

---

## Matière minérale

### Introduction

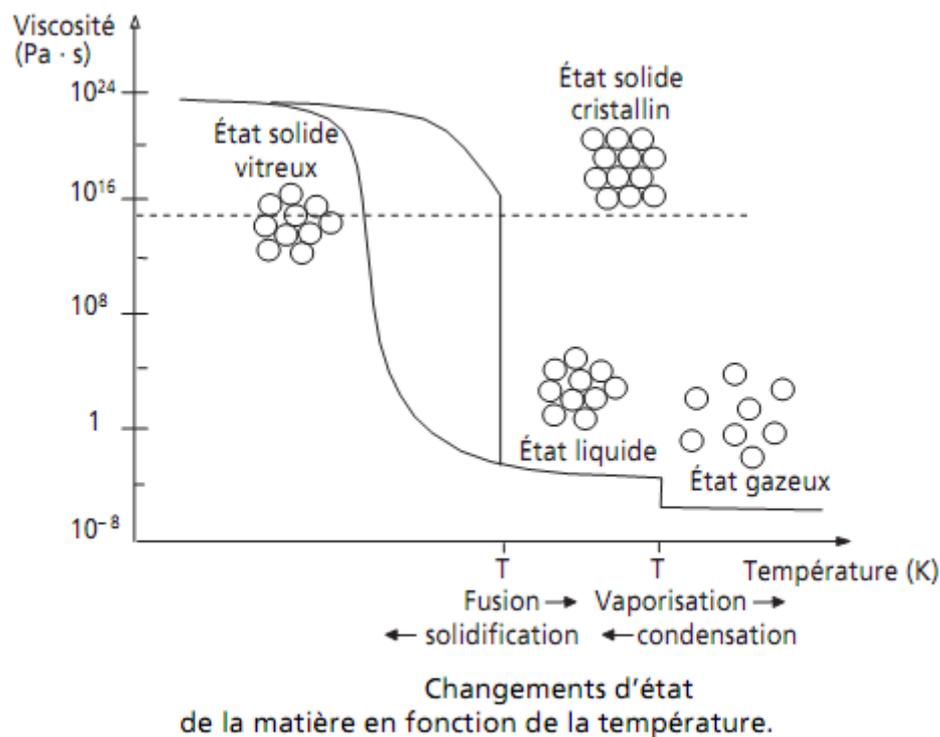
Les origines d'un matériau peuvent être naturelles ou artificielles.

- **Origines naturelles**
  - Les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable...)
  - Les organiques d'origine végétale (bois, coton, lin...)
  - Les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne...)
- **Origines artificielles**: ils n'existent pas dans la nature; il faut donc un travail humain ou animal pour transformer des matériaux naturels afin de créer de nouveaux matériaux. C'est ce qu'on appelle les matériaux de synthèse.

La cohésion des matériaux minéraux est assurée par des liaisons fortes, ioniques ou covalentes, comportant dans certains cas un caractère métallique. La nature des liaisons conditionne en grande partie les propriétés de ces matériaux de même que leurs conditions d'élaboration. Les différentes sous-classes des matériaux minéraux comprennent les verres minéraux, les céramiques techniques, ioniques ou covalentes, les carbones et graphites, les céramiques traditionnelles, les ciments et plâtres. En dehors de leur dénomination chimique ou commerciale, il n'existe pas de système normalisé de désignation des matériaux minéraux.

