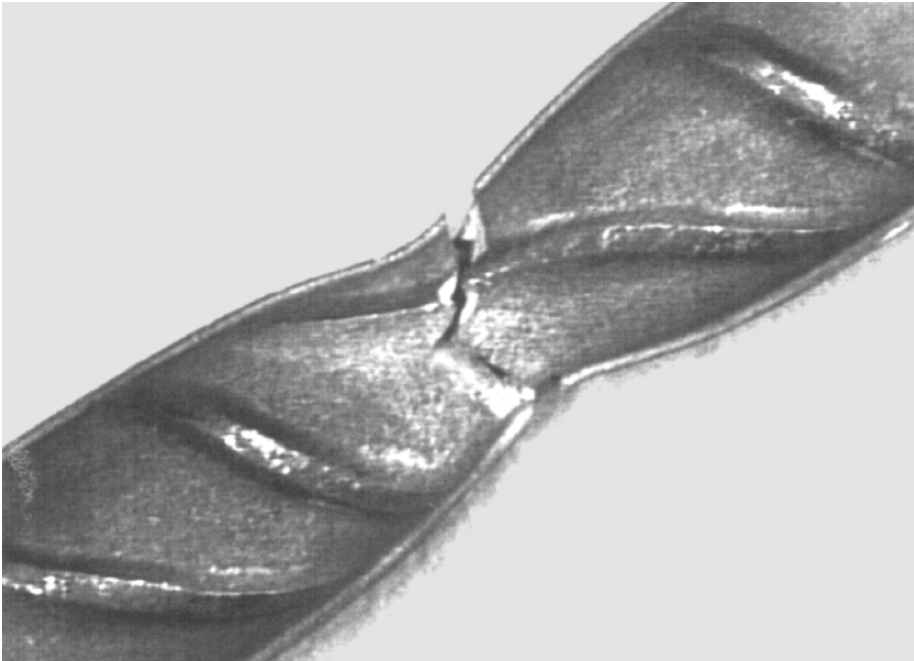


**Lundi 6 Mai 2024**  
**Propriétés mécaniques II**

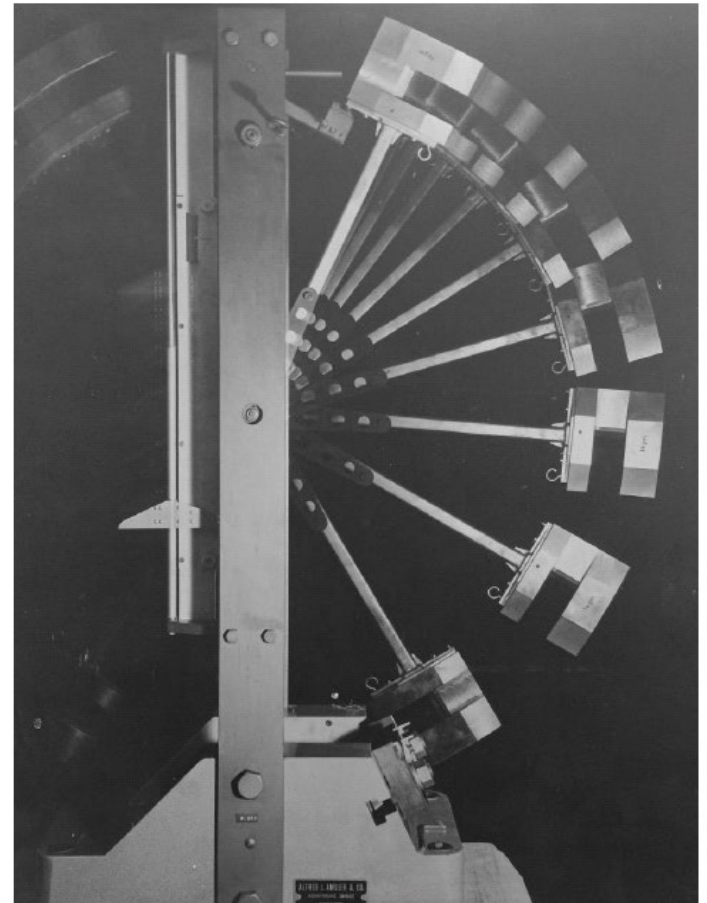
essai de dureté  
ténacité d'un matériau (toughness)  
essai de résilience

