

## Chapitre II : Propriétés physiques et mécaniques des Céramiques

### 2- Propriétés des céramiques

#### 2.1. Généralités

Les propriétés mécaniques d'un matériau céramique doivent être minutieusement étudiées avant d'être prises en compte pour toute application générant certaines contraintes.

Les propriétés mécaniques telles que la dureté, la résistance mécanique, le module d'élasticité et la ténacité sont des propriétés essentielles du rendement d'un matériau céramique. Le comportement en fatigue est important lorsque des contraintes cycliques sont présentes.

#### 2.2. Propriétés mécaniques

##### 2.2.1. La porosité

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, on distingue ainsi la porosité de pores (ou « porosité primaire ») et la porosité de fissures (ou « porosité secondaire ») ;

La formule pour le calcul de la porosité est la suivante :

$$P = (d_{\text{thé}} - d) / d$$

P : est la porosité,      d : Densité calculée (g/cm<sup>3</sup>).      d<sub>thé</sub> : Densité théorique (g/cm<sup>3</sup>).

La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux.

$$P = V_{\text{pores}} / V_{\text{totale}}$$

V<sub>pores</sub> : le volume des pores,

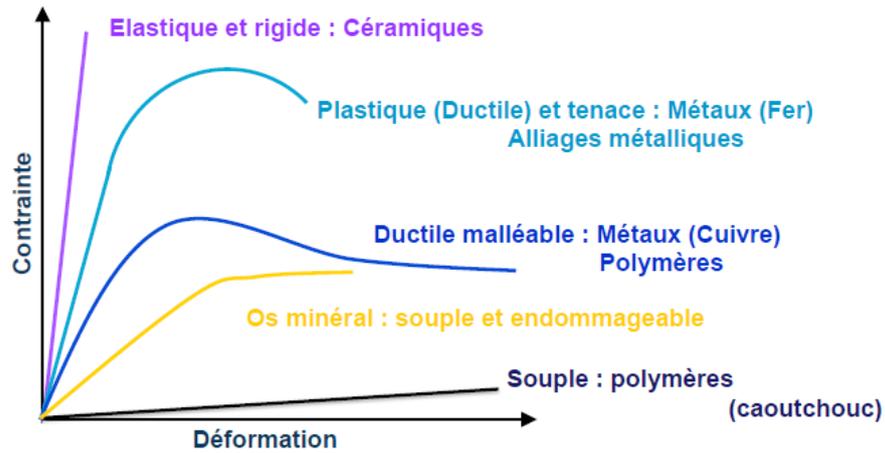
V<sub>totale</sub> : le volume total du matériau, c'est-à-dire la somme du volume de solide et du volume des pores.

##### 2.2.2. Module d'élasticité

Les céramiques présentent, comme les métaux, un module d'Young bien défini, c'est-à-dire que le module reste constant pendant l'application d'une charge :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\sigma : \text{contrainte}, E : \text{module de Young}, \epsilon : \text{déformation}). \quad (\text{Figure 2.1}).$$

Ecéramiques > Emétaux > Epolymères



**Figure 2.1.** Propriétés mécaniques des matériaux

En outre, les céramiques sont constituées d'atomes légers (C, O, Si, Al) et présente une structure cristalline souvent non compacte :  $\rho_{\text{métaux}} > \rho_{\text{céramiques}} > \rho_{\text{polymères}}$

Le module spécifique des céramiques est donc très favorable :  $(E/\rho)_{\text{céramiques}} \gg (E/\rho)_{\text{métaux}}$

Cette propriété fait que les céramiques constituent un matériau de choix comme charge renforçante dans les composites. Le module de Young dépend fortement de la composition de la phase et de la porosité du matériau.

Matériau	E [Gpa]	$\rho$ [SD]	E/ $\rho$ [Gpa]
Aciers	210	1.8	27
Alliages Aluminium	70	2.7	26
Alumine	390	3.9	100
Silice	69	2.6	27
Ciment	45	2.4	19

Lorsque la température augmente, la dureté diminue généralement en raison d'une légère diminution du module d'élasticité et de la croissance du grain. La porosité réduit considérablement la dureté, ainsi que le module d'élasticité par la formule suivante:

$$E = E_0 (1 - 1.9P + 0.9P^2).$$

Dans laquelle :

$E_0$  est le module d'élasticité de la céramique entièrement dense

P est la fraction volumique de pores,

1.9 et 0.9 sont des paramètres liés à la forme des pores et à leur distribution en taille.

Pour les céramiques comme pour tous les matériaux, il existe une relation décroissante entre la porosité et la résistance mécanique, de la forme suivante :

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-nP)$$

Avec n : nombre entier allant de 4 à 7.

P : fraction du volume total, constituée par des pores.

$\sigma_0$  : Résistance mécanique du matériau à porosité nulle

Une porosité de 10% en volume entraîne une diminution de la résistance en flexion de 50% par rapport à la valeur mesurée pour le même matériau non poreux.

### 2.3. Dureté

La dureté d'un matériau est une propriété mécanique qu'il est parfois important de prendre en considération. Elle exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique. 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.

