

## **Propriétés physiques et mécaniques des Céramiques**

**Semestre : 3 Unité d'enseignement: UEF 2.1.2 Matière: Propriétés physiques et mécaniques des Céramiques VHS: 45h (Cours: 1h.30, TD: 1h30) Crédits: 4 Coefficient: 2**

### **Objectifs de l'enseignement:**

L'objectif de cet enseignement est de montrer aux étudiants comment les propriétés physiques, mécaniques et thermomécaniques des céramiques peuvent être contrôlées par la microstructure et comment celle-ci peut être modifiée pour les améliorer.

### **Connaissances préalables recommandées:**

Elasticité, thermodynamique, fluage et diffusion.

### **Contenu de la matière:**

1. Propriétés mécaniques.
2. Matériaux pour la coupe, le forage et la tribologie.
3. Matériaux réfractaires.
4. Céramiques pour l'électronique.
5. Biocéramiques.
6. Céramiques nucléaires : combustibles, absorbants et matrices inertes.
7. Méthodes sol-gel et propriétés optiques.

### **Mode d'évaluation:**

Contrôle continu: 40%; Examen: 60%.

## Chapitre I : Généralités sur les céramiques

### 1- Généralité sur les céramiques

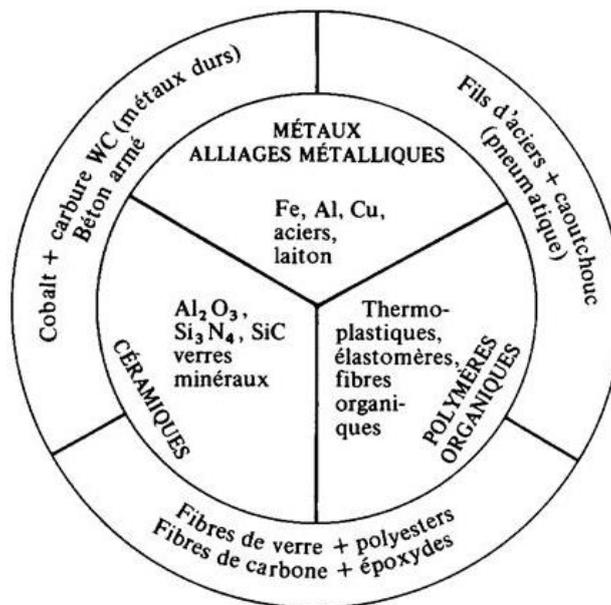
Dans la science des matériaux, selon la composition et la structure, les matériaux sont classés comme suit :

3 groupes principaux :

- Métaux et alliages :
- Polymères :
- Céramiques

Et un 4<sup>ème</sup>

Les matériaux composites



**Figure 1.** Classification des matériaux

Les céramiques sont parmi les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme, puisque les céramiques naturelles (roches) sont des constituants essentiels de la couche terrestre. Leur nom, qui provient du grec «Keramos», signifie matière cuite.

L'argile était la matière première (kaolin) utilisée pour fabriquer les premières céramiques synthétiques (poterie). Le kaolin est un silicate ayant comme formule globale  $(Si_2O_5)_2 Al_2(OH)_4$ .

Les matériaux céramiques sont des matériaux **inorganiques** et **non métalliques**.

