

Lundi 6 Mai 2024

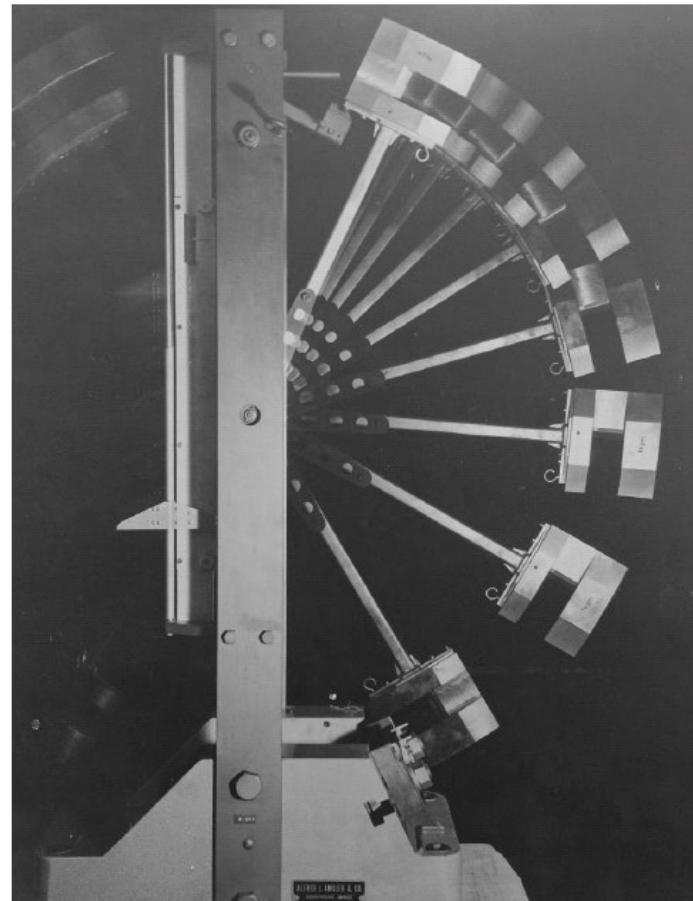
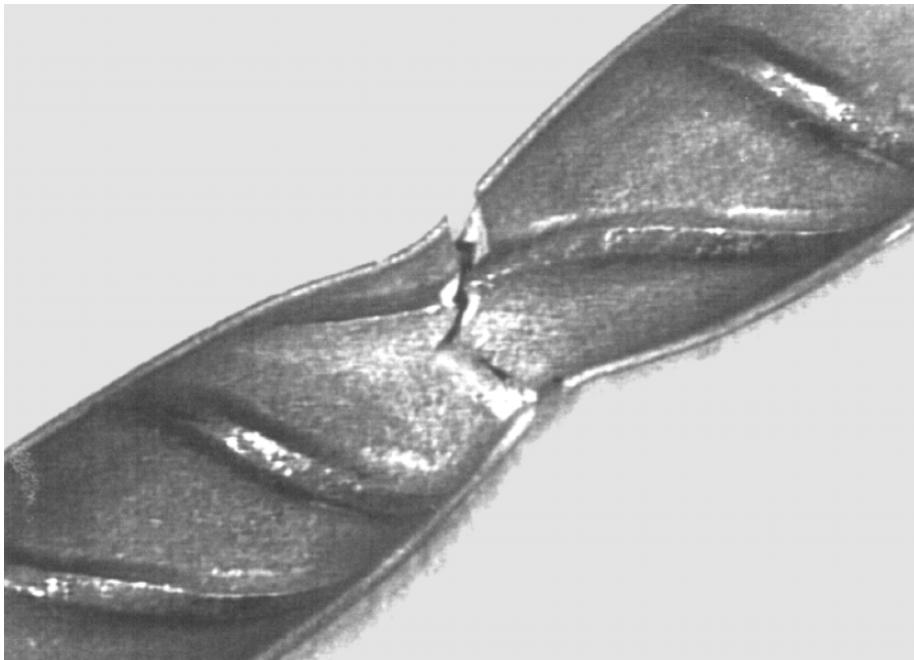
Propriétés mécaniques II

essai de dureté
ténacité d'un matériau (toughness)
essai de résilience

2 TP métaux: traction et résilience (C. Dénéréaz LMM)

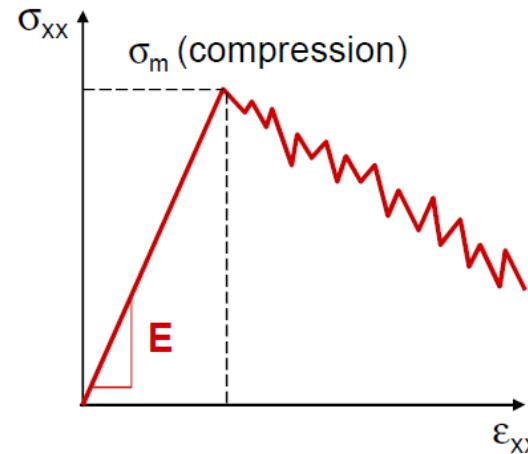
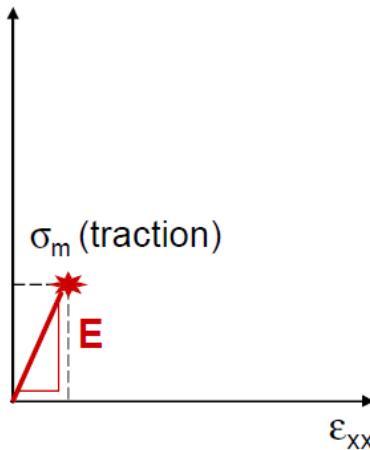
Essai de flexion par choc sur un barreau entaillé
(résilience)

Essai de traction sur barres d'armature



Comportements fragiles et ductiles

Les céramiques, mais aussi le béton, sont particulièrement **fragiles** en traction: elles rompent par **fracture** avant d'atteindre leur limite élastique. En compression, leur résistance peut être bien plus élevée.