### 1. Etats de la matière

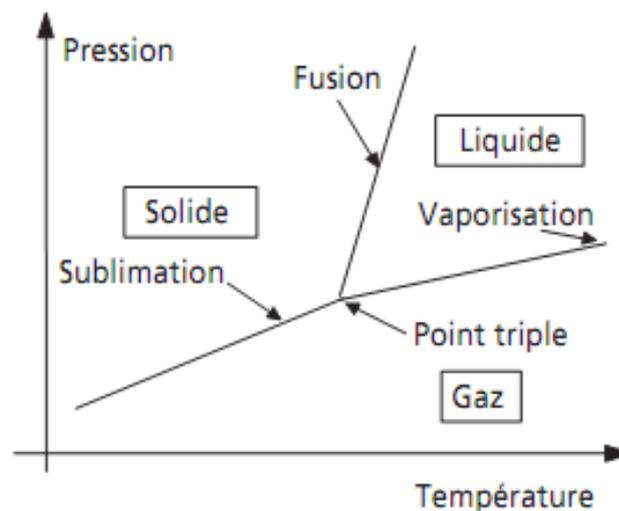
La caractéristique la plus évidente de la matière non vivante qui nous entoure est son état physique: solide, liquide ou gazeux. Ces différents états physiques proviennent essentiellement des effets de la température sur la microstructure, perceptibles à travers les variations de la viscosité de la matière, c'est-à-dire sa résistance à l'écoulement (figure ci-dessous).



La température de la matière mesure essentiellement le degré d'agitation et de désordre (ou entropie) des atomes qui la constituent:

- À température élevée, la matière est à l'état gazeux, état caractérisé par une distance importante entre atomes ou molécules disposés alors en désordre. Un gaz est donc compressible et très fluide.
- À température plus basse, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires deviennent non négligeables devant l'agitation thermique et peuvent provoquer le passage à l'état liquide. Les atomes ou molécules sont alors en désordre, mais à courte distance.
- À température encore plus basse, les forces d'attraction inter-atomiques devenant encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'état solide cristallisé. Les atomes sont alors ordonnés et à courte distance.
- Si l'abaissement de température s'effectue rapidement le liquide se fige en solide amorphe ou vitreux, les atomes y sont en désordre à courte distance.

La pression joue également un rôle dans les changements d'état de la matière, une augmentation de pression tend à élever les températures de changement d'état, car son action stabilise les états condensés (solide, liquide), par rapport à l'état dispersé (gazeux).



**Figure 1.3** Variation des états physiques en fonction de la pression et de la température.

On peut ajouter à cette liste d'états fondamentaux deux états « composites », c'est-à-dire des milieux dans lesquelles coexistent des états différents.

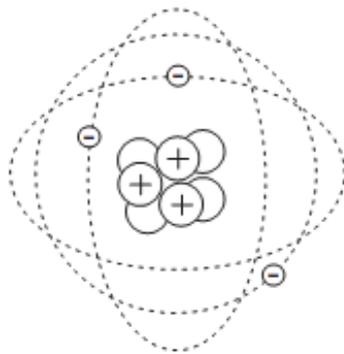
**L'état pâteux**, pour lequel des particules solides baignent dans un milieu liquide. On peut citer par exemple, le mortier avant la prise (grains de sable + pâte de ciment) ou encore la pâte dentifrice.

**L'état caoutchoutique**, pour lequel des fibres solides sont enchevêtrées (exemple: panneaux de fibres de verre).

## 2. Constitution de la matière

Les éléments de construction des matériaux sont les atomes et les molécules. L'atome est construit au départ d'un ensemble de particules élémentaires ayant des charges électriques différentes. Il est constitué d'un noyau composé de protons et de neutrons, entouré par des électrons. Le nombre d'électrons dans l'atome neutre définit le nombre atomique  $Z$ , c'est-à-dire le nombre de charge positive (protons) du noyau atomique. L'atome

a une charge globale nulle car le nombre d'électrons (négatifs) correspond au nombre de protons (chargés positivement).



- 3 électrons  
 - 3 protons  
 ⇒ numéro atomique (nombre de protons)  $Z = 3$   
 Noyau :  
 - 3 protons  
 - 4 neutrons  
 ⇒ masse atomique (nombre de protons  
 et de neutrons)  $A = 7$

Exemple de l'atome de lithium.

MASSES ET CHARGES  
 ÉLECTRIQUES DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES.