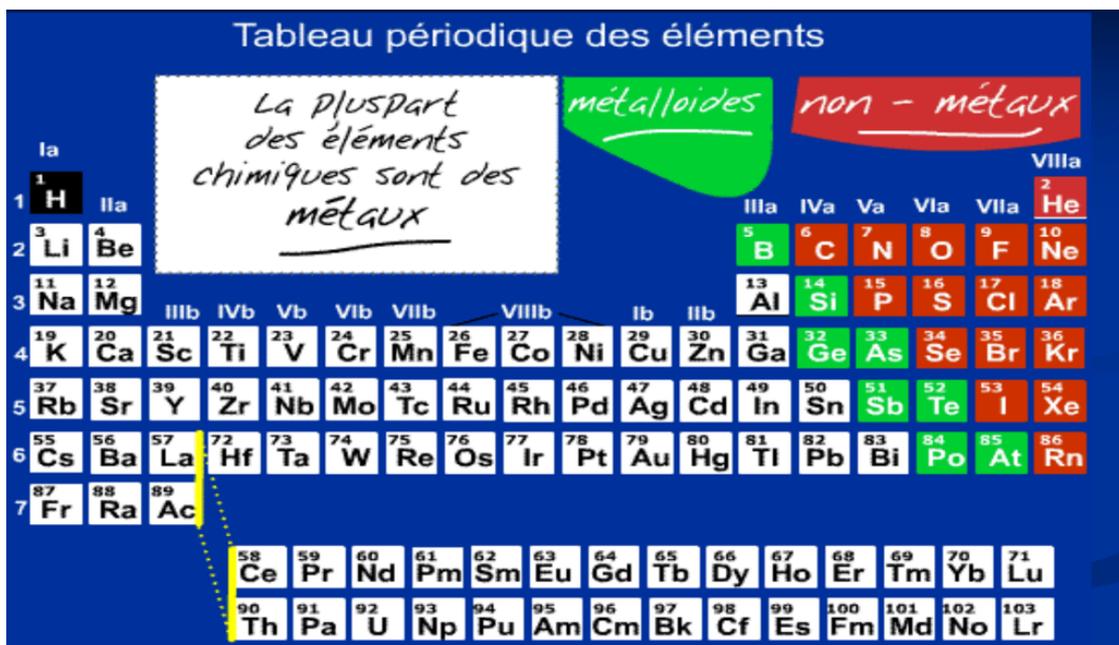
On distingue deux familles de céramiques :

**Les oxydes :** (céramique est constituée d'un métal associé à un non-métal, figure 2).

- \*  $Al_2O_3$ , (alumine, ou oxyde d'aluminium), L'alumine est principalement utilisée comme source d'aluminium, comme abrasif en raison de sa dureté et comme matériau réfractaire ( $T_f = 2050\text{ °C}$ ).
- \*  $ZrO_2$ , (dioxyde de zirconium ou oxyde de zirconium) En raison de sa dureté chemises piston, prothèses dentaires articulations artificielles, fabrication de couteaux de cuisines haut de gamme,
- \*  $BaTiO_3$  (titanate de baryum) les condensateurs céramiques,
- \*  $Y_2O_3$  (oxyde d'yttrium) réalisation de lasers à phase solide ( $T_f = 2425\text{ °C}$ )

**Les non-oxydes :** (céramiques constituées de deux non-métaux – un métalloïdes et un non métaux)).

- \* SiC (carbure de silicium) employé dans les composants électroniques devant fonctionner à température élevée, ou sous des tensions élevées
- \*  $Si_3N_4$  (nitrure de silicium) Tuile en nitrure de silicium fritté, coussinets des culbuteurs afin d'en limiter l'usure, dans les valves de régulation des gaz d'échappement pour améliorer l'accélération.



**Figure 2.** Tableau périodique

➤ **Un métal est un corps :**

Brillant (éclat métallique) et reflète bien la lumière

Conducteur de chaleur et d'électricité.

Réagit aux acides

Malléabilité : L'élément peut se déformer sans se casser et sans reprendre sa forme initiale.

➤ **Un non métal est un corps :**

Mat et ne réfléchit pas la lumière (Aspect terne).

Ne conduit pas la chaleur ni l'électricité

Ne réagit pas aux acides

Non malléable

➤ **Un métalloïde est un corps :**

Métalloïde signifie qui ressemble aux métaux.