Exemples:

saphir (Al_2O_3) * $E = 345 \text{ GPa}$

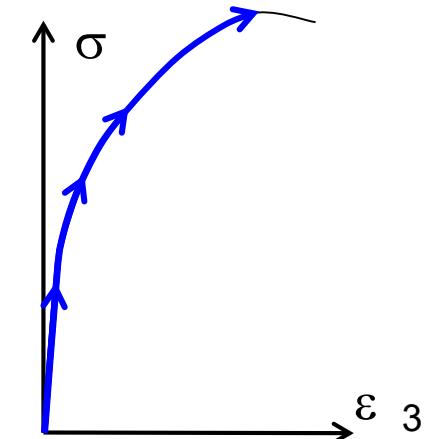
Compression: $\sigma_m \approx 2'000 \text{ MPa}$ / Traction: $\sigma_m \approx 400 \text{ MPa}$

Béton: $E = 30 \text{ GPa}$ (compression)

Compression: $\sigma_m \approx 30 \text{ MPa}$ / Traction: $\sigma_m \approx 3 \text{ MPa}$

Les métaux et alliages ont un **comportement ductile et symétrique**: limites identiques en compression et traction.

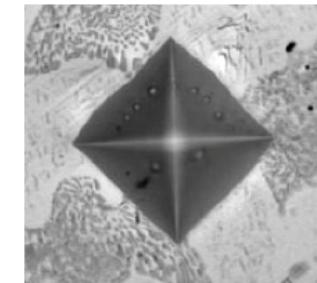
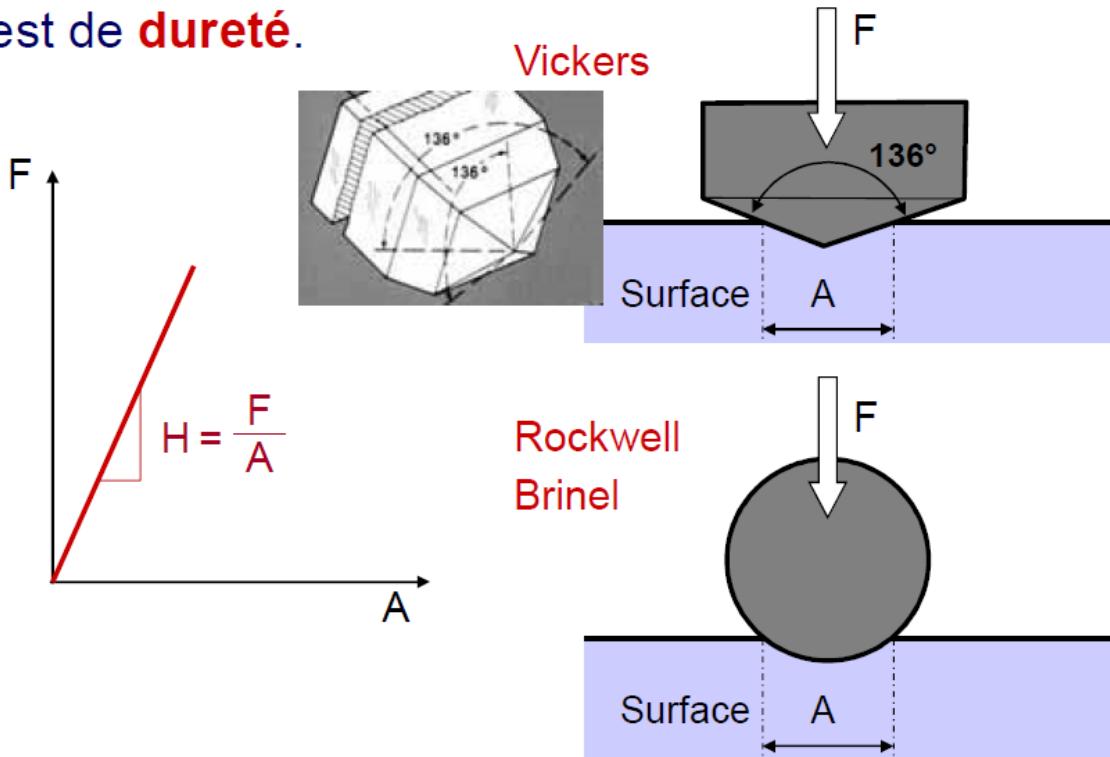
Exception: les aciers deviennent fragiles aux basses températures (transition ductile-fragile).



L'essai de dureté (hardness test)

Caractérise la résistance opposée par une éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur. Il y a formation d'une empreinte par plastification locale et donc dépassement de la limite élastique.

test de **dureté**.



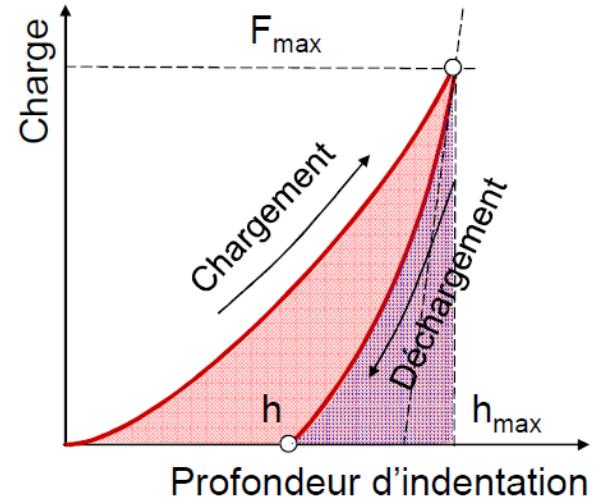
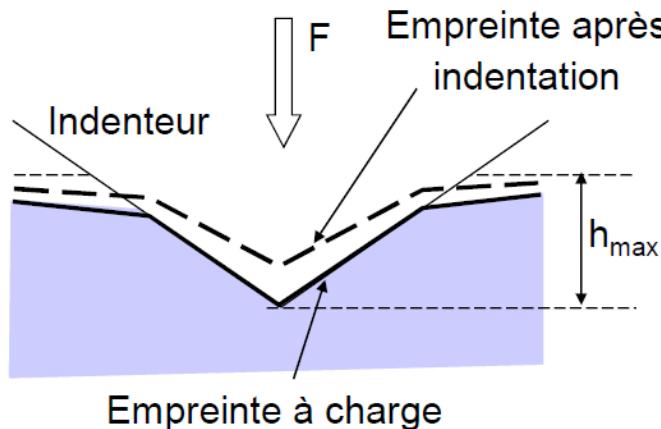
Ni - Cr - Mo - Ti



Matériau fragile

Cours No 7

Test de dureté: après remontée de l'indenteur, on mesure la taille de l'empreinte



La taille de l'empreinte pour une charge F donnée permet de calculer la dureté.