Hcéramiques > Halliages métalliques > Hmétaux purs >> Hpolymères

Céramiques	H/E	Alliages	H/E	Métaux purs	H/E
Diamant	1.5 10 <sup>-1</sup>	Laiton	9 10 <sup>-3</sup>	Cu	1.2 10 <sup>-3</sup>
Alumine	4 10 <sup>-2</sup>	Dural ( <sup>1</sup> )	1.5 10 <sup>-2</sup>	Al	1.5 10 <sup>-3</sup>
Zircone	6 10 <sup>-2</sup>	Acier Inox	6 10 <sup>-3</sup>	Ni	9 10 <sup>-4</sup>
SiC	6 10 <sup>-2</sup>	Acier C	1.5 10 <sup>-2</sup>	Fe	9 10 <sup>-4</sup>
Moyenne	8 10 <sup>-2</sup>	Moyenne	1. 10 <sup>-2</sup>	Moyenne	1.5 10 <sup>-3</sup>

### 2.4. Résistance à la rupture des céramiques (Ténacité)

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure ; cela s'oppose à la fragilité. On peut définir la ténacité comme étant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de rompre. Les matériaux pouvant se déformer plastiquement ont donc une plus grande ténacité que les matériaux à déformation uniquement élastique comme le verre.

La ténacité  $K_{IC}$  qui est définie selon l'expression suivante :

$$K_{IC} = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{(\pi \cdot a)} \quad \text{Où,}$$

Y : un facteur (sans dimension) géométrique dépendant de la forme de la fissure (mais pas de sa taille).

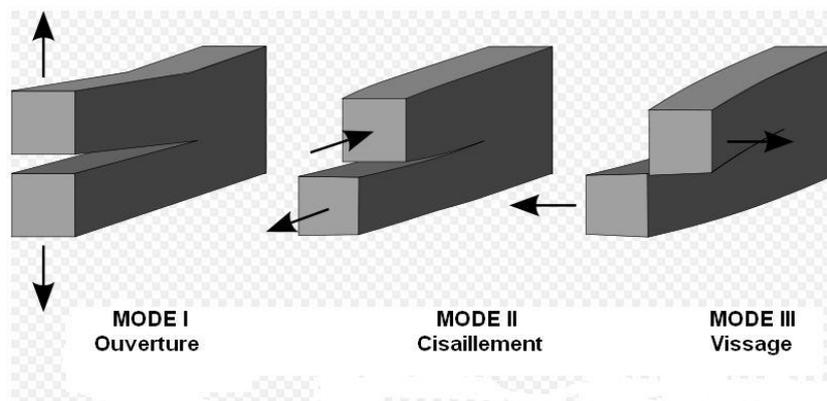
$\sigma$  : représente la contrainte appliquée.

a : correspond à la longueur d'une fissure interne.

Le fait que les céramiques contiennent toujours des fissures et des porosités diminue largement leur ténacité; elle atteint seulement 2% de celle des métaux.  $K_{IC}$  céramique = 1 / 50  $K_{IC}$  métaux. La ténacité 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 zircones, 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 Il existe alors deux manières d'améliorer la résistance mécanique des céramiques :

- diminuer la longueur de la plus grande fissure par un contrôle de la granulométrie des poudres et des méthodes de mise en œuvre.
- augmenter la ténacité 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 2.2.** Illustration des trois modes de sollicitation d'une fissure

### 2.5. La densité (d)

Les propriétés physiques d'une céramique sont liées à sa densité. Cette dernière dépend fortement de la température de frittage, plus le matériau est dense plus ces propriétés sont meilleures. La densité est calculée par la relation :  $\rho = m/V$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

Où: m : Masse de l'échantillon (g), V : volume de l'échantillon ( $\text{cm}^3$ ).

Pour les matériaux céramiques polyphasés dense, la densité  $\rho$  se calcule simplement par une combinaison linéaire des densités  $\rho_i$  des différentes phases pondérées par leurs fractions volumiques  $V_i$  :

$$\rho = \sum_i \rho_i V_i$$

## 2.6. Propriétés thermiques

Les céramiques sont connues pour leur bon comportement aux températures élevées. Pour commenter leur comportement thermique, il faut introduire les notions de conductivité thermique, dilatation thermique et résistance aux chocs thermiques.

Il y a deux possibilités d'utilisation des céramiques pour les applications thermiques :

- le matériau peut avoir à subir des chocs thermiques. Dans ce cas, il faut qu'il possède un coefficient de dilatation thermique le plus faible possible et une conductivité thermique élevée,
- mais il peut être utilisé aussi en tant qu'isolant thermique. Pour cela, il doit avoir une faible conductivité thermique.

### a- La réfractarité

Elle correspond à la résistance du matériau à haute température. La définition ISO (International Standard Organization) (R836-68) est la suivante : « un réfractaire, matière réfractaire ou produit réfractaire, est constitué de matières et produits non métalliques (mais n'excluant pas ceux contenant un constituant métallique) dont la **résistance pyroscopique** est équivalente à 1500 °C au minimum ».

La **résistance pyroscopique** indique jusqu'à quelle température on peut utiliser un matériau sans difficultés.