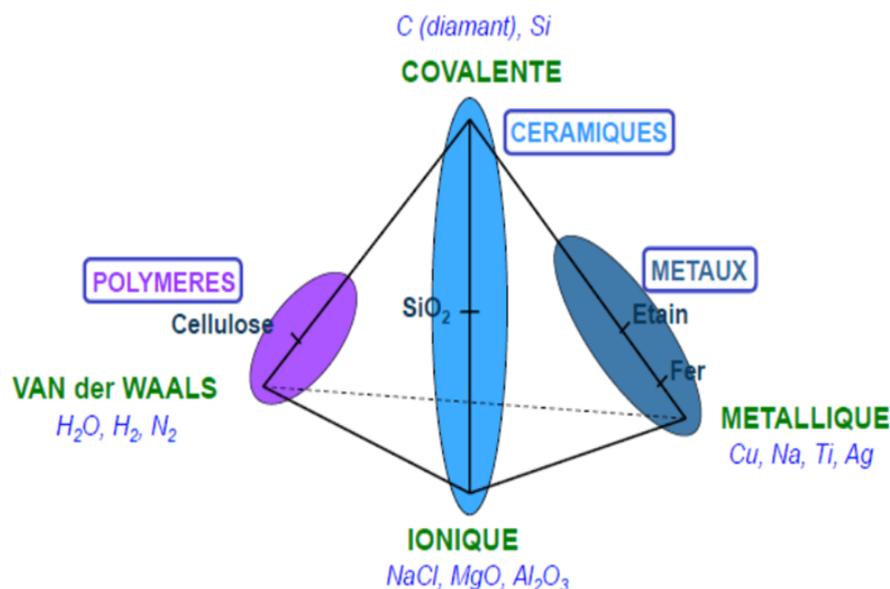
À la frontière (ligne en escalier) qui sépare les métaux des non-métaux

Possède au moins une propriété métallique et une propriété non-métallique.

faible conducteur d'électricité (semi-conducteur).

## 2- Microstructure des céramiques

On peut séparer les céramiques en deux grandes classes, suivant qu'elles sont cristallines (ionique) ou amorphes (covalente) figure 3.



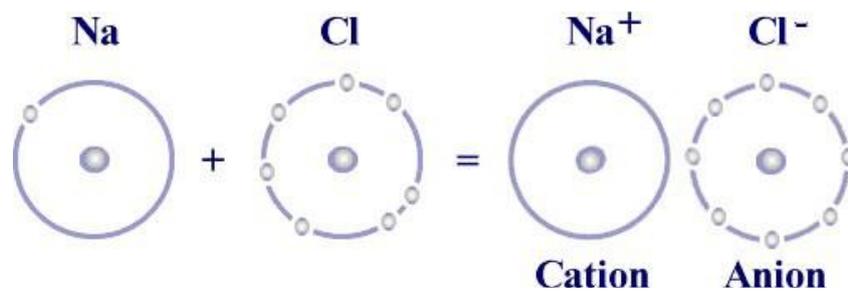
**Figure 3.** Les liaisons dans les matériaux

## 2-1- Les céramiques ioniques

Elles sont composées d'un métal et d'un non-métal, exemples :

- Chlorure de Sodium (NaCl)
- Magnésie (MgO)
- Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Zircon (ZrO<sub>2</sub>)

L'attraction électrostatique entre charges de signes opposés constitue la source principale de liaison. Les ions adoptent un empilement dense afin de minimiser les distances entre charges de signes opposés. Cet empilement est aussi contrôlé par une restriction que les charges de même signe ne se touchent pas. La structure de ce type de céramique est généralement cristalline (figure 4).



**Figure 4.** Liaison ionique - NaCl

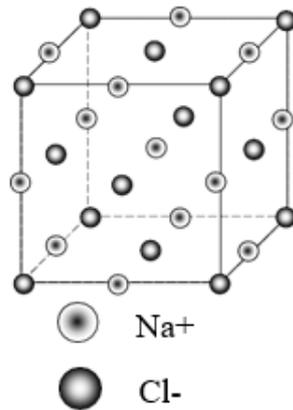
La plupart des céramiques ioniques de formules AB ont une structure proche de celle du chlorure de sodium (NaCl) qui est utilisé comme sel de table

### Le chlorure de sodium (NaCl)

Chaque atome de sodium perd un électron au profit d'un atome de chlore, la cohésion est assurée par l'attraction électrostatique entre Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>.

Au maximum d'interaction électrostatique, chaque Na<sup>+</sup> possède 6 voisins Cl<sup>-</sup> et réciproquement. Les positions des atomes Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> sont équivalentes dans ce réseau.

