

IV.2. Propriétés mécaniques

IV.2.1. Module d'élasticité

Le comportement rhéologique des céramiques à température ambiante est de type linéaire élastique. Elles présentent un **module d'élasticité** très élevé et des déformations élastiques extrêmement restreintes. On peut supposer, avec une très bonne approximation, que leur comportement est élastique jusqu'à la rupture. Comme les masses volumiques des céramiques sont faibles, leurs modules spécifiques E / E' (raideurs spécifiques) très élevés les rendent très attractives. On constate ceci dans le tableau suivant :

Matériaux	E / E'(en GPa)
Fibre de carbone	2,42
Aluminium	23,05
Fer	26,68
Alumine	86,85
Carbure de silicium	132,26

IV.2.2. Dureté

Les mesures de **dureté** se font par lecture directe de la diagonale d'une empreinte laissée par une charge. Les céramiques sont des matériaux très durs, mais aussi très fragiles.

Matériaux	charges d'essai (en g)	duretés Knopp
Vitrocérames 9606	500	619
Verre	500	477
Alumine frittée	500	1530
Acier	500	180

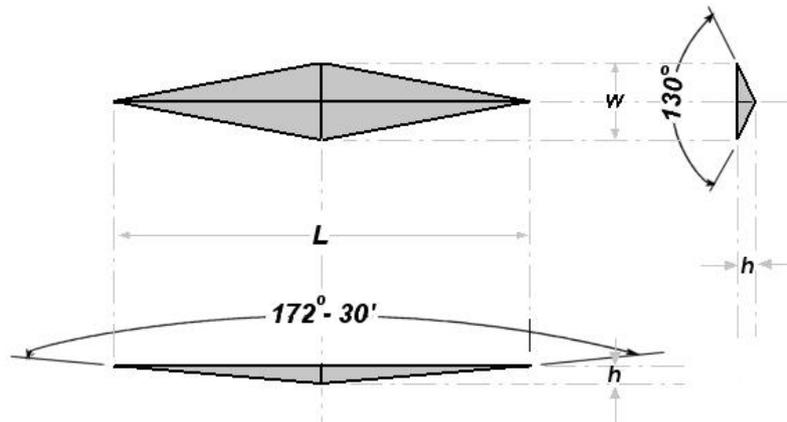


Figure VI: Image représentatif Indentation Knoop

IV.2.3. Tenacité

La tenacité est la résistance à la propagation rapide de fissures. Pour mesurer la tenacité, il faut introduire une fissure dans une éprouvette et mesurer la résistance à sa propagation. La tenacité K_{Ic} (ou facteur d'intensité de contrainte critique) est liée à la contrainte à la rupture, par la relation :

$$K_{Ic} = S_r Y \sqrt{a_c}$$

Cette relation signifie que sous une contrainte S_r , il y a propagation brutale et instable d'une fissure à partir d'un défaut critique de taille $2 a_c$. Y est une constante de calibration fonction des dimensions de l'éprouvette.

Une autre manifestation de la fragilité des céramiques est leur faible **tenacité**, c'est-à-dire leur extrême sensibilité à la propagation de petits défauts quand le matériau est soumis à une contrainte.

La tenacité des céramiques traditionnelles n'est que d'environ $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ alors que pour la plupart des métaux, elle est supérieure à $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Pour certaines zircons, elle peut atteindre $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Les céramiques ne sont pas **ductiles**, elles se cassent brutalement sans plastification. Leur comportement est donc très fragile. Pour les céramiques à grains fins, la taille des

grains intervient peu sur la charge à la rupture car la rupture s'amorce plutôt sur des défauts de grande dimension par rapport aux grains. En revanche, pour les céramiques à gros grains, la rupture est souvent la conséquence d'un phénomène de coalescence de microfissures secondaires dépendant fortement de la taille des grains.

IV.3. Propriétés thermomécaniques

La variation des propriétés mécaniques avec la température est le principal obstacle limitant l'utilisation des céramiques. Dans le cas de **chocs thermiques**, des contraintes sont générées au sein de la céramique. A température élevée, c'est à dire supérieure à la moitié de la température absolue de fusion, les céramiques peuvent présenter des endommagements de type viscoélastique (**fluage**).

Les paramètres de résistance mécanique varient en fonction de la température.

Une élévation de la température diminue la *rigidité des liaisons atomiques* à cause de la dilatation thermique.

Au-delà de 800 à 1000°C, les propriétés mécaniques sont liées à la *tenue des phases intergranulaires vitreuses* ou mal cristallisées dans les polycristaux. En effet, les compositions de ces phases secondaires correspondent à des eutectiques à basse température de fusion dont le comportement élastique à température ambiante est rapidement remplacé par un comportement de type visqueux à haute température.

Les céramiques présentant une phase vitreuse ségréguée aux joints des grains voient leur contrainte à la rupture et leur **ténacité** décroître rapidement à partir de 800°C, effet renforcé par l'augmentation de la taille des défauts et la taille des grains.

Au contraire, les céramiques sans phase vitreuse voient leurs caractéristiques mécaniques se maintenir jusqu'à 1200 voire 1400°C. La chute des propriétés mécaniques est alors liée à la constitution d'une phase amorphe par oxydation des impuretés métalliques contenues dans les joints de grains.