La résistance pyroscopique des matériaux réfractaires peut être déterminée en utilisant des cônes pyroscopiques de référence appropriés (figure 2.3)

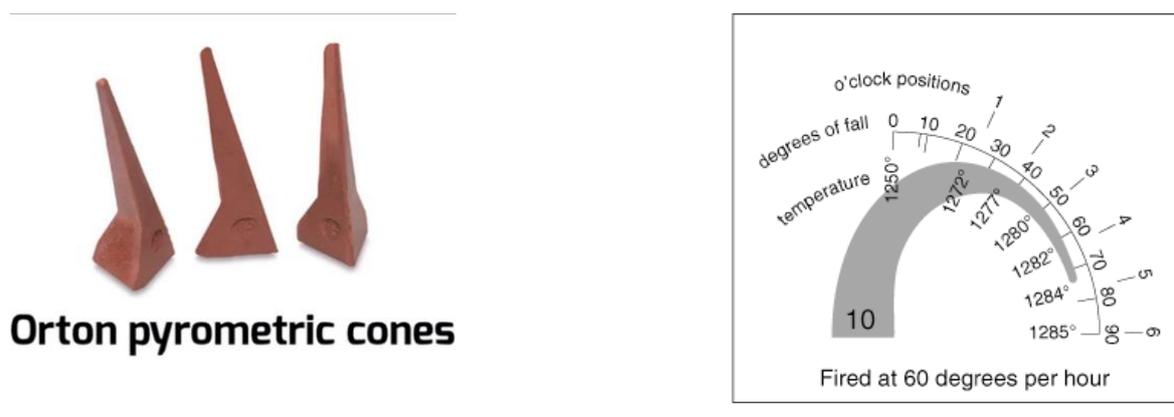


Figure 2.3. Cônes pyroscopiques

### **b- Conductivité thermique**

C'est la capacité d'un matériau de transmettre un flux de chaleur par unité de surface. Les céramiques ayant des structures simples ont une conductivité forte, et ceux ayant des structures complexes ont des conductivités faibles.

La conductivité thermique les plus élevées correspondent aux structures les plus ordonnées avec des faibles poids atomiques, ainsi,

Le diamant et le graphite ont des conductivités élevées,

BeO, SiC et B<sub>4</sub>C, les poids atomiques sont similaires et plutôt faible, leur conductivité sont élevées, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> ont des conductivités intermédiaires,

UO<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub> avec des grands poids atomiques ont des conductivités faibles.

Dans une structure cristalline, quand la température croit, le désordre augmente et la conductivité thermique diminue.

Cependant, cette conductivité thermique est très sensible aux impuretés et spécialement à la présence d'oxygène.

Matériaux	composition	25°C	100°C	500°C
Oxyde d'uranium	UO <sub>2</sub>	12	8	4.5
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38	35	11
Magnésite	MgO	40	35	11
Carbure de silicium	SiC	110	90	65

### **c- Dilatation thermique**

la dilatation thermique d'un matériau est due à l'amplitude des vibrations atomiques de la structure, qui augmente sous l'effet de la température. Dans les composés ioniques les structures correspondent en général à des empilements compacts. Cela donne des coefficients de dilatation relativement élevés, telle que Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cela explique leur très mauvaise tenue aux chocs thermiques. Dans les céramiques à liaison covalente, cette contribution est compensée par les espaces vides (empilement non compacte d'atomes). Cela a pour conséquence des coefficients de dilatation sont en général faibles.

Un coefficient linéaire de dilatation thermique  $\alpha_L(K^{-1})$  se définit par :

$$\alpha_L = \Delta L / (L_0 \cdot \Delta T)$$

Sachant que :  $L_0$  : la longueur initiale du matériau.

$\Delta T$  : l'écart de température ou le pas de variation de la température.

$\alpha_L$  correspond à une déformation relative par Kelvin :  $\varepsilon = \alpha_L \cdot \Delta T$

Le coefficient de dilatation volumique  $\alpha_v(K^{-1})$  est donné par la relation suivante :

$$\alpha_v = \Delta V / (V_0 \cdot \Delta T).$$

Où V représente le volume.

Dans le cas des matériaux céramique isotrope :  $\alpha_v = 3 \cdot \alpha_L$ .

Le choc thermique est dû aux contraintes thermiques qui interviennent quand le matériau est soumis à des différences de températures entre la surface de la pièce et l'intérieur. La résistance aux chocs thermiques est d'autant meilleure que le coefficient de dilaton est faible.

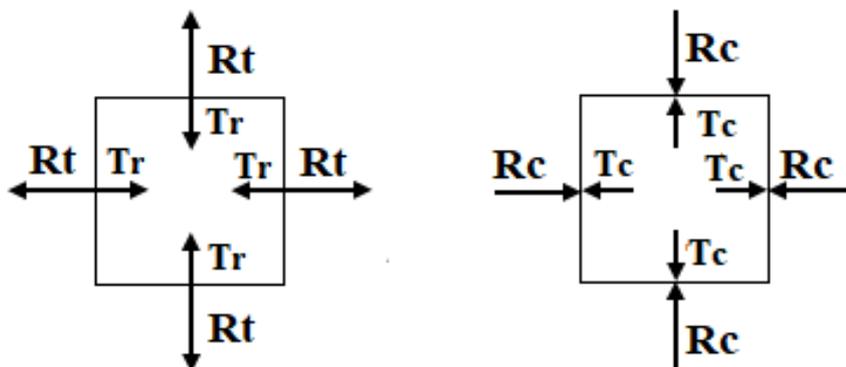
Les carbure de silicium (SiC), par exemple, ont un coefficient de dilatation ( $5.2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) inférieur à celui de l'Alumine ( $Al_2O_3$ ) ( $8.1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ). Ils présenteront donc une meilleure résistance aux chocs thermiques.

Quand la céramique est chauffée, elle est en compression, alors que quand elle est refroidie, elle est en traction. Les céramiques 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 (*C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle fait intervenir la conductivité thermique lambda et la capacité thermique d'un matériau*).