Dans la représentation présentée, les atomes de chlore se trouvent sur un CFC ( $8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$ ) et les atomes de sodium sont placés sur chacune des arêtes et au centre ( $12 \cdot \frac{1}{4} + 1 = 4$ )

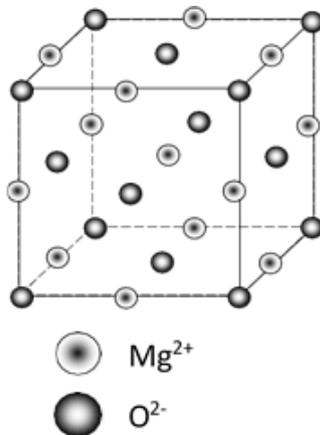


**Figure 5.** Structure chimique de chlorure de sodium

### La Magnésie (MgO)

Structure similaire au NaCl. Les ions O<sup>2-</sup> sont répartis selon un CFC.

La structure de la magnésie peut être décrite comme un empilement de deux réseaux CFC oxygène et magnésium ou comme un réseau CFC d'oxygène avec un atome de magnésium dans chaque interstice octaédrique. Dans ces conditions, l'attraction entre les ions de signes opposés compense la répulsion entre les ions O<sup>2-</sup>, le solide est très résistant thermiquement ( $T_f \sim 2000^\circ\text{C}$ )



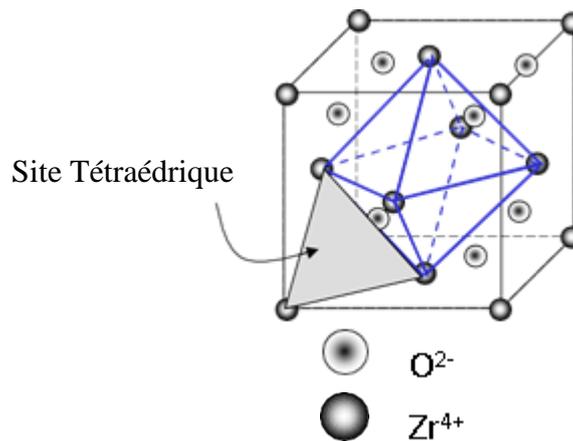
**Figure 6.** Structure de la magnésie

### La zircon (ZrO<sub>2</sub>)

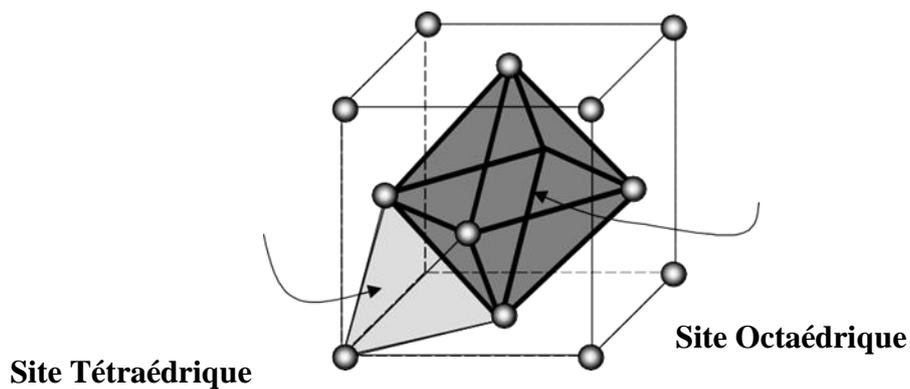
La zircon est une céramique de plus en plus répandue industriellement.

Sa structure cristallographique est constituée d'un empilement CFC de Zirconium, avec des ions O<sup>2-</sup> dans les sites tétraédriques.

Comme il existe 2 sites tétraédrique par atome de réseau, la formule de la zirconne est  $ZrO_2$ .



**Figure 7.** Structure de la zirconne



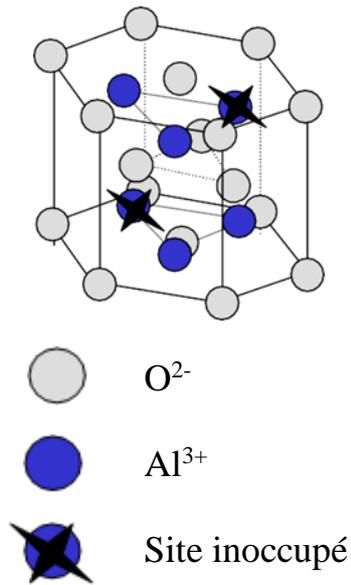
**Figure 8.** Sites octaédriques et tétraédriques d'un réseau cubiques

### L'alumine ( $Al_2O_3$ ) :

L'alumine est une céramique structurale utilisée dans les outils de coupe et les meules. Sa structure cristallographique est constituée d'un empilement HC d'ions oxygène avec des ions  $Al^{3+}$  situés dans les sites octaédriques.