Particule	Masse (au repos)	Charge électrique
Électron	$9,110 \cdot 10^{-31}$ kg	$- 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$+ 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Neutron	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg	0

Les orbites des électrons occupent dans un atome des couches successives, correspondant à des niveaux d'énergie discrets, qui deviennent des bandes dans les solides regroupant plusieurs atomes. Ces niveaux sont séparés par des bandes interdites. On appelle énergie de Fermi de l'atome considéré la limite supérieure du remplissage des états d'énergie électroniques à l'équilibre thermodynamique et au zéro absolu. Les propriétés chimiques d'un élément proviennent essentiellement de ses électrons, et en particulier de ceux de la couche externe, appelés électrons de valence. La figure suivante illustre les différences de comportement par les structures de bandes d'atomes de métal, non-métal et de semi-conducteur.

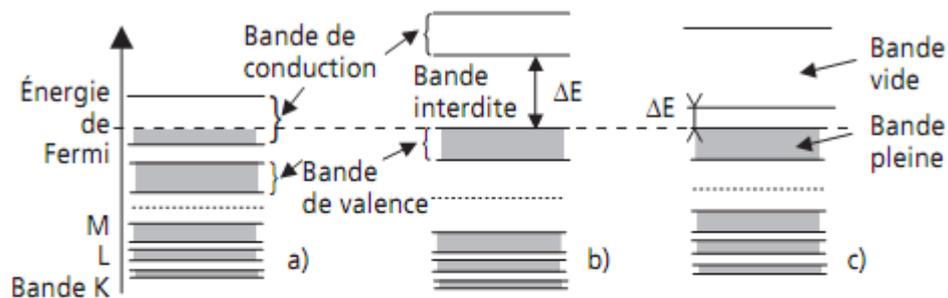


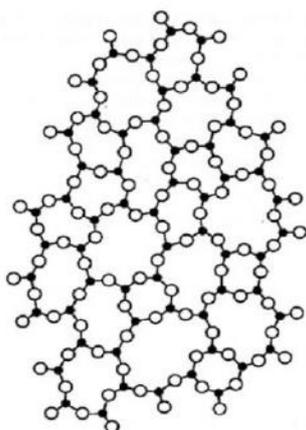
Figure 2.2 Schémas des structures de bandes.

- a) métal (la bande de conduction comporte des états disponibles)  
 b) non-métal (la bande interdite a une largeur  $\Delta E$  importante)  
 c) semi-conducteur (la bande interdite a une largeur faible).

### 3. Etat amorphe et état cristallin

#### 3.1. Etat amorphe

Dans un état amorphe les atomes sont disposés aléatoirement et proches les uns des autres (courte distance). Les gaz et les liquides appartiennent naturellement à cette catégorie, mais aussi les solides amorphes, tels que les verres ou certains polymères, qui peuvent être en fait considérés comme des liquides de viscosité très élevée. Lorsqu'un liquide est refroidi brutalement, les atomes ou molécules qui le constituent n'ont pas le temps de prendre leur position d'équilibre et le solide qui se forme est alors désordonné. Cet état solide est dit amorphe ou vitreux. C'est le cas, par exemple, du verre (figure ci-dessous) ou du magma dans l'eau de l'océan.



- : Atome de silicium
- : Atome d'oxygène



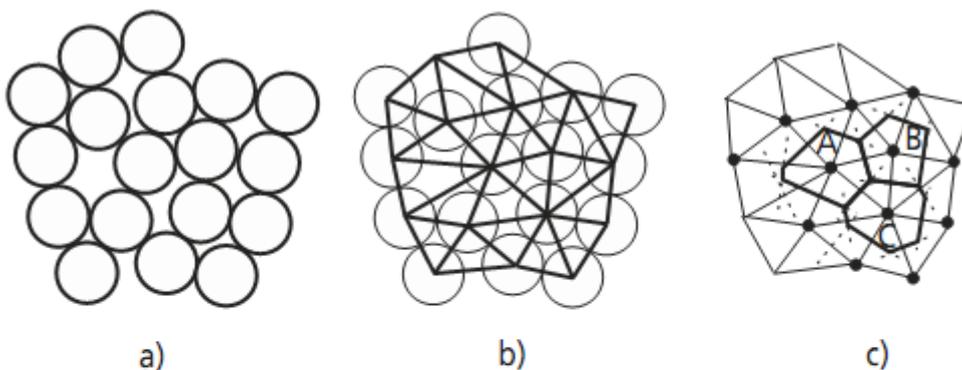
### 3.1.1. Distance interatomique

Dans un état amorphe, aucun des plus proches voisins d'un atome donné n'est strictement à la même distance  $d$  de celui-ci.



