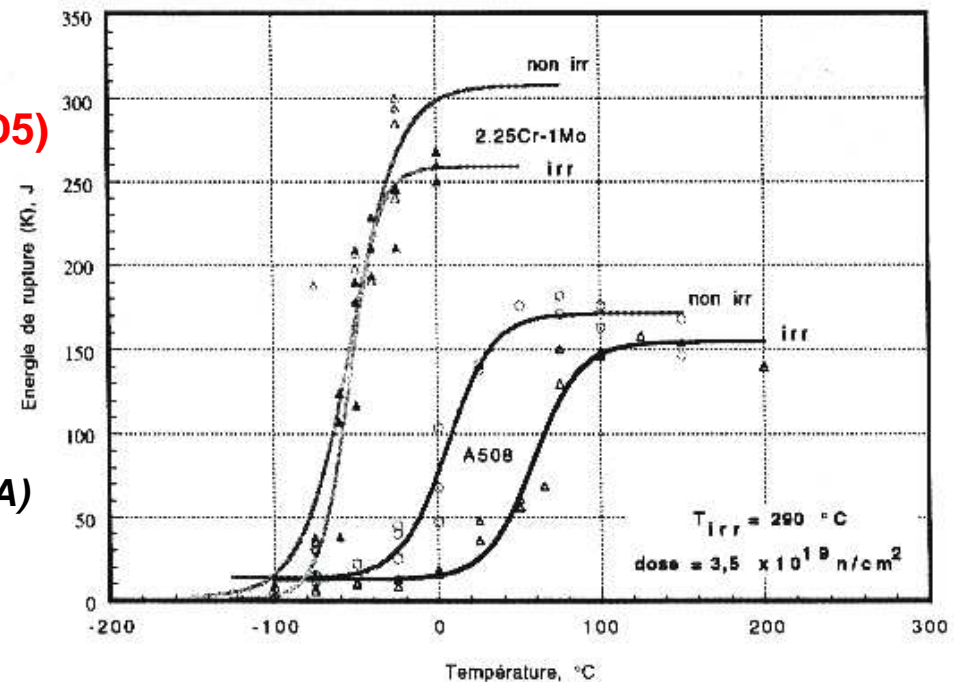
- à l'état de réception
- après vieillissement thermique
- après vieillissement thermique sous charge
- après un revenu à haute température

### Cas de l'irradiation de l'acier de cuve (16MND5)

L'irradiation neutronique peut provoquer dans les aciers de cuve de réacteurs nucléaires (en acier faiblement allié) des effets similaires de vieillissement :

→ programme de surveillance (France, USA)

→ recuit de régénération (Russie)



**En résumé, toute « structure », artificielle ou naturelle, quelle soit métallique, minérale ou même organique, qui est soumise à des sollicitations externes, dans un milieu souvent corrosif, va évoluer, vieillir et finalement va se rompre.**

**Le rôle du concepteur ou de l'utilisateur est de faire en sorte que cette « ruine » ne se produise pas ou le plus tard possible !**

**28 Janvier 1986 - 11h38  
*Explosion de la navette  
Challenger***

***A cause d'un simple joint en polymère  
rendu fragilisé par le froid...***