La structure HC présente un site octaédrique et deux sites tétraédriques (comme les CFC).

Les ions  $Al^{3+}$  sont entourés par 6 ions  $O^{2-}$ , mais pour que le cristal soit électro-neutre, le nombre d'ions Al correspond au remplissage des 2/3 des sites. Deux sites sont donc vacants



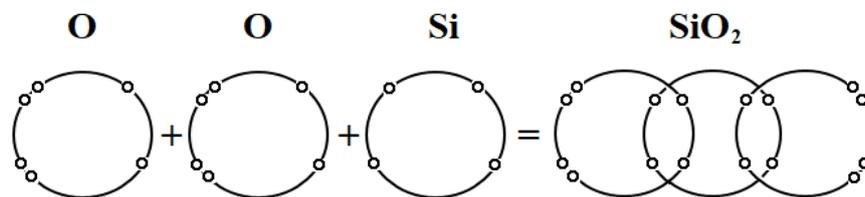
**Figure 9.** Structure de l'alumine

### 2-2- Les céramiques covalentes

Elles sont composées de deux non-métaux ou d'éléments purs. Exemples :

- Diamant (C)
- Carbure de silicium (SiC)
- Silice (SiO<sub>2</sub>)

La cohésion du solide est assurée par la présence de liaisons covalentes, c'est-à-dire le partage des atomes avec ses voisins. L'énergie est minimum, non par le développement d'un empilement dense comme pour les céramiques ioniques, mais par la formation de chaînes, feuillets ou réseaux. Les céramiques à liaisons covalentes sont plus fréquemment amorphes.

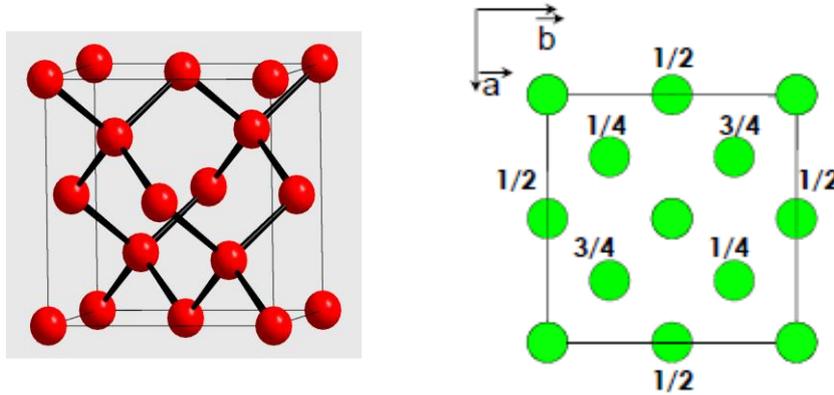


**Figure 10.** Liaison covalente - SiO<sub>2</sub>

#### **Le diamant (C) :**

Le diamant est la céramique covalente type, utilisée pour sa résistance à l'usure mécanique, le diamant possède une structure dérivée de la structure cubique à faces centrées (cfc), appelée structure

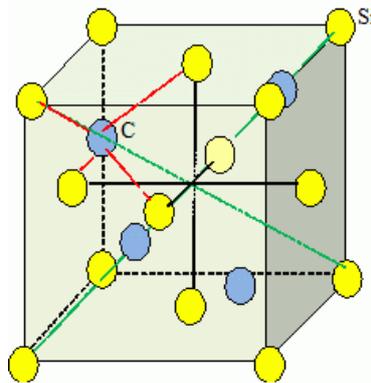
type diamant où en plus des atomes aux sommets du cube et au centre de chaque face, quatre des huit sites tétraédriques définis par une telle structure sont occupés, ce qui donne finalement huit atomes par maille (contre 4 pour une structure cfc classique), et fait que chaque atome de carbone a quatre voisins.