Condition de rupture :  $\sigma_c > \bar{\sigma}$ ,

$\sigma_c$  : contrainte de cisaillement, et  $\bar{\sigma} = E \cdot \varepsilon = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$

La valeur de  $\Delta T$  pour qu'il n'y aura pas de rupture :  $\Delta T < \sigma_c / E \cdot \alpha$

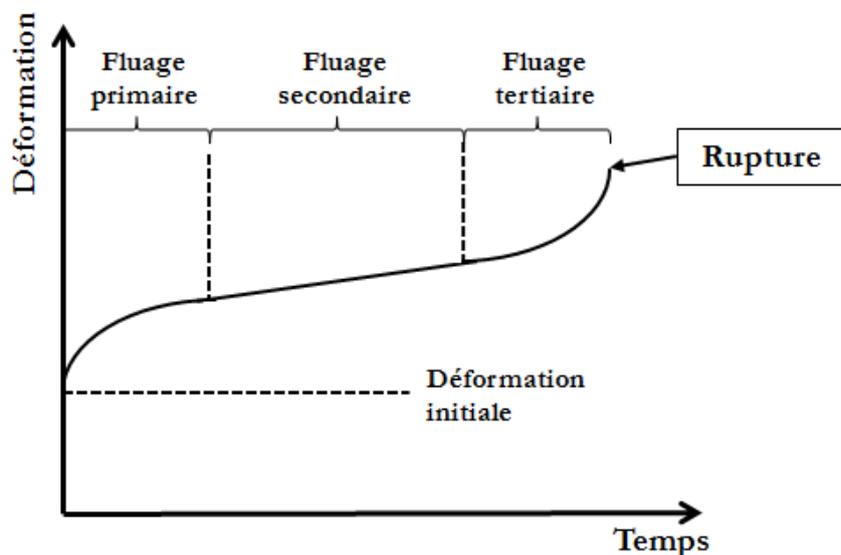


**Figure 2.4.** Chauffage et refroidissement d'un matériau céramique

#### 4. Mécanismes de rupture des céramiques

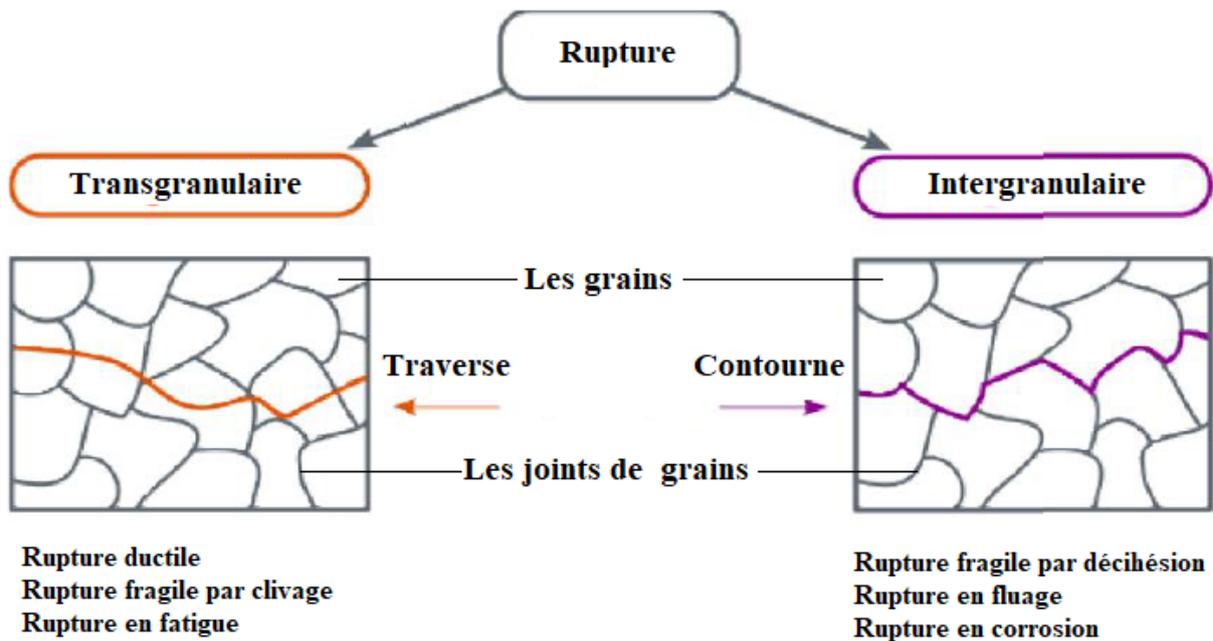
Les céramiques sont principalement caractérisées par deux mécanismes de rupture : le clivage (Séparation par plans, par niveaux) et le fluage (Lors d'un essai mécanique de fluage, réalisé avec une éprouvette soumise à une contrainte et une température constantes, l'allongement est mesuré en fonction du temps. La courbe ainsi obtenue présente trois différentes zones, de comportements différents : il s'agit des trois modes de fluage (figure 2.5) :

- 1- Fluage primaire, endommagement rapide,
- 2- Fluage secondaire, le mieux connu, permettant le dimensionnement de pièces mécaniques,
- 3- Fluage tertiaire, endommagement final de l'éprouvette, rupture)



**Figure 2.5.** Modes de fluage

Dans les deux cas, la rupture affecte soit les grains (rupture transgranulaire), soit les joints de grains (rupture intergranulaire) (figure 2.6). 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 2.6.** 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).