Vickers

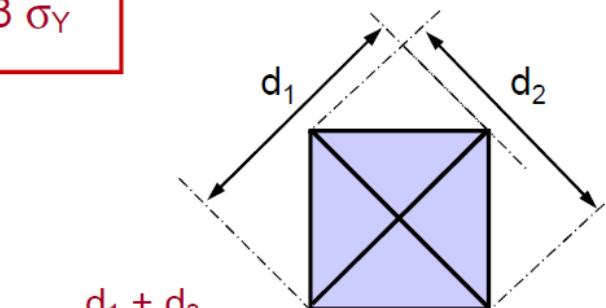
$$H_V = 0.189 \frac{F \text{ [N]}}{d^2 \text{ [mm}^2]}$$

$$H_V \approx 3 \sigma_Y$$

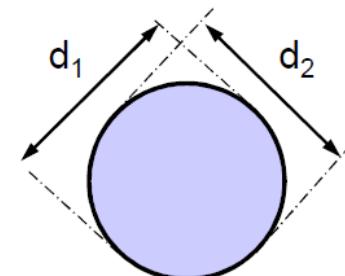
La dureté Vickers permet d'apprécier la limite élastique du métal.

Brinell

$$H_B = 0.102 \frac{2F \text{ [N]}}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \text{ [mm}^2]}$$



$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

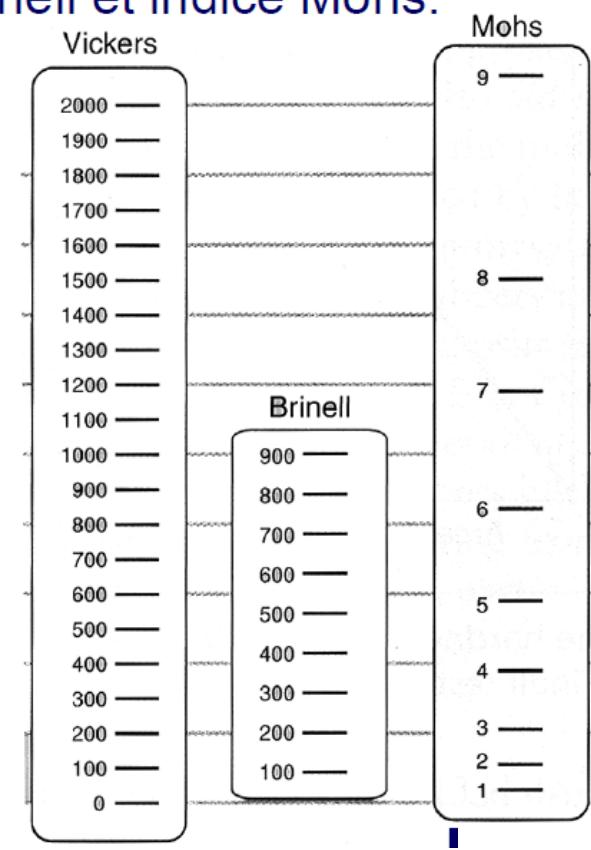


Différents indenteurs ... différentes duretés ...

Quelques duretés typiques sont données ci-contre, avec une conversion entre duretés Vickers, Brinell et indice Mohs.

1	Talc	$Mg_3Si_4O_{10(OH)_2}$
2	Gypse	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcite	$CaCO_3$
4	Fluorine	CaF_2
5	Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(OH^-, Cl^-, F^-)$
6	Orthose	$KAlSi_3O_8$
7	Quartz	SiO_2
8	Topaze	$Al_2SiO_4(OH^-, F^-)_2$
9	Corindon	Al_2O_3
10	Diamant	C

Indice de dureté Mohs



Il existe encore d'autres échelles, e.g. la dureté Rockwell HRC pour les aciers trempés.

L'essai de dureté

- Caractérise la résistance à la déformation plastique d'un matériau par une manière simple et rapide
- La dureté = la résistance opposée par l'éprouvette à la pénétration d'un corps plus dur (l'empreinte prouve que la limite élastique a été dépassée)
- L'essai de dureté ne fournit qu'une seule valeur (utile pour caractériser un mode de durcissement)
- Peut être pratiqué sur les surfaces planes de quelques mm^2
- **Essai non destructif, rapide, transportable et économique**
- Permet d'estimer rapidement et à moindre cout la limite élastique des aciers :