### 3.1.2. Nombre de coordinance

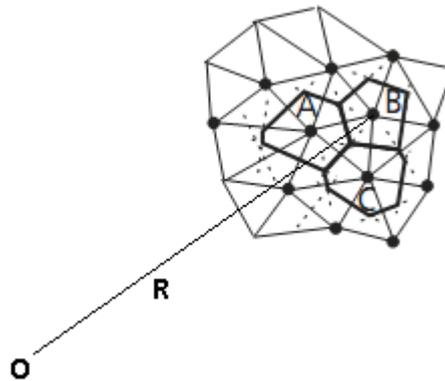
Traçons tous les segments joignant deux à deux les centres de gravité des atomes voisins au sein d'un amas amorphe, puis les plans médiateurs de ces segments (figure dessous). On appelle cellule de Wigner-Seitz (ou de Voronoï ou de Dirichlet) l'enveloppe intérieure à l'ensemble des plans médiateurs qui entourent un atome donné. Les facettes du polyèdre ainsi obtenu définissent les atomes plus proches voisins de l'atome central, et les normales à ces facettes sont les directions des liaisons. Le nombre de ces proches voisins, égal au nombre de facettes du polyèdre de Wigner-Seitz, s'appelle nombre de coordinance de l'atome central considéré.



a) Schéma d'un solide amorphe à deux dimensions constitué d'atomes rigides. b) Réseau de coordinance des liaisons entre plus proches voisins. c) Construction de polygones de Wigner-Seitz autour des centres de gravité des atomes en A, B, C. D'après le nombre de côtés de ces polygones, le nombre de coordinance de l'atome A est 6, celui de l'atome B est 5, celui de l'atome C est 7.

### 3.1.3. Fonction de densité radiale et fonction de distribution radiale

Soit un ensemble d'objets ponctuels répartis dans l'espace (par exemple les centres de gravité des atomes d'un solide amorphe). Notons  $R$  la distance d'un quelconque de ces points à un point choisi comme origine. Notons  $N(R)$  le nombre total de points situés à une distance inférieure ou égale à  $R$  par rapport au point origine, dans toutes les directions de l'espace.



La fonction de densité radiale  $D(R)$  est le nombre moyen de points situés entre  $R$  et  $R + dR$  par rapport au point origine, dans une direction quelconque.

La fonction de distribution radiale est définie comme  $D(R) = \frac{dN(R)}{dR}$

Ces fonctions possèdent les relations suivantes:

- A une dimension:  $N(R) = \int_0^R \rho(r) dr$  d'où  $D(R) = \frac{dN(R)}{dR} = \rho(R)$
- A deux dimensions:  $N(R) = \int_0^R 2\pi r \rho(r) dr$  d'où  $D(R) = \frac{dN(R)}{dR} = 2\pi R \rho(R)$
- A trois dimensions:  $N(R) = \int_0^R 4\pi r^2 \rho(r) dr$  d'où  $D(R) = \frac{dN(R)}{dR} = 4\pi R^2 \rho(R)$

### 3.2. Etat cristallin

Un cristal est un ensemble d'atomes (ou de molécules) disposés de manière périodique dans les trois directions et présentant aussi bien un ordre à courte distance qu'à

longue distance. Il peut être défini à partir de deux données : le réseau cristallin et le motif atomique.

Le chlorure de sodium solide (présent dans les roches, ou issu de l'évaporation de l'eau de mer) est constitué d'un empilement régulier d'ions: c'est l'état cristallin.