## 2 TPs métaux: traction et résilience (C. Dénéreaz LMM)

Essai de traction sur barres d'armature

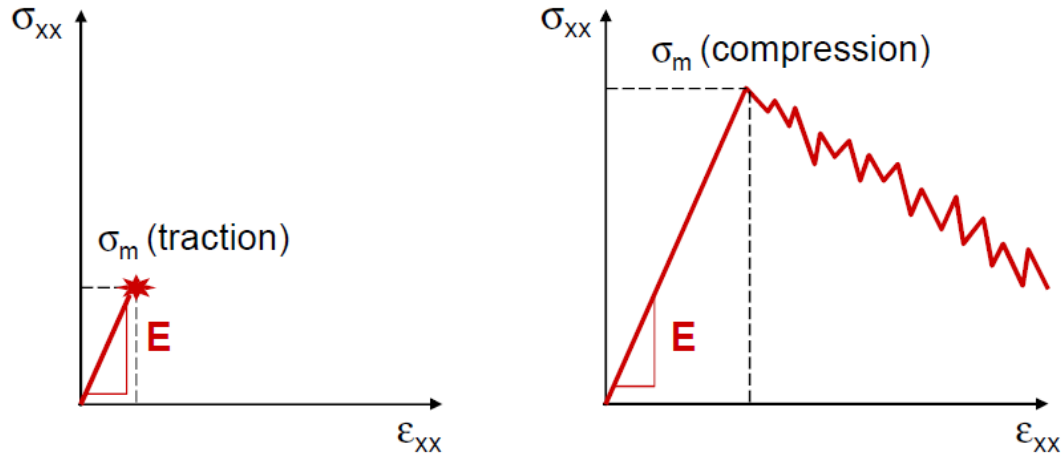


Essai de flexion par choc sur un barreau entaillé  
(résilience)



# Comportements fragiles et ductiles

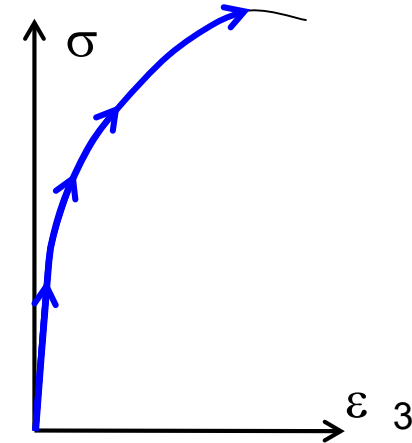
Les céramiques, mais aussi le béton, sont particulièrement **fragiles** en traction: elles rompent par **fracture** avant d'atteindre leur limite élastique. En compression, leur résistance peut être bien plus élevée.



<b>Exemples:</b>	<b>saphir</b> ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )*	$E = 345 \text{ GPa}$
	Compression:	$\sigma_m \cong 2'000 \text{ MPa}$ / Traction: $\sigma_m \cong 400 \text{ MPa}$
	<b>Béton:</b>	$E = 30 \text{ GPa}$ (compression)
	Compression:	$\sigma_m \cong 30 \text{ MPa}$ / Traction: $\sigma_m \cong 3 \text{ MPa}$

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

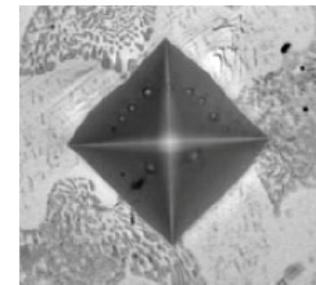
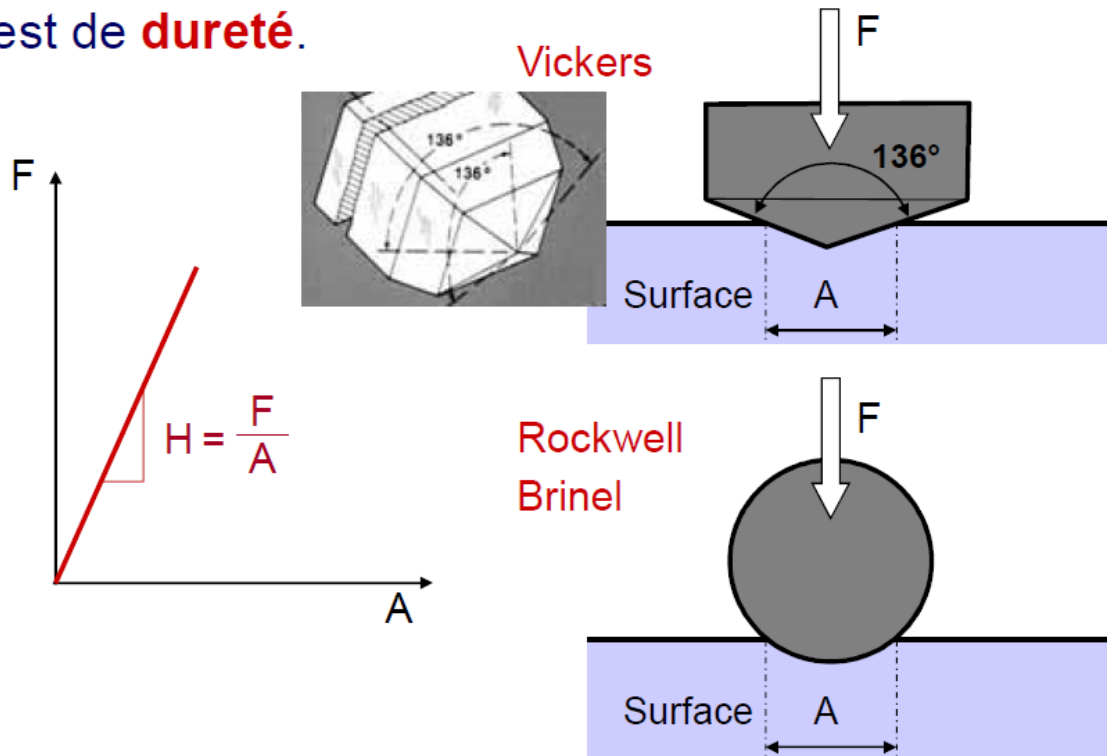
**Exception:** les aciers deviennent fragiles aux basses températures (transition ductile-fragile).