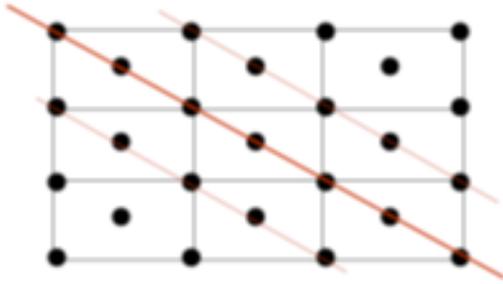
### Rupture par clivage

La rupture par clivage (figure 2.7) se caractérise par une déformation à rupture faible et une énergie à rupture faible

- Elle se produit le long de plans cristallographiques appelés plans de clivage : ils correspondent aux plans de densité atomique maximale et diffèrent selon le système cristallographique du matériau Rupture suivant un plan cristallographique bien défini Fer : (100), Rupture transgranulaire.

Le clivage se déclenche lorsque localement la contrainte dépasse un seuil critique, appelé contrainte de clivage

- Pour dépasser ce seuil, il est nécessaire d'amplifier localement la contrainte globale
  - Par empilement de dislocations. (*Défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline*).
  - Par coalescence (soudure) de dislocations
  - Par rupture de carbures



**Figure 2.7** Familles de plans de clivage et clivage des minéraux

## 5. Propriétés chimiques

On appelle **inertie chimique** la capacité à résister aux attaques chimiques. Les céramiques oxydes étant déjà oxydées, elles résistent beaucoup mieux aux effets corrosifs que certains métaux. La catalyse est l'action par laquelle une substance augmente la vitesse d'une réaction chimique sans paraître y prendre part.

Pour la catalyse, on emploie des poudres à très fortes surfaces spécifiques, en particulier les hydrates d'alumine. On utilise aussi la cordiérite,  $2 \text{Al}_2\text{O}_3 - 2 \text{MgO} - 5 \text{SiO}_2$ .

Ce caractère de matériaux neutres et inertes fait qu'elle ne présentent pas de danger pour l'homme et pour la nature. On les utilise d'ailleurs largement pour les équipements sanitaires, médicaux ou alimentaires.

## 6. Matériaux pour la coupe et la tribologie

### 6.1. Matériaux pour la coupe

Le choix d'un matériau et d'une nuance de coupe est un facteur important pour la réussite d'une opération d'usinage. Les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation
- Ténacité : résistance à la rupture
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière usinée
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion
- Résistance aux variations thermiques brusques

Les premières céramiques de coupe en oxyde d'aluminium sont apparues vers 1920 en Allemagne. Jusqu'aux années 1980, c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées sous forme de plaquettes frittées :

### **1- Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects**

**A-** Les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques ( $Al_2O_3 + ZrO_2$ ) destinée à l'usinage des fontes grises et malléables, (Les fontes grises présentent un aspect gris à la cassure en raison de la présence du carbone principalement sous forme de graphite. Leur fabrication nécessite des minerais à forte teneur en silicium (1,5 à 3%). Elles ont une température de fusion inférieure à celle de l'acier (1 200 °C pour les fontes grises contre 1 370 °C pour l'acier), ce qui permet de les mouler facilement. Très peu malléables et ductiles, elles peuvent cependant être usinées. Elle est utilisée pour les blocs-moteurs. ;

**B-** Les céramiques mixtes de couleur grise composée d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques. ( $Al_2O_3 + TiC$ ) ( $Al_2O_3 + TiCN$ ) dédiées à l'usinage des aciers traités et la finition de la fonte, ces céramiques permettent l'emploi de liquides de coupe.

### **2- Les céramiques à base de nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ )**

Ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus étant les sialons ( $Si_3Al_3O_3N_5$ ). Elles sont de couleur noire, permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demi à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides...). Il s'emploie à sec pour l'usinage des fontes, les alliages de nickel et l'inox réfractaire.

Les avantages résident dans :

- la longue durée de vie des outils car elles présentent plusieurs arêtes de coupe à usage successif.

- un usinage à très grande vitesse (100 à 800 m/min)
- des taux d'enlèvement de métal très élevés.
- ne réagissent pas avec les matériaux de la pièce (pas de contamination)
- obtention d'une bonne rugosité ( $Ra = 0.8\mu m$ )

Les inconvénients d'être d'une utilisation plus délicate que celle des aciers par ex:

- Elles sont plus sensibles aux chocs et aux vibrations.
- Elles nécessitent des machines robustes et puissantes.



**Figure 2.8.** Plaquette de coupe en céramique

## 6.2. Matériaux pour la tribologie

Les propriétés particulières des céramiques peuvent également être utilisées pour réduire les frottements entre les pièces mécaniques et lutter contre l'usure. On les trouve sous forme de revêtements pour des éléments de moteurs (chemises, pistons, vérins), des outils de coupe et de nombreuses pièces qui doivent résister à l'usure (pompes exposées à des substances pétrochimiques). Il existe plusieurs formes de revêtement mince (de quelques nanomètres à environ 10 micromètres d'épaisseur) :

**1- Le dépôt chimique en phase vapeur** (ou CVD pour l'anglais *chemical vapor deposition*). Ce type de revêtement est donc créé par réaction chimique à haute température, 700 à 1050°C. Le premier revêtement de ce type était composé d'une couche unique de carbure de titane (TiC). Les revêtements d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) et de nitrure de titane (TiN) sont plus récents.