#### 4. Minerai

Un minerai est un agrégat naturel de roche et de minéraux dont on peut extraire, traiter et vendre avec un profit, au moins un minéral. Un minerai est un minéral ou une association minérale qui peut être exploitée pour un ou plusieurs métaux. Il est un matériau solide naturel à partir duquel un métal ou un minéral précieux peut être extrait de manière rentable. Un minéral est, aussi, une substance inorganique solide qui se présente sous forme d'un cristal ou d'un solide cristallin.

Il existe plus de 4000 variétés de minéraux dans la nature, mais seulement une douzaine de minéraux sont les plus abondants. La majorité des minéraux qui constituent la croûte terrestre sont composés uniquement de huit (8) éléments chimiques

Oxygène (O) : 46,5 %	} 82,5 % de la croûte terrestre
Silicium (Si) : 28 %	
Aluminium (Al) : 8 %	
Fer (Fe) : 5 %	
Calcium (Ca) : 3,5 %	
Sodium (Na) : 3 %	
Potassium (K) : 2,5 %	
Magnésium (Mg) : 2 %	

#### 5. Classification des minéraux

La classification des minéraux correspond à une répartition des espèces minérales basées notamment sur la composition chimique des minéraux. On distingue **neuf classes** de minéraux:

- Les éléments natifs sont des minéraux formés d'un seul élément chimique. Les éléments natifs ont un grand rôle économique.

Exemples : or (Au), graphite (C), platine (Pt), argent (Ag), cuivre (Cu)

- Les sulfures sont des minéraux formés d'un ou plusieurs métaux combinés à du soufre (S).

**Pyrite****Chalcopyrite**

- Les halogénures (chlorures (Cl<sup>-</sup>) et fluorures (F<sup>-</sup>)) sont des minéraux formés d'un ou plusieurs métaux ou métalloïdes combinés à l'élément chlore ou fluor

Exemples : sel gemme (NaCl), sylvite (KCl), fluorine (CaF<sub>2</sub>)

**Halite (sel gemme)****Fluorite**

- Les oxydes (O<sup>-2</sup>) sont des minéraux formés d'un ou plusieurs métaux combinés à de l'oxygène.

Exemple: magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), corindon (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), rutile (TiO<sub>2</sub>)

**Magnétite****Corindon**

- Les hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) sont des minéraux constitués d'une combinaison d'eau et d'oxydes métalliques.

Exemple: goethite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )

**Goethite****Brucite**

- Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) sont des minéraux constitués d'une combinaison de soufre et d'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes.

Exemple: gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), barytine ( $\text{BaSO}_4$ )

**Gypse****Barytine**

- Les carbonates ( $\text{CO}_3$ )<sup>-2</sup> sont des minéraux constitués d'une combinaison de carbone et d'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes.

Exemple: calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et sidérite ( $\text{FeCO}_3$ )



**Calcite**



**Sidérite**

- Les phosphates ( $\text{PO}_4$ )<sup>-3</sup> sont des minéraux constitués de phosphore et d'oxygène combinés avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes.

Exemple: apatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$ ), monazite ( $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})\text{PO}_4$ )



**Apatite**



**Monazite**

- Les silicates ( $\text{SiO}_4$ )<sup>-4</sup> sont des minéraux qui combinent le silicium et l'oxygène avec un ou plusieurs métaux ou métalloïdes. Les silicates représentent 90 % en poids de l'écorce terrestre

Exemple: quartz ( $\text{SiO}_2$ ), microcline ( $\text{KAl}_2\text{SiO}_5$ )



## 6. Différentes sous-classes des matériaux minéraux

Les différentes sous-classes des matériaux minéraux comprennent:

- Les verres minéraux sont élaborés par fusion, et ont une structure solide amorphe. Le composé de base de la plupart des verres minéraux est la silice  $\text{SiO}_2$  (La silice est la forme naturelle du dioxyde de silicium comme la silice sous forme de grains de sable)

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES VERRS MINÉRAUX.