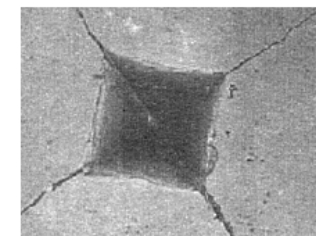
# L'essai de dureté (hardness test)

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**.



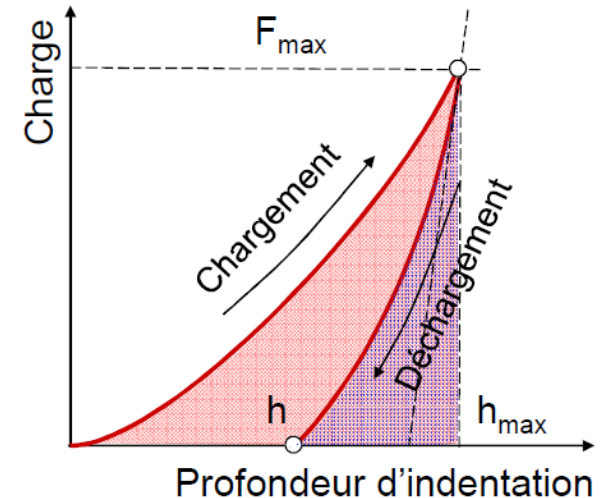
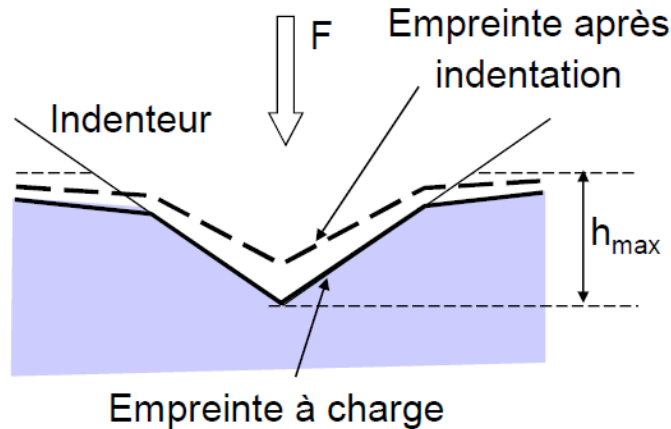
Ni - Cr - Mo - Ti



Matériau fragile

Cours No 7

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

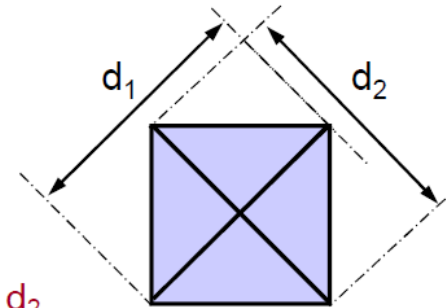


La taille de l'**empreinte** pour une charge  $F$  donnée permet de calculer la dureté.