$$HV \approx 3\sigma_y \text{ (exprimée en MPa)}$$

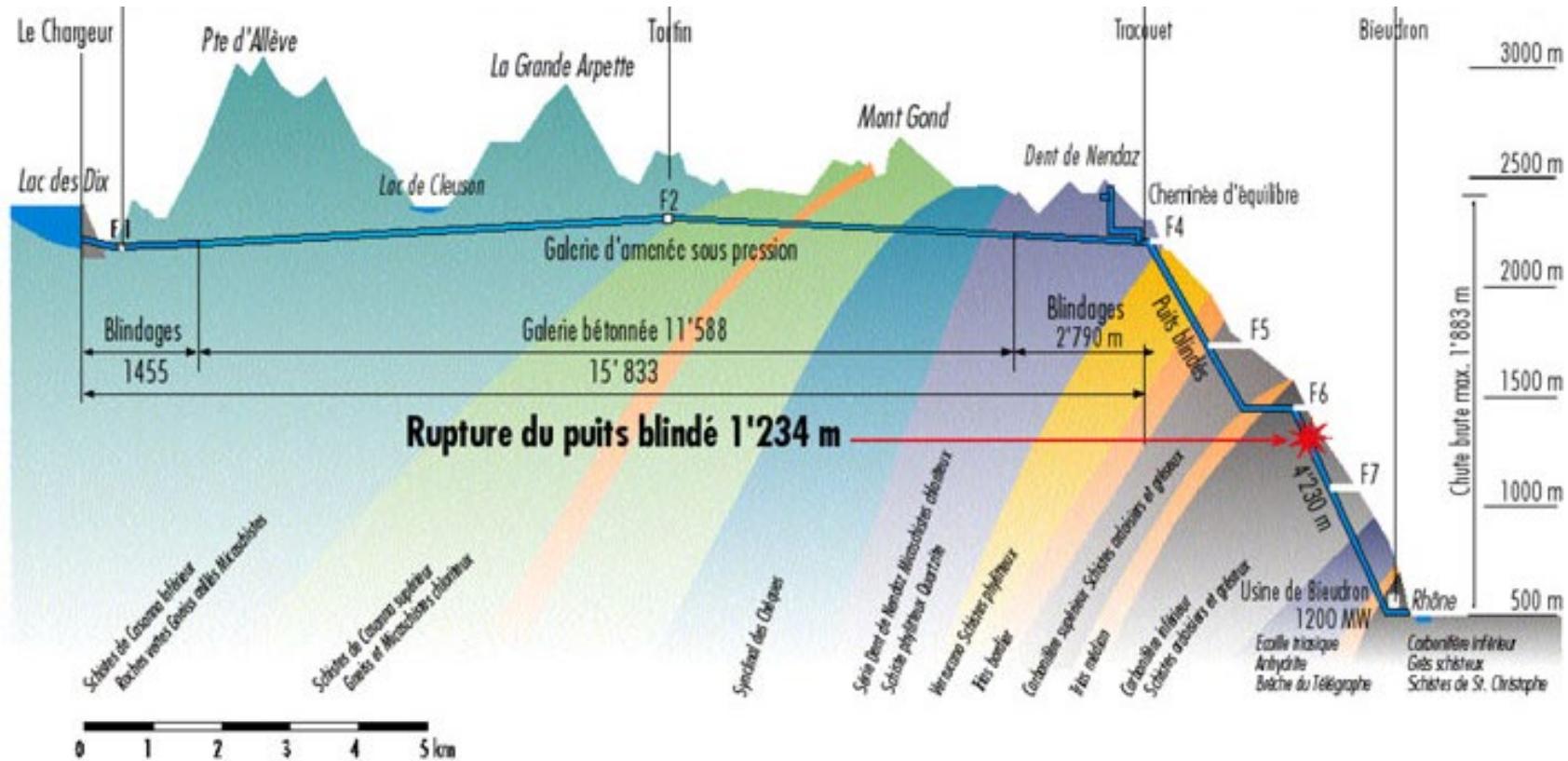
La ténacité

La résistance d'un matériau n'est pas tout: de nombreux accidents graves (conduites d'eau ou de gaz, avions, bateaux, ...) sont dus à la **propagation rapide de fissures**, menant à la **rupture**. Il faut définir une autre propriété des matériaux: leur **ténacité**.



Ténacité = résistance à la propagation de fissure.

Source: ISM
M. Rappaz



Le 12 décembre 2000 vers 20h10, la conduite forcée souterraine qui amène les eaux du barrage de Grande Dixence à l'usine de Bieudron a cédé à une altitude de 1'234 m.

La conduite a subi une déchirure de 9 m de long sur 60 cm de large.

Malgré la rapidité avec laquelle les dispositifs de sécurité ont fonctionné, une quantité d'eau importante a fait surface dans la région de Nendaz et de Fey.

Plusieurs chalets et granges ont été emportés et une centaine d'hectares de forêts, pâturages et vergers ravagés par la boue. **Trois personnes ont péri ensevelies.**

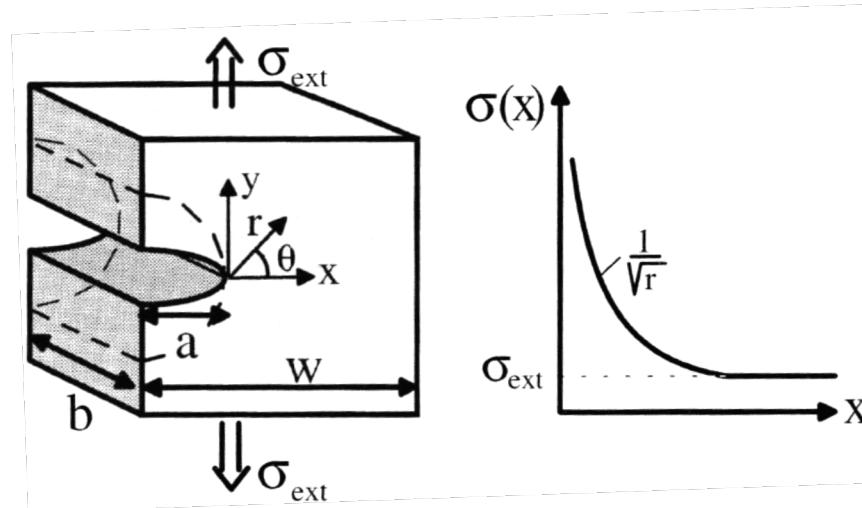
La ténacité

En traction ou cisaillement, un matériau peut rompre à des niveaux de contraintes bien inférieurs à R_m (ultimate tensile strength) mesurée en traction uni-axiale quasi-statique.

Cela s'explique par :

- la présence de défauts dans les matériaux (fissures, entailles, rayures, ...)
- et la concentration des contraintes en pointe de fissure (effet d'entaille).