**Figure 11.** Structure de diamant

### Le carbure de silicium (SiC)

Le carbure de silicium (SiC) a une structure proche du diamant, on remplace un atome de carbone sur 2 par du silicium. Après le diamant, les carbures de silicium sont une des substances les plus dures.

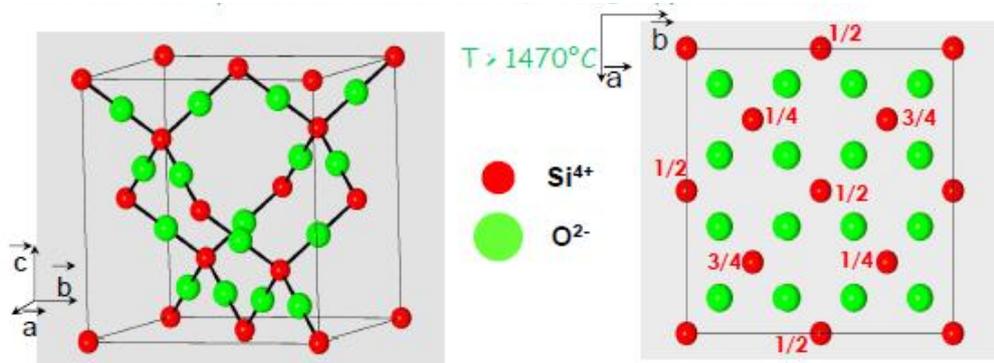


**Figure 12.** Structure de SiC

### La Silice (SiO<sub>2</sub>)

La silice est un solide insoluble dans l'eau et se trouve à l'état naturel sous forme de quartz et de sable, sa structure ressemble à celle du diamant, mais un atome O se trouve entre les atomes Si. Elle représente 60,6 % de la masse de la croûte terrestre continentale.

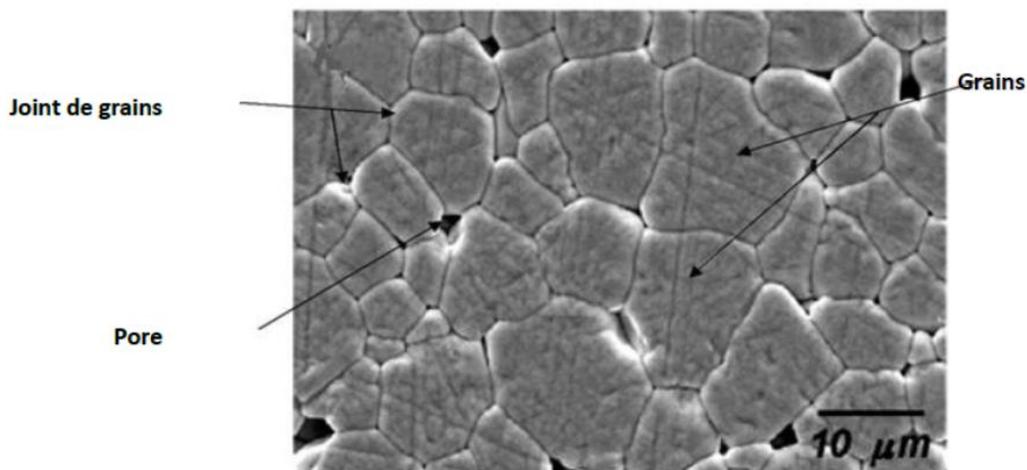
Au-delà de certains seuils, l'inhalation de toutes les formes de poussières, nanoparticules, particules fines de silice est dangereuse. Elle est notamment cause de silicose et de plusieurs autres maladies



## 2.5. La microstructure des céramiques

Les céramiques cristallines forment des microstructures poly cristallines, similaires à celles des alliages métalliques (Figure. 14). La structure des joints de grains est plus complexe dans les céramiques que dans les métaux, car les interactions électrostatiques apportent des contraintes d'équilibre supplémentaires (les ions de même signe ne doivent pas se toucher). En conséquence une fraction de porosité de l'ordre de 20vol% est fréquemment rencontrée dans les céramiques. Ces pores vont affaiblir le matériau en entraînant des concentrations de contraintes à leurs voisinages.

La présence de micro fissure, plus difficilement décelable est aussi très néfaste au matériau. Ces micro fissures résultent du procédé de fabrication ou de la différence de coefficient de dilatation.