Type de verre	Silice pure vitreuse	Verre sodocalcique	Verre borosilicate (pyrex)	Verre au plomb (cristal)	Vitro-céramique
Masse vol. ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	2,20	2,47	2,2	4,28	2,6
Coefficient de dilatation linéaire ( $10^{-5}/\text{K}$ )	0,5	8,7	3,3	9,1	5,7
Indice de réfraction	1,45	1,51	1,47	1,97	-
Température de mise en forme ( $^{\circ}\text{C}$ )	> 1 600	1 070	1 245	820	> 1 250
Température de ramollissement ( $^{\circ}\text{C}$ )	1 600	735	820	580	1 250
Permittivité relative	3,8	7	4,6	9,5	5,6
Facteur de perte	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Résistivité à 20 $^{\circ}\text{C}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$6,3 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{10}$
Module de Young (GPa)	69 à 74	69 à 74	60 à 64	55 à 58	30 à 120
Résistance à la compression (MPa)	1 000 à 2 000	600 à 1 000	750 à 900	600 à 900	100 à 1 800
Module de rupture (MPa)	80 à 100	40 à 60	58 à 70	40 à 60	15 à 230
Ténacité ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	0,5 à 0,8	0,6 à 0,85	0,5 à 0,9	0,4 à 1	0,8 à 1,7

- Les céramiques traditionnelles: très ancienne, leurs composants sont essentiellement de multiples oxydes et hydroxydes naturels comme l'argile et la silice.

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES CÉRAMIQUES TRADITIONNELLES.

Type de céramique	Terres cuites	Faïences	Grès	Porcelaines
Masse volumique (Mg/m <sup>3</sup> )	2,1 à 2,4	2,1 à 2,4	2,1 à 2,5	2,3 à 2,5
Taux de porosité (%)	15 à 30	10 à 15	0,5 à 3	0 à 2
Température de cuisson (°C)	950 à 1 050	950 à 1 200	1 100 à 1 300	1 100 à 1 400
Température de fusion ou de ramollissement (°C)	950 à 1 230			1 400
Conduct. therm. (W/m · K)	0,6 à 1,4			1 à 3
Coefficient de dilatation linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)	5 à 8	5,4 à 8,8	5 à 8	3 à 5
Module de Young (GPa)	50 à 80			70
Résistance à la compr. (MPa)	240 à 600			350
Module de rupture (MPa)	5 à 40	30 à 60	20 à 110	45 à 120
Ténacité (MPa · m <sup>1/2</sup> )	0,4 à 1			1,0

- Les céramiques techniques et cermets: ce sont des composés non hydratés au cours de leur mise en œuvre, comptant essentiellement des oxydes, carbures (Un *carbure* est un composé chimique du carbone avec un deuxième élément chimique autre que l'oxygène) et nitrures (Composé défini d'azote et d'un métal ; solution d'azote dans un métal). L'addition d'un élément métallique en quantité suffisante permet d'obtenir des cermets, composés-composites où les particules minérales sont liées par une phase métallique.
- Autres matériaux minéraux: nous trouvons aussi le graphite et carbones, les ciments, le plâtre, les roches et la glace

CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES CÉRAMIQUES TECHNIQUES.