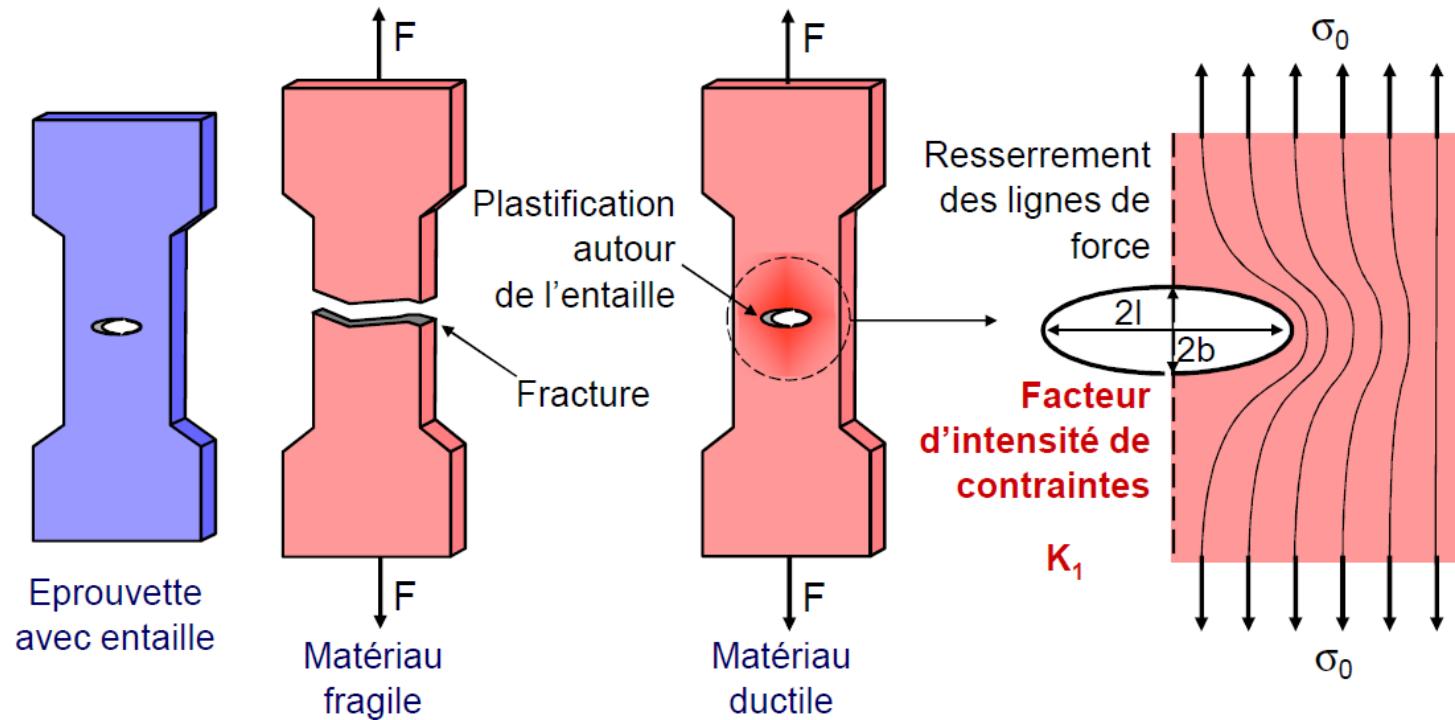
La rupture correspond à la propagation quasi-instantanée de la fissure avec ou sans déformation plastique (rupture fragile ou ductile).



Concentration de contrainte en avant de la fissure. $\sigma(x)$ est la contrainte de traction sur la section restante et r la distance à la pointe de la fissure

Résistance à la propagation de fissure: la ténacité

Un matériau **fragile** se différencie d'un matériau **ductile** par son comportement lors de la propagation d'une fissure.



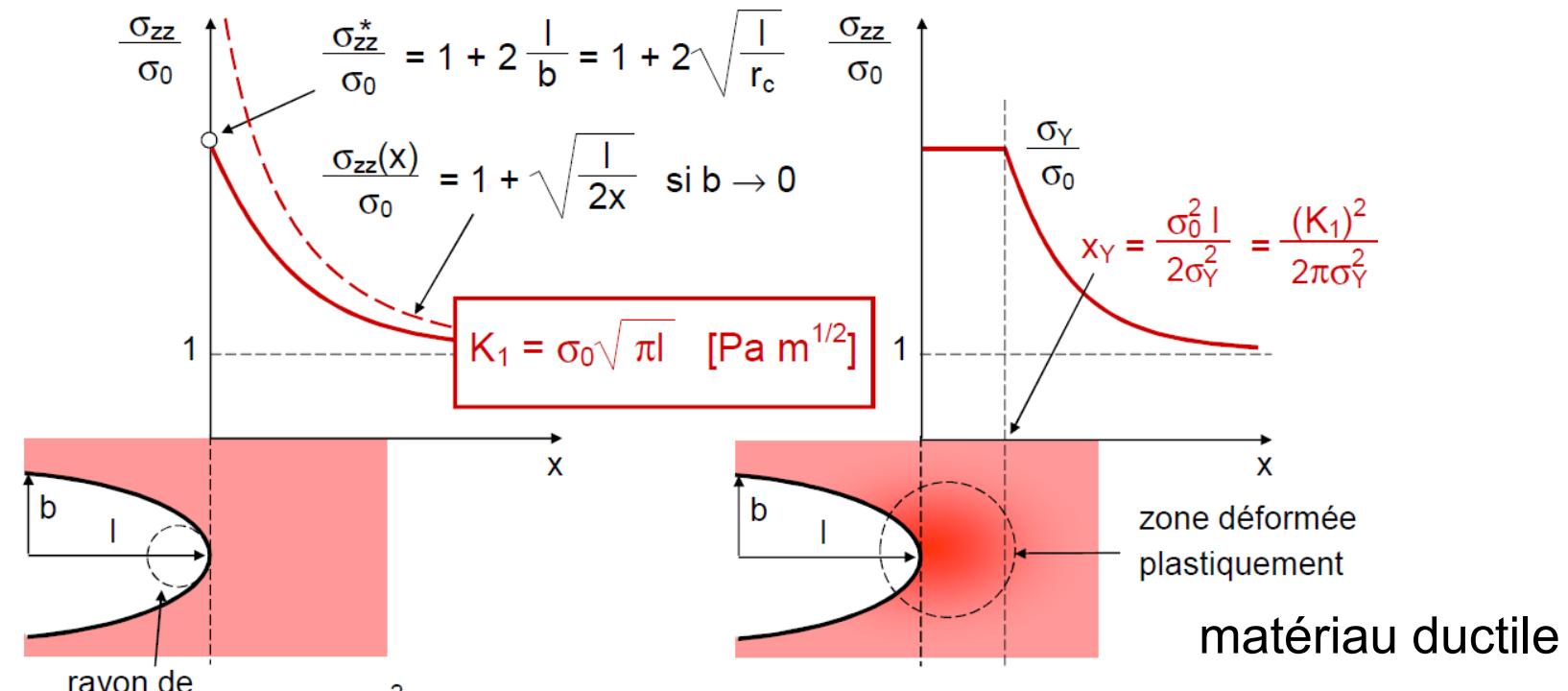
Propagation instantanée de la fissure



Propagation de la fissure ralenti par la plastification en avant de la tête de fissure.