**2- Le dépôt physique en phase vapeur** (ou PVD pour l'anglais *physical vapor deposition*). Ce type de revêtement est donc créé par dépôt physique en phase vapeur à température relativement basse (400 à 600°C). Ce procédé consiste à faire évaporer un métal qui entre alors en réaction avec un gaz, par exemple de l'azote, pour former une couche dure de nitrure sur la surface des plaquettes.

**3- Projection au plasma :** Dans le cas de la projection au plasma thermique, des poudres céramiques ou des mélanges de poudres, tels que l'oxyde d'aluminium, l'oxyde d'aluminium / dioxyde de titane, l'oxyde de zirconium et l'oxyde de chrome, sont fondus dans une flamme au plasma et appliqués sur la surface sablée.

#### 4- Les revêtements nano céramique

Ceramic pro est un revêtement de céramique transparent et nano cellulaire qui, lorsqu'il est durci, se lie chimiquement et se transforme sur la surface pour devenir une structure super rigide en verre nano, protégeant ainsi le substrat auquel il est appliqué. Le bouclier formé est de nature permanente, résistant aux solvants, aux acides, aux rayons UV, aux intempéries, au feu et à la corrosion. Cela préserve la peinture d'origine, rend la surface brillante, autonettoyante et super hydrophobe.

#### 7. Propriétés de radioactivité

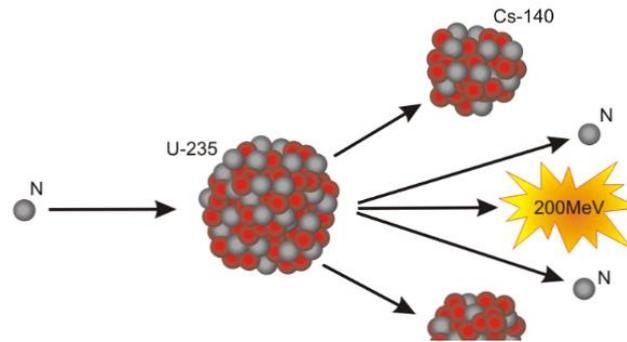
Un matériau **combustible** est une matière capable de dégager de l'énergie par fission ou fusion nucléaire. Il existe plusieurs types de céramiques combustibles.

Le **combustible** nucléaire le plus important est le *bioxyde d'uranium*  $UO_2$ . Il s'agit d'une substance brun-noirâtre qui a tendance à s'oxyder dans l'air. La composition  $U_3O_8$  est la plus stable dans l'air. Du fait de la faible teneur en uranium dans ses minéraux, l'extraction s'avère difficile. Le minerai le plus important (jusqu'à 4 % d'uranium) est la pechblende (ou uranite) qui contient des oxydes de composition différentes et qui peut être enrichie jusqu'à contenir 50 % de  $U_3O_8$ . L'uranium est un **matériau fissile**.

Il existe aussi des céramiques à base de *thorium* (*Th*). Tout le thorium est destiné à des emplois nucléaires comme **matériau fertile** se trouve dans les sables monazitiques.

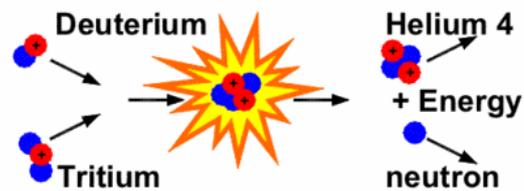
Une fois enrichis par des moyens physiques, ils contiennent de 5 à 8% de thorium. On a quelquefois besoin d'un matériau à la fois **fissile** et **fertile**. Pour cela, on utilise des céramiques à base d'*uranium - torium*.

*La fission nucléaire est le phénomène par lequel le noyau d'un atome lourd (noyau qui contient beaucoup de nucléons, tels les noyaux d'uranium et de plutonium) est divisé en plusieurs nucléides plus légers, généralement deux. Cette réaction nucléaire se traduit aussi par l'émission de neutrons et un dégagement d'énergie très important ( $\approx 200$  MeV par atome fissionné, à comparer aux énergies des réactions chimiques qui sont de l'ordre de l'eV par atome ou molécule réagissant) (figure 2.9).*



**Figure 2.9.** La fission nucléaire

*La fusion nucléaire, dite parfois fusion thermonucléaire, est un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd, pour déclencher ce phénomène on a besoin d'une grande source de chaleur. Cette réaction s'effectue de manière naturelle dans le Soleil.*



**Figure 2.10.** La fusion nucléaire

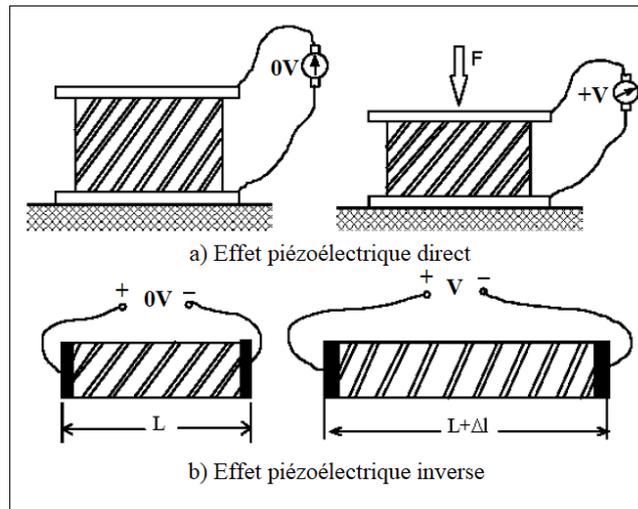
*Un isotope fertile est un isotope qui peut produire un isotope fissile à la suite de la capture d'un neutron,*

## **8. Céramiques pour l'électronique**

Les céramiques électroniques sont des céramiques magnétiques, électrooptiques, supraconductrices et aussi diélectriques et piézoélectriques.