$$H_V \cong 3 \sigma_Y$$

Vickers

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

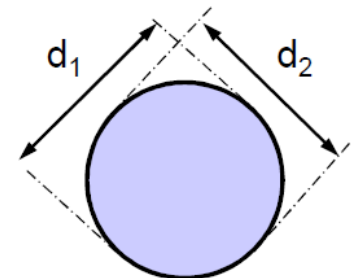


$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

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

Brinell

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

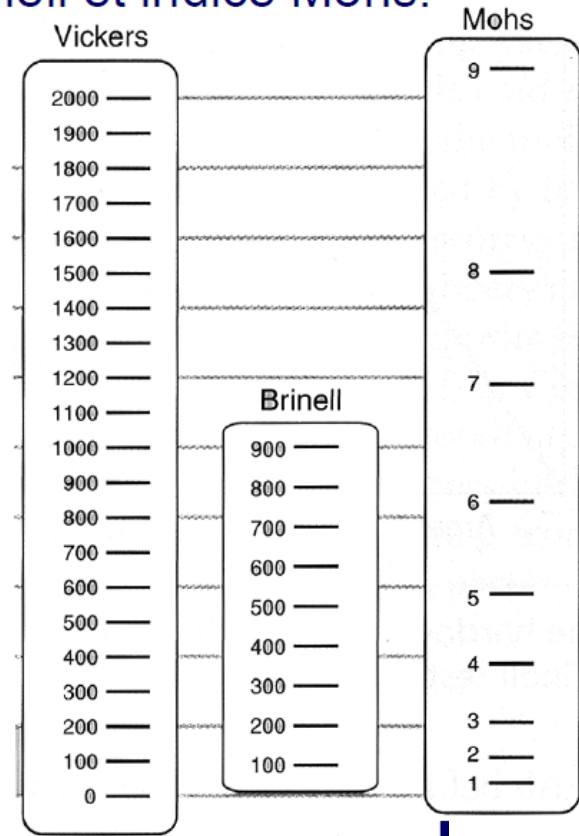


# Différents indenteurs ... différentes duretés ...

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

1	Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
2	Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3	Calcite	$\text{CaCO}_3$
4	Fluorine	$\text{CaF}_2$
5	Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}^-, \text{Cl}^-, \text{F}^-)$
6	Orthose	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
7	Quartz	$\text{SiO}_2$
8	Topaze	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}^-, \text{F}^-)_2$
9	Corindon	$\text{Al}_2\text{O}_3$
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<sup>2</sup>
- Essai **non destructif, rapide, transportable et économique**
- Permet d'estimer rapidement et à moindre cout la limite élastique des aciers :

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



# 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**.

ARTICLE - 1402/2000  
**VALAIS : RUPTURE D'UNE CONDUITE FORCÉE**  
Une vague de boue ravage la montagne  
Le puits blindé plongeant sur la centrale de Bieudron éclate



**Ténacité** = résistance à la propagation de fissure.

Source: ISM  
M. Rappaz





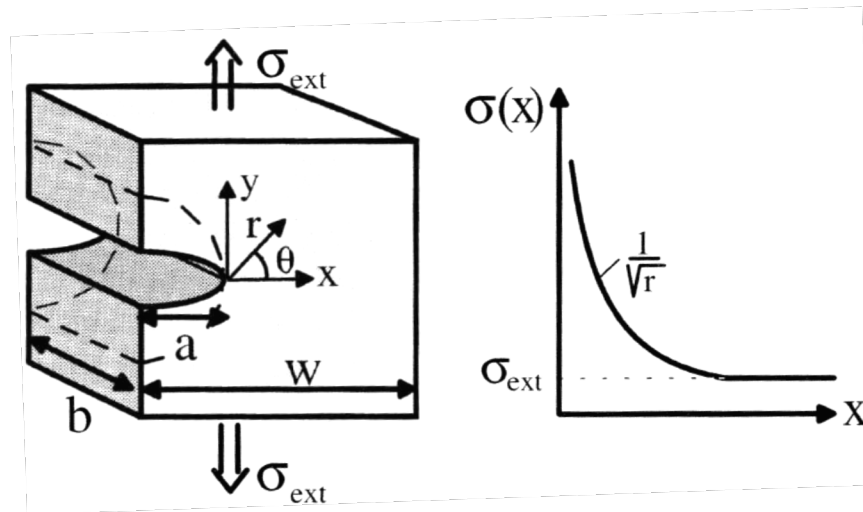
# La ténacité

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).