Type de céramique	Masse vol. (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. de fusion ou de ramoll. (°C)	Conduc. therm. (W/m · K)	Coeff. de dilatation linéaire (10 <sup>-6</sup> /K)	Module de Young (GPa)	Résist. à la compr. (MPa)	Module de rupture (MPa)	Ténacité (MPa · m <sup>1/2</sup> )
Carbone diamant	3,52	3 720 à 3 910	600 à 2 200	0,8 à 1,2	990 à 1 050	30 000 à 65 000	4 000 à 6 000	2,3 à 3,4
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,9	2 050 à 2 060	24 à 35	8 à 8,9	330 à 400	1 750 à 3 000	350 à 580	3,5 à 4,5
Zircone ZrO <sub>2</sub>	5,6	2 680 à 2 710	2 à 12	7 à 9	180 à 240	1 650 à 3 600	140 à 270	2 à 6,9
Carbure de silicium SiC	3,2	2 700 à 2 830	90 à 200	4,3 à 4,6	390 à 440	2 000 à 3 500	450 à 600	3 à 5,1
Nitrure de silicium Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,2	1 890 à 1 900	15 à 43	2,6 à 3,3	280 à 310	11 000 à 15 000	480 à 960	4 à 5,4
Nitrure de bore BN	2,1	2 900 à 3 100	20 à 52	1 à 10	20 à 100	225 à 540	30 à 100	2,5 à 5
Carbure de titane TiC	4,9	3 170 à 3 250	18 à 25	6,6 à 7,4	420 à 450	3 570 à 5 850	275 à 450	2 à 3
Carbure de tungstène WC	15,6	2 820 à 2 920	28 à 88	4,5 à 7,1	600 à 670	6 600 à 10 000	510 à 820	2 à 3,8
Carbure de bore B <sub>4</sub> C	2,5	2 410 à 2 450	27 à 36	3,5 à 5,6	440 à 472	1 400 à 3 400	600 à 680	3,4 à 3,9
Quartz SiO <sub>2</sub>	2,2	-	1,4 à 1,5	0,48 à 0,52	54	1 200	100 à 110	0,6 à 0,8
Sialons Si <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> N <sub>5</sub>	3,25	2 480 à 2 540	18 à 23	3,3 à 3,7	265 à 300	3 800 à 4 500	450 à 600	4 à 7,7

## 7. Propriétés générales des minéraux

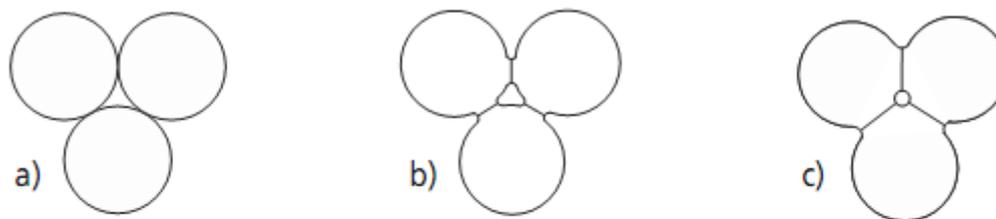
Les matériaux minéraux sont constitués de composés d'éléments non métalliques avec d'autres éléments non métalliques ou métalliques. Ceci explique qu'on y trouve des liaisons allant d'un caractère purement covalent à un caractère purement ionique en passant par un caractère mixte. L'absence d'électrons libres fait de la plupart des minéraux de mauvais conducteurs de l'électricité et de la chaleur. Ils sont fréquemment utilisés comme isolants thermiques ou électriques.

Les liaisons étant particulièrement stables et fortes, les minéraux ont souvent des températures de fusion élevées et une grande inertie chimique, d'où leurs applications dans les matériaux réfractaires. Pour les mêmes raisons, leur module de Young est en général élevé (Le module de Young, module d'élasticité (longitudinale) ou module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope). Les minéraux ont un comportement dur et fragile, sans aucune capacité de déformation plastique, sauf au voisinage immédiat de leur

température de fusion. On en tire parti en les utilisant comme abrasifs, comme outils de coupe ou dans des pièces devant résister à l'usure.

### 8. Méthodes de mise en œuvre des matériaux minéraux

À l'exception des verres qui sont élaborés et mis en forme par fusion, le procédé le plus général pour l'obtention de pièces massives est le frittage (utilisé également pour des poudres métalliques). Il s'agit du soudage progressif de grains de poudres sous l'effet conjoint de la pression de contact et de la température (figure ci-dessous):