### **8.1. Les céramiques piézoélectriques**

L'effet piézoélectrique a été observé dans certains matériaux, qui se chargent électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique (Effet piézoélectrique direct). Ainsi, l'application d'un champ électrique à ces matériaux donne lieu à une déformation (Effet piézoélectrique inverse) (Figure 2.11)



**Figure 2.11.** Effet piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour créer des impulsions d'horloge. On utilise les matériaux piézo-électriques du type  $\text{BaTiO}_3$  pour la fabrication des cellules de lecture des tourne-disques, les accéléromètres et les capteurs et émetteurs d'ultrasons. Les transducteurs ultrasonores de détection sous-marine ou de contrôle non destructif utilisent les  $\text{PZT}$  ( $\text{PbO-ZrO-TiO}_2$ ) pour transformer des oscillations électriques en vibrations mécaniques (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile). Les **PZT**, qui sont le plus largement utilisées aujourd'hui dans l'industrie. En 2010, le marché des dispositifs piézoélectriques est estimé à 14,8 milliards de dollars.

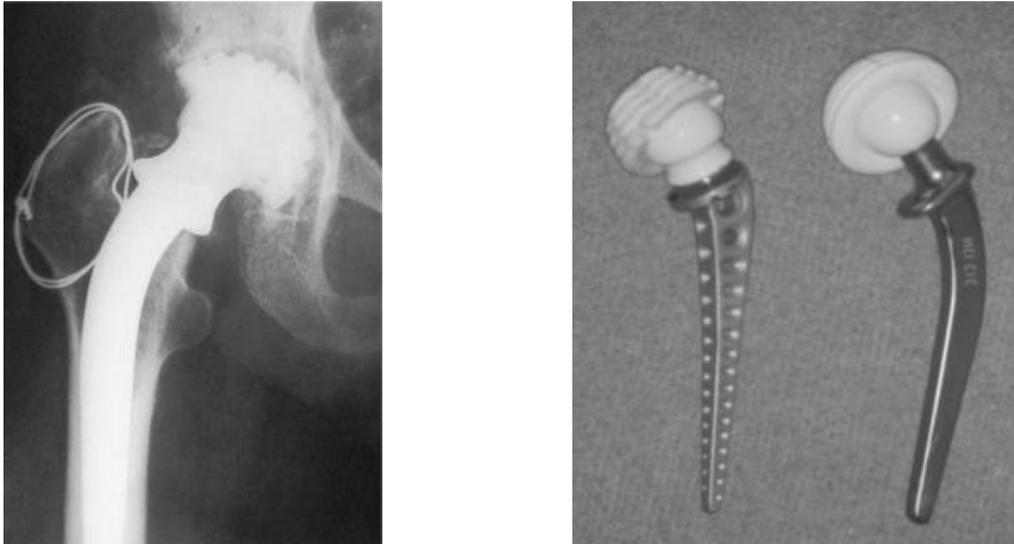
### 9. Les biocéramiques

Dans ce domaine, les céramiques sont généralement recherchées pour une combinaison de propriétés associant généralement stabilité chimique, biocompatibilité, propriétés mécaniques et parfois esthétique. Elles permettent ainsi de répondre au remplacement d'un élément fonctionnel du corps humain dégradé ou manquant. Le domaine médical utilise souvent le terme de « Biocéramiques » pour désigner cette famille de matériaux utilisés depuis une cinquantaine d'années en chirurgie réparatrice.

Suivant leur réactivité avec le corps humain on distingue deux types de biocéramiques :

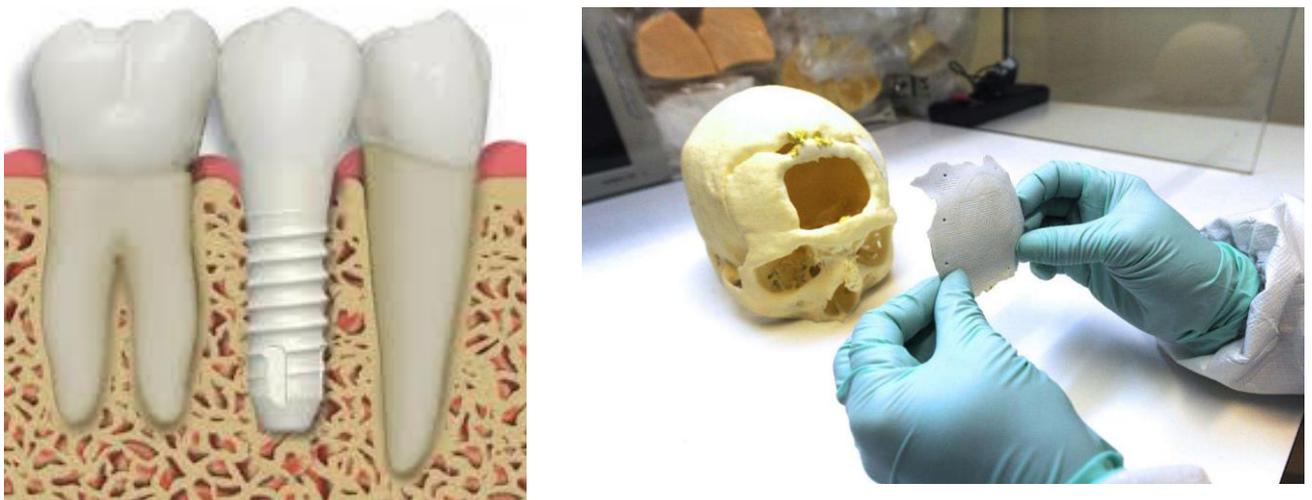
**a) Les céramiques bio-inertes** qui ne développent pas de lien avec le tissu osseux, ils sont utilisés dans les **prothèses orthopédiques** depuis 1965. Parmi elles, on distingue l'alumine, la