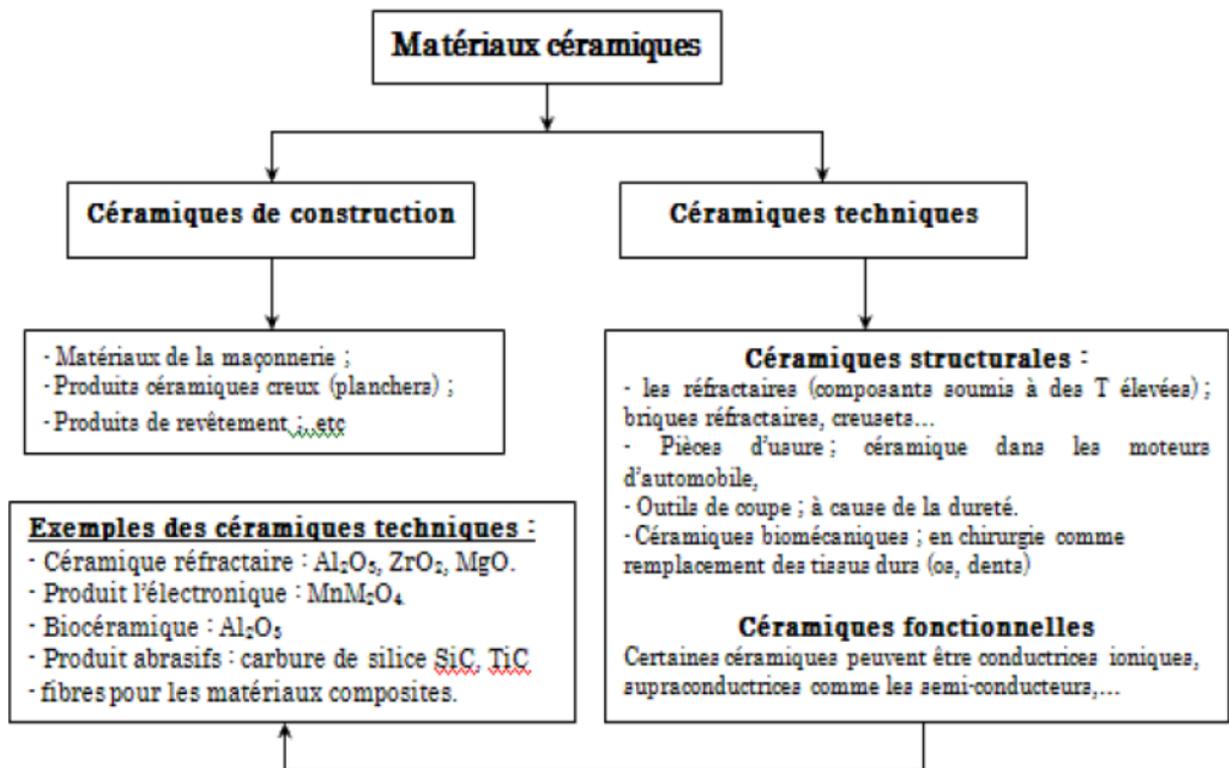
## 2.6. Classification des céramiques

Il faut, tout de même, distinguer deux types de céramiques (figure 15).

\*\* les céramiques traditionnelles (silico-alumineux), qui sont issues de matières premières naturelles (argile, kaolin, quartz) et généralement mises en œuvre par coulée (barbotine).

\*\* les céramiques techniques (associations métal-métalloïde), obtenues le plus souvent par frittage (traitement thermomécanique qui, dans un premier temps, provoque la cohésion de granulés de poudre avec un « aggloméré » préparé par compression à froid, cette ébauche étant ensuite chauffée dans des fours spéciaux) ou électro-fusion (les oxydes sont coulés directement dans un moule).

Nous nous intéresserons à ce deuxième type qui doit son apparition aux céramistes sollicités pour développer de nouveaux matériaux très fiables, très performants et nécessitant l'utilisation



de nouvelles technologies. Ces céramiques mettent à profit leurs propriétés électriques, isolantes, magnétiques, optiques, supraconductrices, thermiques thermomécaniques...etc.

**Figure 15.** Types de céramiques