Effet d'entaille à l'avant d'une fissure elliptique (demi-axes l et b) préexistante sous contrainte σ_0

Le facteur d'intensité de contraintes K_1 caractérise les fissures les plus nocives.



matériau fragile

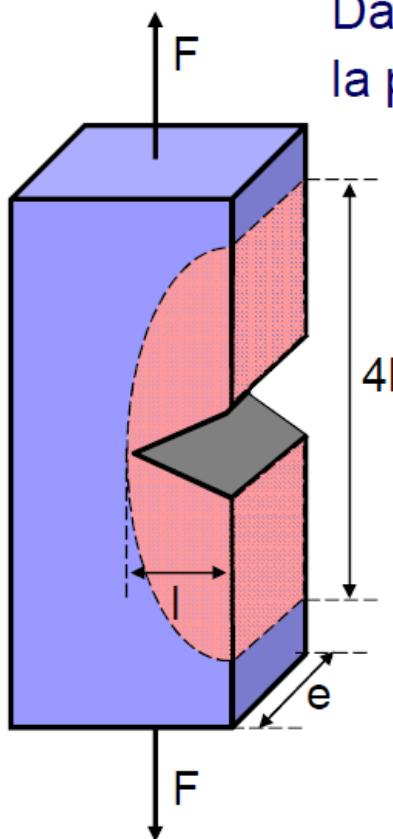
$$r_c = \frac{b^2}{l}$$

si $b \rightarrow 0$, $\sigma_{zz}(x) = \sigma_0 + \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi l}{2\pi x}} = \sigma_0 + K_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi x}}$

avec $K_1 = \sigma_0 \sqrt{\pi l}$ = facteur d'intensité de contrainte

K₁ caractérise le chargement dans un matériau (contrainte σ_0) contenant une fissure infiniment plate de taille l .

Rupture Fragile (domaine élastique)



Dans ce cas, il y a deux forces antagonistes agissant sur la propagation de la fissure:

- Un **relâchement des contraintes** dans une zone dont le volume est en rouge, donc un gain d'énergie élastique

$$W_E = -\frac{\sigma^2}{2E} \pi l^2 e \quad \text{Volume de la zone rose} \approx \pi l^2 e$$

- La **création de deux surfaces**, dont l'énergie de surface est γ

$$W_\gamma = 2 \gamma l e$$

- Energie totale mise en jeu pour la création d'une fissure de longueur l

$$W(l) = -\frac{\sigma^2}{2E} \pi l^2 e + 2 \gamma l e$$

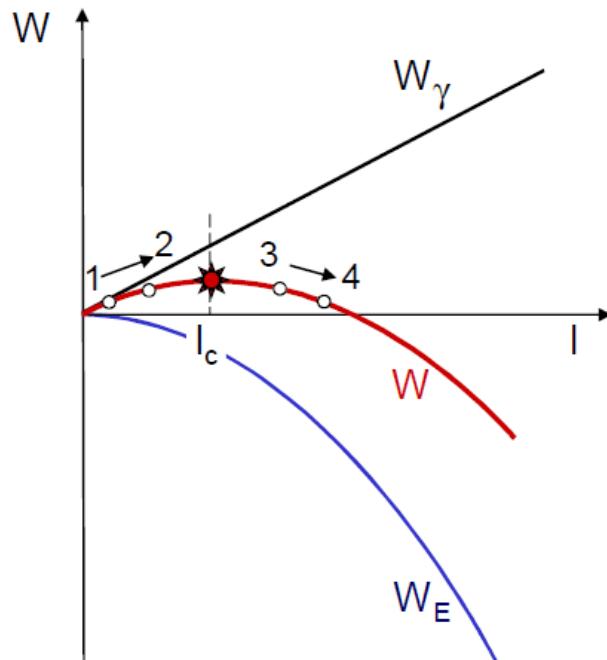
γ = énergie d'interface en J/m^2

i.e. énergie nécessaire pour "casser" les liaisons atomiques

Rupture fragile

Pour savoir si la fissure va avancer, il faut comparer la différence d'énergie associée à une avance incrémentale δl de celle-ci.

$$\delta W = W(l + \delta l) - W(l) = -\frac{\sigma^2}{2E} \pi e [(l + \delta l)^2 - l^2] + 2\gamma e \delta l \approx \left[-\frac{\sigma^2}{E} \pi l + 2\gamma \right] e \delta l$$



On trouve ainsi une **longueur critique de fissure**:

$$l_c = \frac{2\gamma E}{\pi\sigma^2}$$

Si $l < l_c$ (chemin 1 → 2, $\delta W > 0$):

Cela coûte de l'énergie de faire avancer la fissure et donc **celle-ci est stable**.

Si $l > l_c$ (chemin 3 → 4, $\delta W < 0$):

Il y a un gain d'énergie à faire avancer la **fissure** et celle-ci **se propage spontanément**.

On peut donc accepter des microfissures dans un matériau MAIS leur taille doit rester inférieure à **l_c** .

Sur une population de fissures, la fissure la plus nocive est **celle de plus grande taille**.

Rupture fragile et ductile

Inversement, pour une fissure de longueur l , on peut trouver une **contrainte critique** σ_c au-delà de laquelle une fissure de longueur l avance spontanément.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}}$$

ou

$$K_1 = \sigma_c \sqrt{\pi l} = \sqrt{2\gamma E} = K_{1c}$$

La grandeur $K_{1c} = (2\gamma E)^{0.5}$ [Pa m^{0.5}] apparaît comme une propriété du matériau, moyenne géométrique de l'énergie de surface et du module d'élasticité. Elle a été trouvée en prenant un matériau **idéalement fragile**.