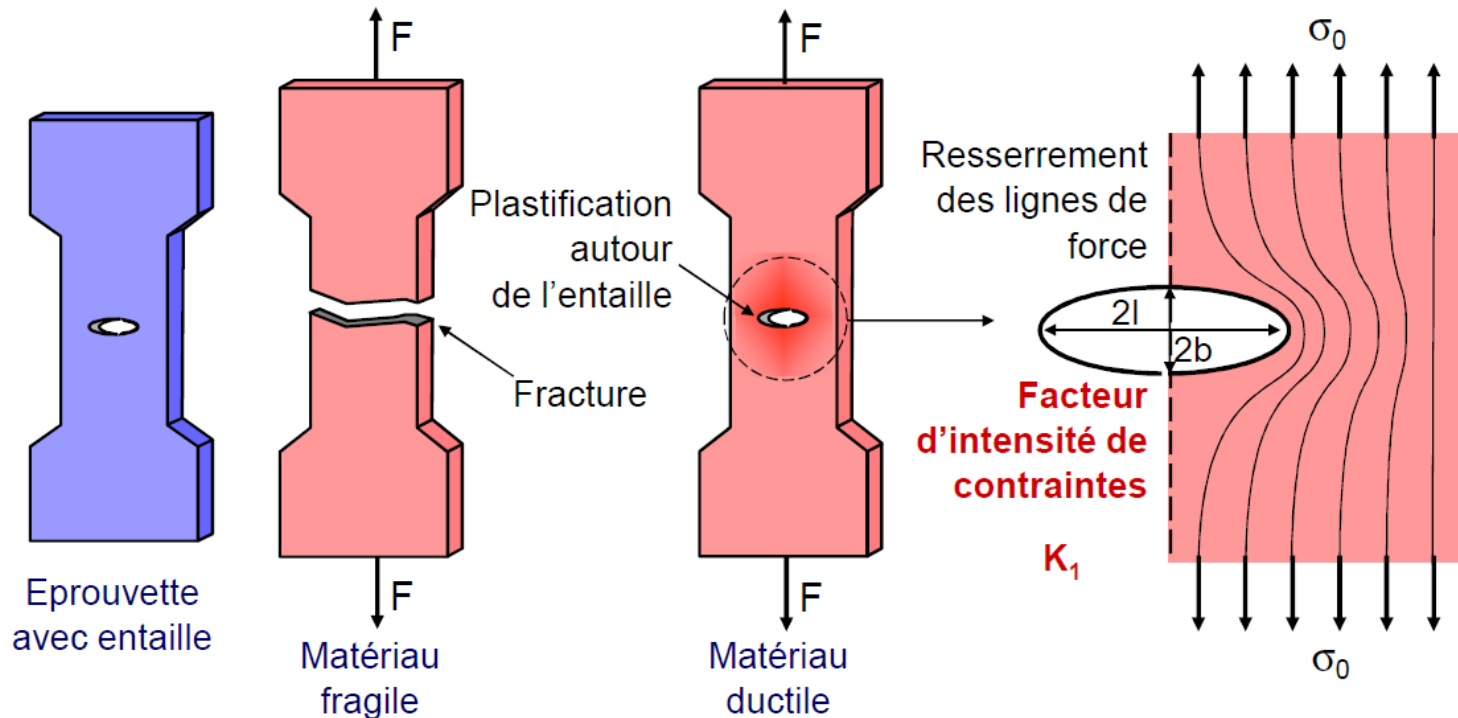
La rupture correspond à la propagation quasi-instantanée de la fissure avec ou sans déformation plastique (rupture fragile ou ductile).



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.