zircon, et les composites alumine-zircon qui ont été utilisés principalement en arthroplastie de la hanche pour la réalisation des couples de frottement -tête-cupule- (figure 2.12).



**Figure 2.12.** Première implantation chez l'homme d'une prothèse totale de hanche alumine-alumine par Boutin (1970). Tige cimentée en inox, tête alumine collée à l'Epoxy.

**b) Les céramiques bioactives** qui créent un lien entre l'os et le matériau par la formation in vivo d'une couche d'apatite carbonatée. Ce sont des céramiques poreuses, plus ou moins solubles, aux propriétés mécaniques faibles. Elles sont ostéoconductrices et utilisées comme matériau de comblement (plombage dentaire) ou d'ancrage osseux (comme implants dentaires et les prothèses crâniennes) (figure 2.13).

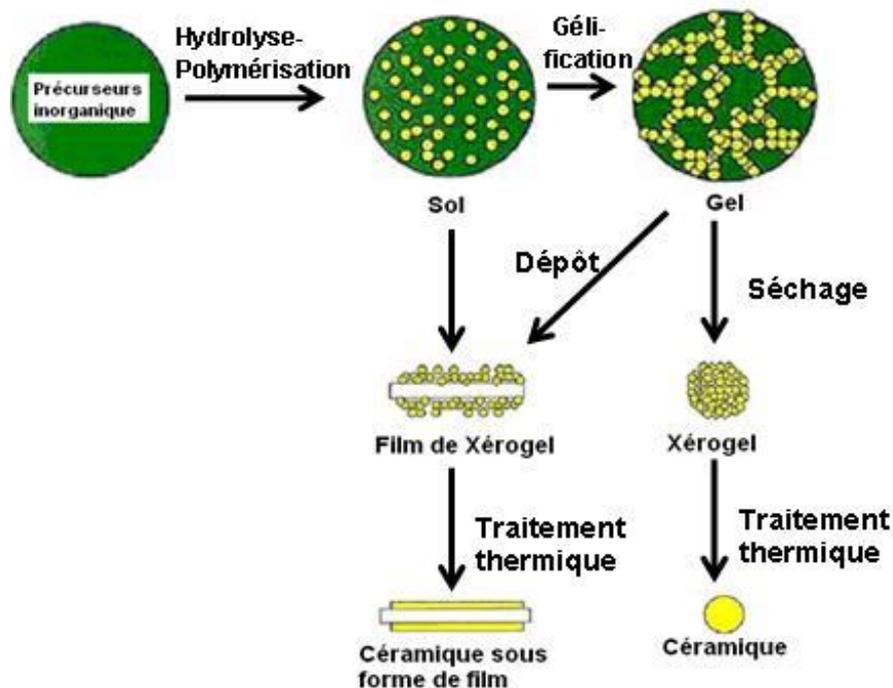
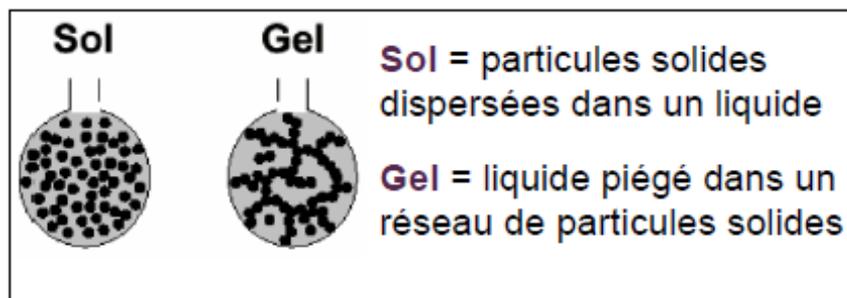


**Figure 2.13.** a- Implants dentaire en zircon

b- prothèses crâniennes en porcelaine

### 10. Le Procédé Sol-Gel

L'appellation sol-gel est une contraction des termes « **solution-gélification** ». Le terme sol-gel est utilisé pour qualifier l'élaboration des matériaux à partir d'une solution organométallique, la solution de début ou sol évolue suivant divers mécanismes vers un gel qui lui-même, après le traitement thermique, il donne le matériau final. Cette méthode est utilisée pour élaborer plusieurs types des céramiques et plus utilisée ces dernières années pour élaborer des couches minces à base de PZT.



**Figure 2.14.** Principe de fonctionnement du Sol Gel.