Pour généraliser cette expression, notamment à des **matériaux ductiles**, Griffith introduit **l'énergie G_c** nécessaire pour faire avancer la fissure.

$$K_{1c} = \sqrt{G_c E}$$

$$\text{avec } G_c = 2\gamma + G_c^p > 2\gamma$$

Energie de surface

Energie de déformation plastique

La taille de la zone plastique x_Y en avant d'une fissure variant comme K_{1c}^2/σ_Y^2 , le matériau est d'autant plus fragile que sa ténacité K_{1c} est faible et/ou que sa limite élastique σ_Y est élevée.

3 modes de rupture

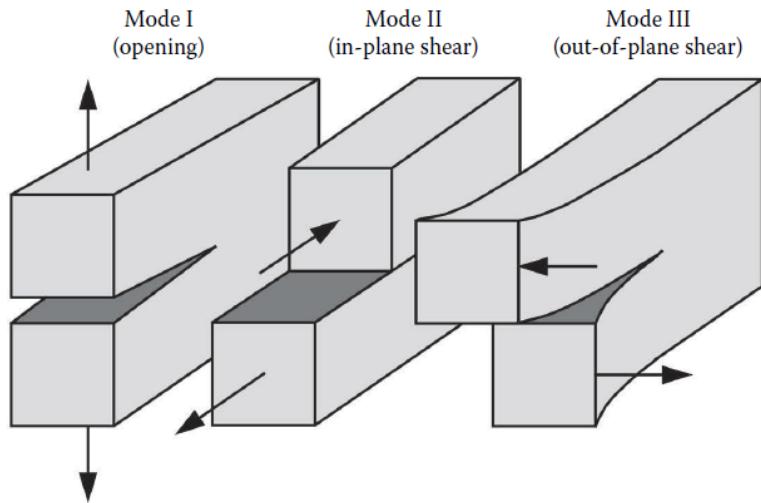


FIGURE 2.14

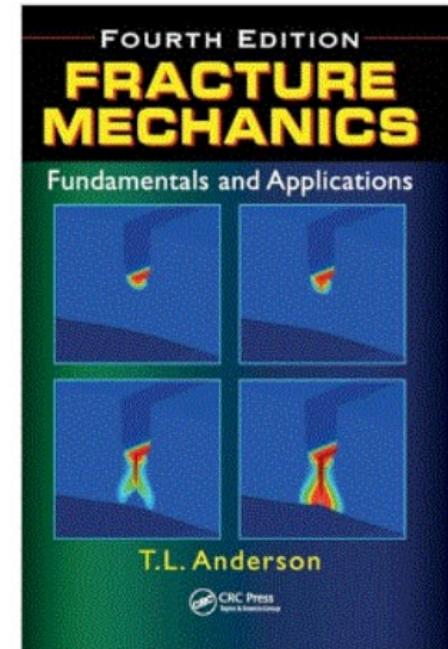
The three modes of loading that can be applied to a crack.

TABLE 2.1

Stress Fields Ahead of a Crack Tip for Modes I and II in a Linear Elastic, Isotropic Material

	Mode I	Mode II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{zz}	0 (Plane Stress) $v(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane Strain)	0 (Plane Stress) $v(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane Strain)
τ_{xz}, τ_{yz}	0	0

Note: v is Poisson's ratio.



Fracture of Materials, master class
to GC, MX and GM, Prof. JF
Molinari and JM Drezet.

En résumé

La ténacité K_{1C} d'un matériau, ou sa résistance à la propagation d'une fissure, est la moyenne géométrique du module élastique et de l'énergie G_C nécessaire pour la faire avancer.

Les matériaux fragiles sont caractérisés par $G_C = 2\gamma$, les matériaux ductiles par $G_C = (2\gamma + G_C^{pl})$.

Le facteur d'intensité de contrainte K_1 en avant d'une fissure de longueur l est défini comme $(\sigma (\pi l)^{1/2})$.

Lorsque $K_1 = K_{1C}$, la fissure se propage spontanément.

$$K_{1c} = \sqrt{EG_c}$$

ténacité en MPa \sqrt{m}

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} \text{ en MPa} \sqrt{m}$$

(cas b $\rightarrow 0.$)

Dimensionnement à la rupture: $\sigma \sqrt{\pi l} < K_{1C}$

donc $\sigma < K_{1C} / \sqrt{\pi l_{max}}$ avec $l_{max} = \text{Max}(l)$ pour une population de fissures

ou $l < l_c = (K_{1C})^2 / (\pi \sigma^2) = \text{longueur critique de fissure pour un } \sigma \text{ donné.}$

Analogie au dimensionnement statique en service: $mg < f SR_{0.2}$

Pour les métaux, E et G_c sont élevés donc la ténacité est aussi élevée.

S'ils sont en plus ductiles, 2γ devient négligeable devant G_c^{pl} .

Charpy impact test

L'énergie de rupture sous choc est mesurée lors de **l'essai de résilience à l'aide du mouton de Charpy**.

L'échantillon est entaillé et sa géométrie est standardisée.

KU ou KV pour entailles en U ou en V:

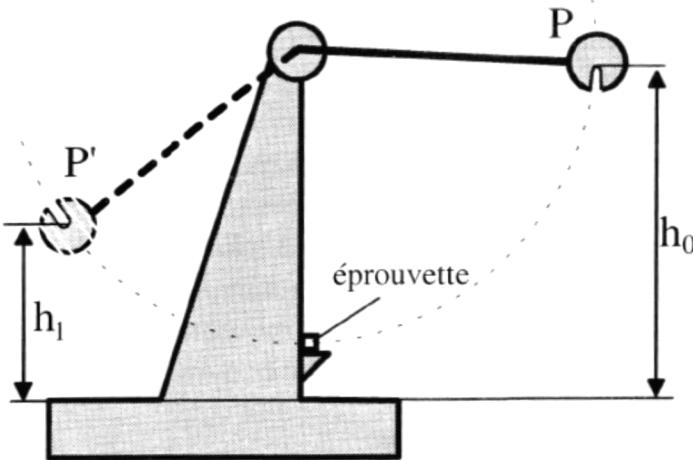


Fig. 7.5 Le mouton de Charpy.