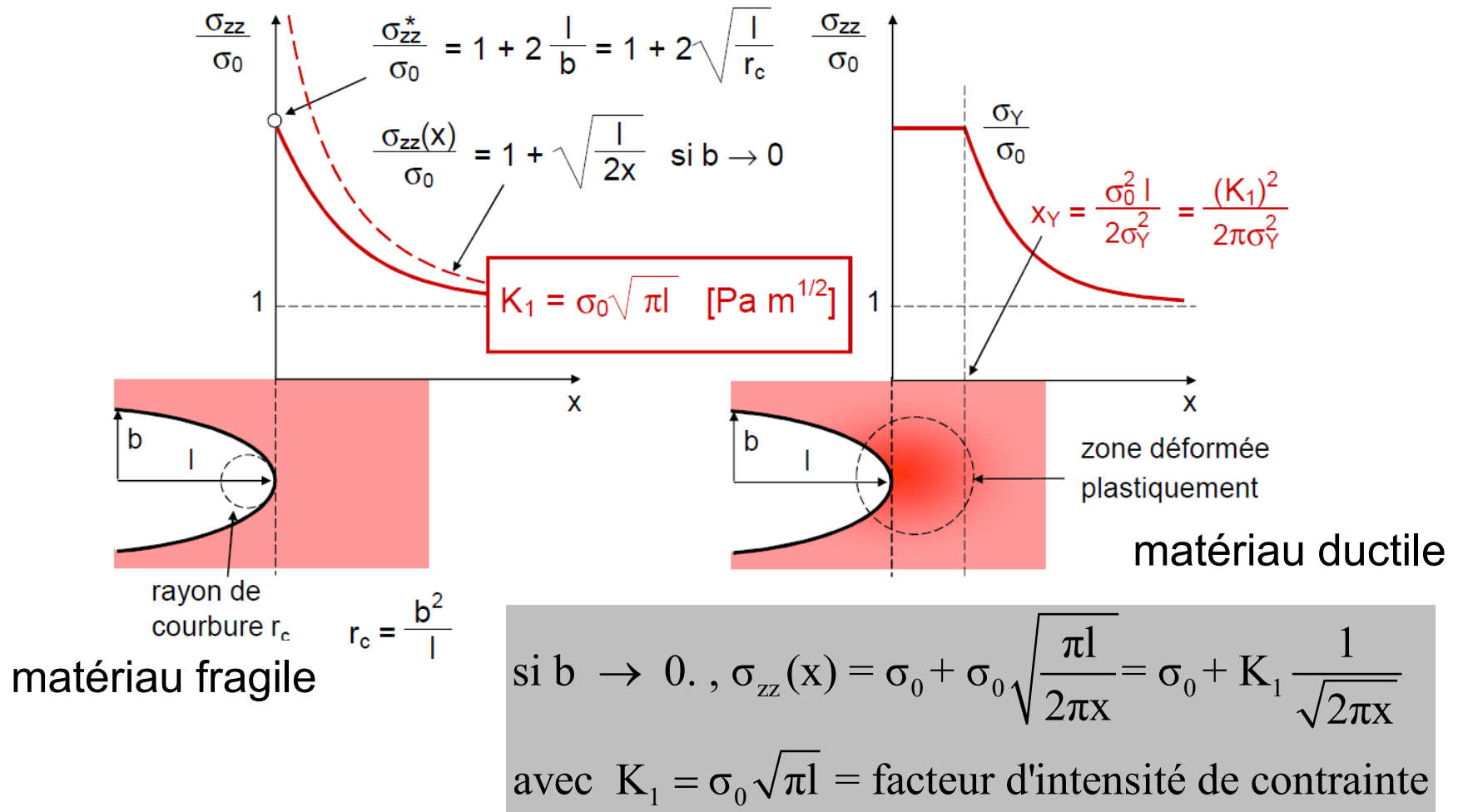
Propagation instantanée de la fissure



Propagation de la fissure ralentie 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 $\sigma_0$

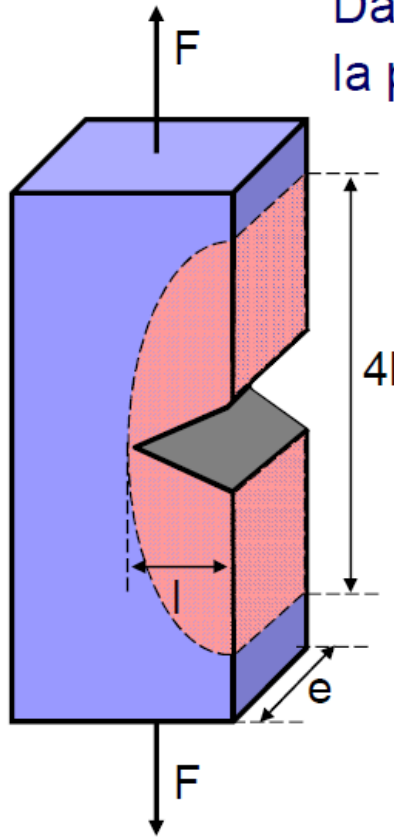
Le facteur d'intensité de contraintes  $K_1$  caractérise les fissures les plus nocives.



**$K_1$**  caractérise le chargement dans un matériau (contrainte  $\sigma_0$ ) 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  $\gamma$

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

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

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

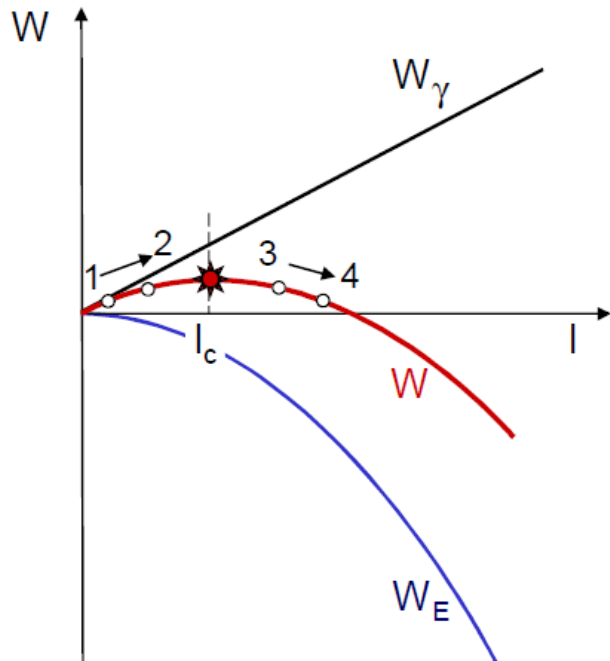
$\gamma$  = énergie d'interface en J/m<sup>2</sup>

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  $\delta l$  de celle-ci.

