

• Résistance à la rupture (Ténacité)

1. Définition

La ténacité est la résistance à la propagation rapide de fissures.

2. Caractéristiques

La faible résistance à la rupture est une des caractéristiques des céramiques. Elle est généralement déterminée expérimentalement à l'aide d'un essai de **traction lente** (ou flexion 3 points) sur une éprouvette spécifique pourvue d'une entaille mécanique et préalablement **pré-fissurée en fatigue** (longueur a_0). Toute fissure **dépassant la longueur critique** est instable et entraîne la **rupture** immédiate.

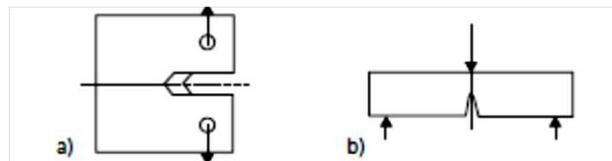
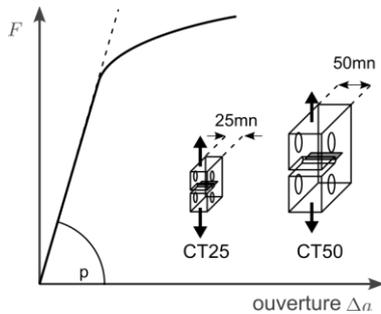
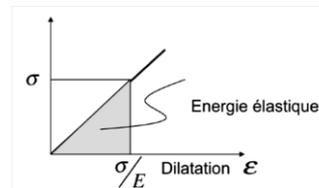


Figure 6.29 Schémas des éprouvettes de traction compacte a) et de flexion 3-points b) utilisées pour la détermination de K_{Ic} .

a) Energie de déformation élastique

L'énergie nécessaire pour déformer le matériau dans le domaine élastique, est obtenue par l'intégrale :

$$dw_{elast} = \sigma \cdot d\varepsilon \text{ donc } W = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{\sigma^2}{2E} \text{ [Joule]}$$



b) Contrainte à la rupture / théorie de Griffith

La résistance à la rupture doit se calculer à partir d'énergie nécessaire à élargir (propageant) la fissure. Cela est exprimé en fonction de la longueur critique de fissure (c_{crit}), par la théorie avancée de **Griffith**.

$$\sigma_{rupture} = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi c_{crit}} \right)^{1/2}$$

$\sigma_{rupture}$: Contrainte à la rupture.

γ_s : Energie de surface spécifique (densité d'énergie) (N/m) (J/m²).

c_{crit} : Longueur de la fissure.

c) Facteur d'intensité de contrainte critique (Ténacité)

Certaines céramiques ne sont pas "totalement fragiles". Elles possèdent des mécanismes qui empêchent la propagation de la fissure, en absorbant une partie de l'énergie. On exprime la contrainte critique en fonction de l'ensemble des énergies s'opposant à la propagation (G_c), comme suit :

$$\sigma_{critique} = \alpha \sqrt{\frac{G_c E}{\pi c}}$$

On peut écrire :

$$\sigma_{critique} \cdot \sqrt{\pi c} = \sqrt{G_c E} = K_{Ic} \text{ [MPa} \cdot \text{m}^{1/2}\text{]}$$

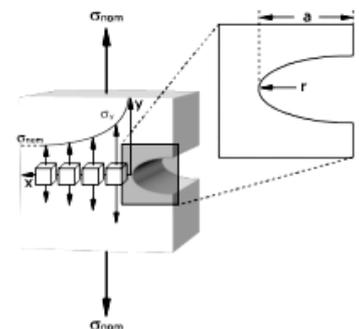
α : Facteur géométrique qui dépend de la forme de la fissure ($\alpha \approx 1$)

G_c : Somme des énergies s'opposant à la propagation

K_{Ic} : Facteur d'intensité de contrainte critique ou Ténacité.

d) Concentration locale de contraintes σ_y

Une concentration locale de contrainte se produit à la racine d'une fissure, appelé une contrainte locale, elle est exprimé en fonction de la contrainte appliquée et de la géométrie de la fissure. On obtient :



$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

a : Profondeur de la fissure.

r : Rayon de courbure à la racine de la fissure.

σ_{nom} : Contrainte nominale extérieure appliquée (traction/compression ; flexion).

e) Facteur de concentration de contrainte

Représente le degré auquel une contrainte externe s'amplifie à l'extrémité d'une fissure. Il est exprimé en fonction des paramètres géométriques a et r.

$$K_t = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}} \right) = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

σ_{max} : Contrainte maximale (correspond à la contrainte théorique de rupture qui dépend des propriétés intrinsèques du matériau a savoir : module de Young, énergie de surface et distance d'équilibre a_0 entre les atomes ou les molécules).

$$R_{th} = 2\sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a_0}}$$

3. Bilan

- ❖ La raison de l'existence des fissures, d'où de la fragilité des céramiques, est due à l'absence de déformation plastique.
- ❖ Une croissance de la fissure diminue l'énergie élastique dans la zone de relaxation de contrainte, et agrandie l'énergie de surface dans la fissure.
- ❖ Il est à noter qu'une céramique résiste mieux en contraintes compressives (les fissures se ferment!). Il faut donc éviter les contraintes en traction excessive, et concevoir des structures mécaniques qui mettent les céramiques plutôt en compression.
- ❖ Le fait que les céramiques contiennent toujours des fissures et des porosités diminue largement leur ténacité :

$$K_{Ic} \text{ céramique} \sim \frac{1}{50} K_{Ic} \text{ métaux}$$

- ❖ La résistance mécanique en traction dépend de la ténacité et de la longueur des plus grandes fissures, suivant la relation :

$$R_{mc} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_m}}$$

$2a_m$ = longueur de la plus grande fissure (en détermine a_m à partir de cette longueur).