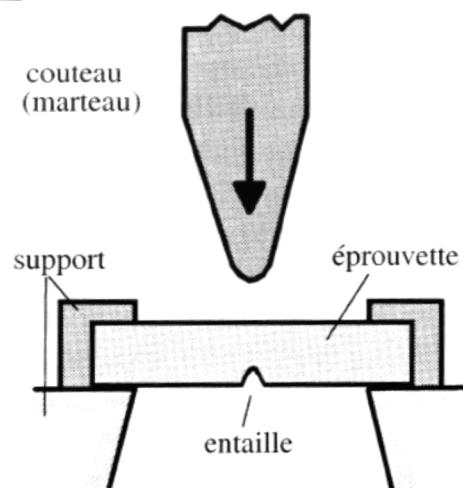


Fig. 7.6 Appui de l'éprouvette vue d'en haut (depuis l'axe du pendule)

$$K = mg(h_0 - h_1) \text{ (J)}$$

$$\text{Résilience} = G = K/S \text{ (J/m}^2\text{)}$$

avec S = surface de rupture

1- Seuls des résultats obtenus sur des éprouvettes identiques sont comparables !

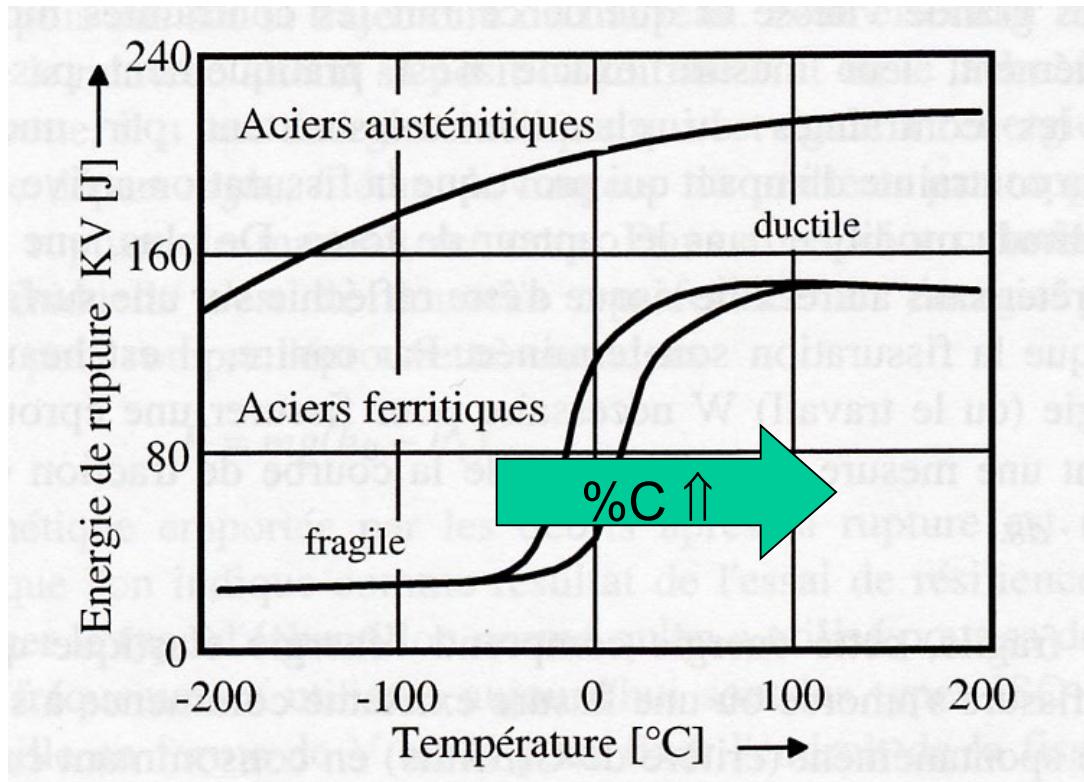
2- La résilience, G (J/m²), permet de comparer la résistance à l'impact des matériaux.

NB: la résilience G et la ténacité K_{1c} varient dans le même sens mais le lien entre les deux est complexe.

Transition fragile-ductile des aciers ferritiques

Les métaux fcc (Al, Cu, Ni) restent ductiles aux basses températures donc tenaces.

Les aciers (cubique centré) voient leur limite élastique augmenter aux basses T et donc leur K_{1c} diminuer. La zone ductile en avant de la fissure diminue et il apparait **une transition de rupture ductile – fragile**:



Aciers austénitiques: aciers contenant bp de Ni et de Cr (l'austénite est fcc) et utilisés en cryogénie (tuyaux pour air ou azote liquide).

La T. de transition fragile-ductile augmente quand C augmente

Liberty Ships

Pb du soudage

SS Schenectady, 1943



The failures could be attributed to:

- the all-welded construction which eliminated crack arresting boundaries (change of microstructure due to welding) which are present in riveted joints
- the presence of **crack-like flaws in welded joints** performed by **inexperienced operators** pressed into service by the exigencies of the program
- the use of materials whose low resistance to crack advance (toughness = résilience) was further **reduced by low temperatures**.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liberty_ship

http://mms2.ensmp.fr/mms_paris/mecarup/illustrations/liberty.php

Exo4. Ténacité d'un acier

On définit le facteur d'intensité de contrainte en avant d'une fissure de longueur l dans un matériau soumis à une contrainte de traction σ (mode 1) par $K_1 = \sigma \sqrt{\pi l}$

- 1- Donnez la définition de la ténacité.
- 2- Quel essai simple préconisez-vous pour différencier rapidement deux lots du même acier provenant de deux fournisseurs différents ?
- 3- Un acier possède une fissure superficielle de 3.2 mm de profondeur et sa ténacité vaut 80 MPa $m^{1/2}$. Calculer la contrainte maximum que pourra supporter cet acier en traction.
- 4- La limite élastique de cet acier est d'environ 500 MPa. La rupture sera-t-elle ductile ou fragile ?
- 5- Quelle est la profondeur minimum des fissures pour que la rupture de cet acier soit fragile i.e. se fasse sans déformation plastique ?

Mercredi 7 Mai 2025

Diagrammes de phases