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



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

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

**Si  $l < l_c$**  (chemin 1  $\rightarrow$  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  $\rightarrow$  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**  $\sigma_c$  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<sup>0.5</sup>]** 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.

$$K_{1C} = \sqrt{G_C E}$$

$$\text{avec } G_C = 2\gamma + G_C^{pl} > 2\gamma$$

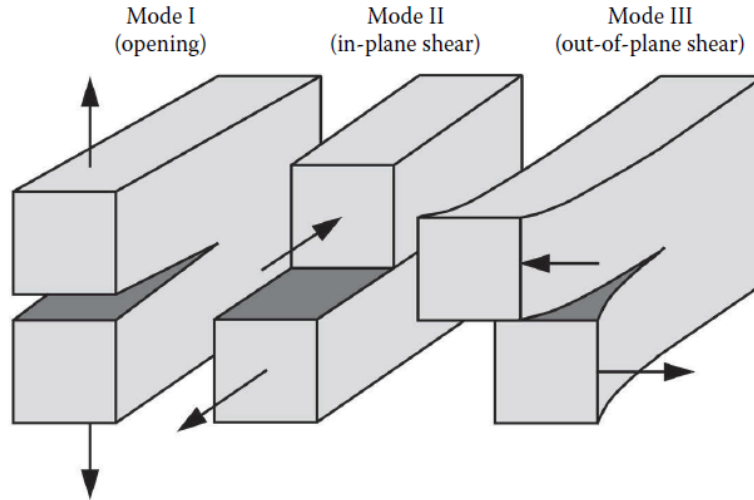
Energie de surface

Energie de déformation  
plastique

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



# 3 modes de rupture



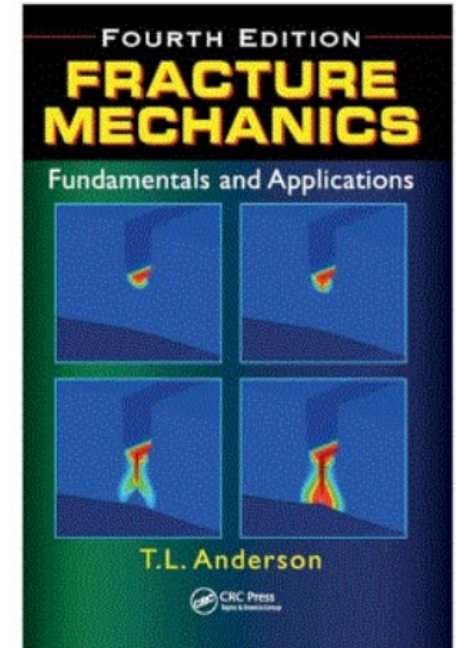
**FIGURE 2.14**  
The three modes of loading that can be applied to a crack.

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

Note:  $\nu$  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.

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

ténacité en  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

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

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

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

(cas  $b \rightarrow 0$ .)

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

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

donc  $\sigma < K_{1C} / \sqrt{\pi l_{\text{max}}}$  avec  $l_{\text{max}} = \text{Max}(l)$  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:  $mg < f \text{ SR}_{0.2}$

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

S'ils sont en plus ductiles,  $2\gamma$  devient négligeable devant  $G_C^{\text{pl}}$ .

# 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:

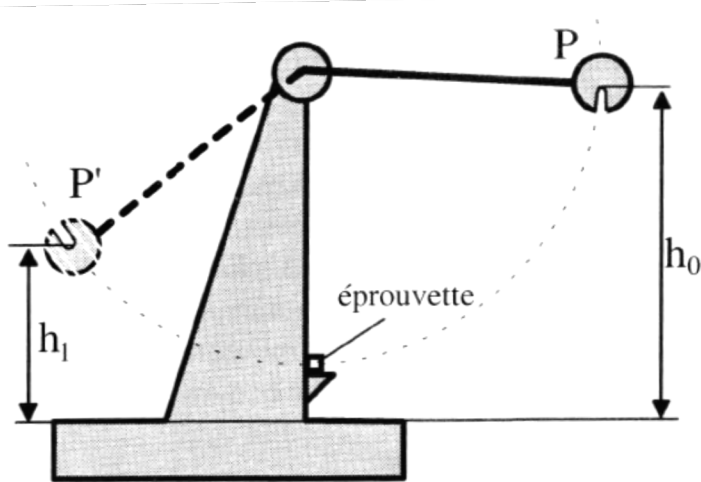


Fig. 7.5 Le mouton de Charpy.