$K_{Ic} \sim 0,2-2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; $a_m \sim 10-60 \text{ }\mu\text{m}$ et $R_{mc} \sim 10-300 \text{ MPa}$.

Tableau II.2 : Ténacité de quelques groupes de céramiques

$K_{Ic} \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Type de matériaux
<1	monocristaux, verres, certains vitrocérams à haute teneur en verre
1 - 2,5	vitrocérams, porcelaines, certains oxydes (ex. MgO)
2.5 - 5	alumine, carbures et nitrures, céramiques poreuses
5 - 15	Zircone polycrystalline tetragonale (ZrO ₂ dopé par Y (YSZ)).
>15	Quelques composites céramiques/céramiques

Notez la bonne ténacité des zircons dopés.

Il existe deux manières pour améliorer la résistance mécanique des céramiques :

1. Diminuer la longueur de la plus grande fissure par un contrôle de la granulométrie des poudres et des méthodes de mise en œuvre.
2. Augmenter K_{Ic} à l'aide de composites ou d'alliage, comme en incorporant de la paille hachée dans les briques ou de la fibre de verre dans le ciment.

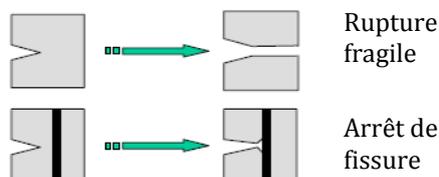


Figure. Augmentation de ténacité pour un composite à matrice céramique.

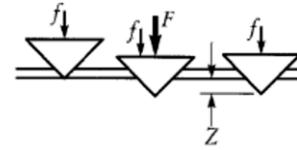
• Dureté

▪ Définition

Résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge.

▪ Mode d'évaluation

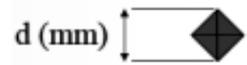
La dureté est mesurée par la différence de profondeur de pénétration



▪ Différentes types de dureté

A. **Dureté Vickers** (H_v) Trace laissée par une empreinte pyramidale de 136° en diamant sous l'effet d'un poids P (kg).

$$H_v = \frac{1,854 P}{d^2} \text{ (Kgf/mm}^2\text{)} \quad H_v = \frac{0,1891 P}{d^2} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

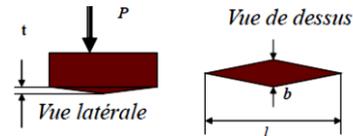


B. **Dureté Knoop** (H_k) L'essai Knoop s'effectue avec une empreinte pyramidale de forme losange en diamant sous P faible de 25 g à 5kg.

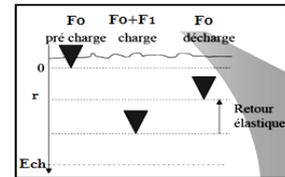
Pour des tests de dureté superficielle (traitement de surface ...)

$$H_k = \frac{14,2 P}{l^2}$$

avec $l/b = 7.1$
 $b/t = 4$



A. **Dureté Rockwell** (H_R) L'obtention de la valeur se fait par la mesure de la différence de profondeur de pénétration, en appliquant deux types de charge.



Plusieurs échelles (A, B, C...) possibles en fonction de l'indenteur et de la charge.

1. **Echelle : B,E,F (matériaux plus mous)**

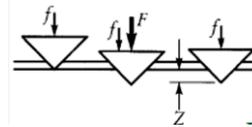
$$H_R = 130 - r$$

2. **Echelle : C (matériaux plus durs)** : Les pénétrateurs sont constitués d'un cône de diamant d'angle au sommet de 120° .

$$H_R = 100 - r$$



Précharge f
de 10 kgf;
 $F = 150$ kgf



B. **Dureté Brinell** (H_B) Trace laissée par une bille d'acier trempé sous l'effet d'un poids P .

$$H_B = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec
 P (N) et D, d (mm)



$H_B(10-3000)$: $D = 10$ mm, $P = 3000$ kg (30 000N)
 $H_B(5-750)$: $D = 5$ mm, $P = 750$ kg (75 00N)

Tableau. Dureté à la pénétration de certains matériaux

Matériaux	Vitrocérames 9606	Alumine frittée	Alumine H pureté	Verre	Acier
Dureté	Knoop (500 g)	Knoop (500 g)	Vickers H_v	Brinell	Knoop
Valeur	619	1530	23000	550	180-300

▪ Bilan

- ❖ On peut mesurer avec un seul pénétrateur Vickers tous les matériaux et tous les échantillons, de tendres à durs et Un bon état de surface de l'échantillon est requis.
- ❖ La méthode rockwell est une méthode rapide qui ne nécessite aucune préparation de l'échantillon.
- ❖ La méthode Knoop est d'une meilleure précision et convient particulièrement aux matériaux très durs et cassants (verre, céramique), sur lesquels la méthode Vickers pourrait entraîner des fissures autour de l'empreinte.
- ❖ Brinell permet de tester des matériaux non homogènes (pièces moulées en fonte par exemple), car la bille de grande dimension entre en contact avec de nombreux cristaux (différents constituants de la structure du matériau) et forme une valeur moyenne mécanique.
- ❖ Les céramiques sont des matériaux très durs, mais aussi très fragiles. $H_{céra} > H_{A.métalliques} > H_{métaux} \gg H_{poly}$
- ❖ Les céramiques présentent la plus grande dureté de tous les matériaux. Elles sont utilisées comme abrasifs pour couper, meuler ou polir tous les matériaux, y compris le verre.

Dans la conception des pièces céramiques il n'est jamais nécessaire d'envisager la défaillance par plastification de la pièce car la rupture brutale dans la zone linéaire d'un essai de traction intervient toujours (Mat. fragiles).