Quand la céramique est chauffée, elle est en compression, alors que quand elle est refroidie, elle est en traction. Les matériaux étant beaucoup moins résistants aux efforts de traction qu'aux efforts de compression, les ruptures ont lieu pendant le refroidissement. Les contraintes dans le matériau sont liées au **coefficient de dilatation**, au **module d'élasticité** et à la diffusivité thermique.

IV.4. Améliorations des propriétés mécaniques des matériaux

Il existe des possibilités pour améliorer les propriétés des matériaux. On essaie, par exemple, d'augmenter la **résistance mécanique** ainsi que la résistance au **choc thermique**. On peut déjà remarquer que puisque la densité du matériau conditionne de façon opposée la résistance mécanique et la résistance au choc thermique, il n'est pas possible d'obtenir un matériau ayant de bonnes caractéristiques pour les deux causes de rupture.

Les défauts responsables de la fragilité des matériaux céramiques sont les défauts macroscopiques comme la porosité et les défauts de surface, et microscopiques comme les dislocations, les lacunes, les atomes interstitiels et leurs interactions. La porosité réduit la **résistance mécanique**. Les pores étant des concentrateurs de tension, les meilleurs matériaux, du point de vue mécanique, sont ceux qui sont complètement denses. Le contraire a lieu pour la résistance au **choc thermique**.

IV.5. Mécanismes de rupture des céramiques :

Les céramiques sont principalement caractérisées par deux **mécanismes de rupture** : le **clivage** et le **fluage**.

Dans les deux cas, la rupture affecte soit les grains (*rupture transgranulaire*), soit les joints de grains (**rupture intergranulaire**). Le fluage est l'allongement irréversible, au cours du temps, d'un matériau soumis à un effort constant. Le clivage est la création de fissures et leur propagation jusqu'à rupture.

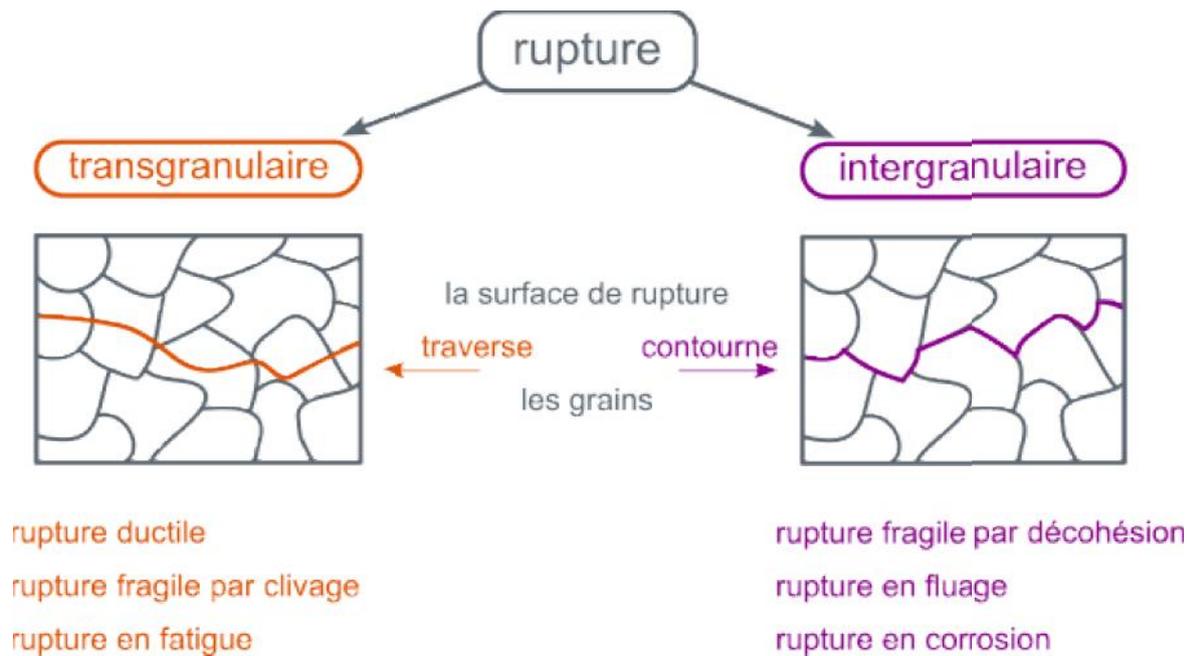


Figure VI : Classement des ruptures selon leur observation

Le domaine de la rupture par **fluage** n'intervient qu'à haute température (typiquement $T > 1300^{\circ}\text{C}$). Il peut soit être diffusionnel (la rupture intervient par fissuration intergranulaire), soit entraîner une ductilité notable aux plus hautes températures (supérieures à $0,9T_f$) et des contraintes importantes (la rupture est de type transgranulaire).

Les **céramiques thermomécaniques** connaissent actuellement un essor important, de par leur potentiel d'utilisation à des températures supérieures à celles des métaux courants, de leurs alliages et des superalliages. Cet engouement pour les céramiques thermomécaniques est lié à la crise du pétrole des années 70. Par exemple, pour améliorer le rendement des turbines, il a fallu augmenter les températures pour une meilleure combustion. Les matériaux utilisés n'étaient pas assez résistants aux hautes températures. On a donc déposé un revêtement en céramique de fonctionnement.