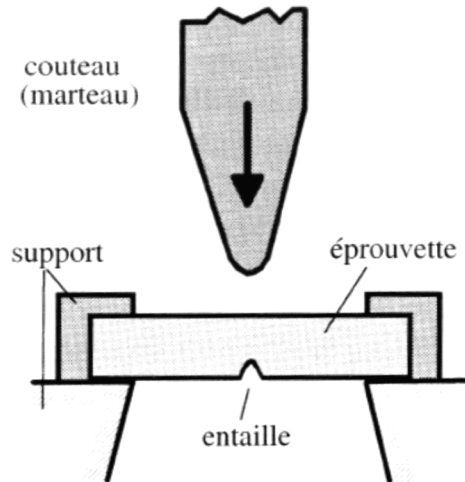


Fig. 7.6 Appui de l'éprouvette vue d'en haut (depuis l'axe du pendule)

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

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

avec S = surface de rupture

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

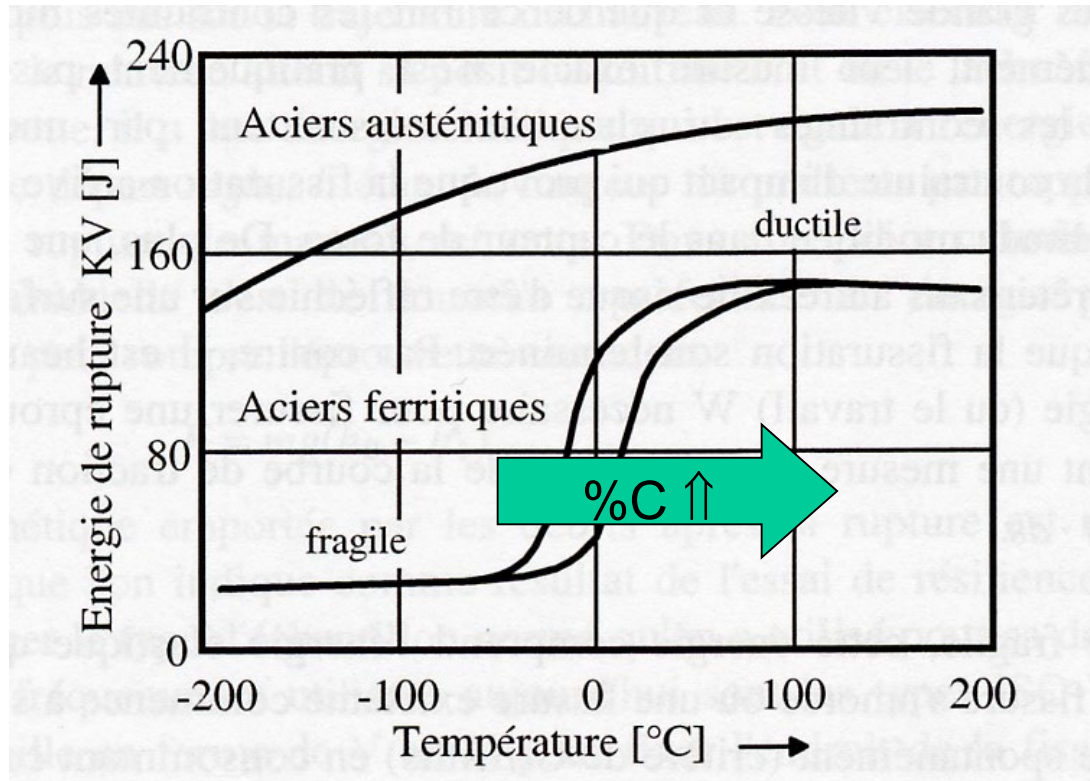
2- La résilience, G (J/m<sup>2</sup>), permet de comparer la résistance à l'impact des matériaux.

NB: la résilience G et la ténacité K<sub>1c</sub> 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  $K_{Ic}$  diminuer. La zone ductile en avant de la fissure diminue et il apparaît **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](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liberty_ship)

[http://mms2.ensmp.fr/mms\\_paris/mecarup/illustrations/liberty.php](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  $\sigma$  (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  $80 \text{ MPa m}^{1/2}$ . 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