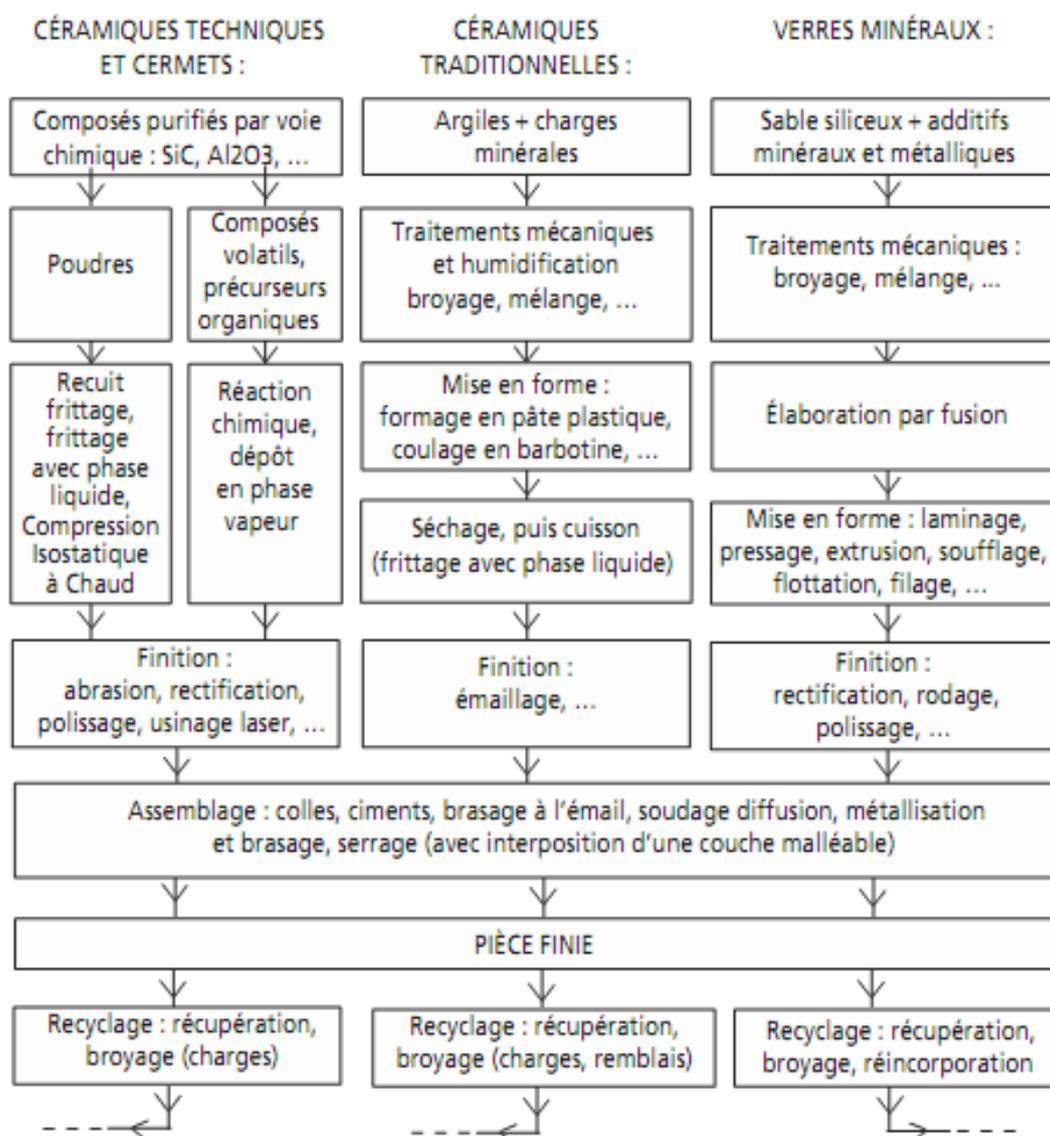


Succession schématique  
des différentes étapes du frittage de grains de poudre :  
a) compression initiale; b) apparition de cols soudés entre  
grains; c) fermeture et élimination des porosités résiduelles.

Le frittage est un procédé de fabrication utilisé pour fabriquer des pièces en matière minérale. Il consiste à mélanger des particules de matière minérale et des liants pour former une pâte, qui est ensuite moulée dans la forme souhaitée. La pièce ainsi obtenue est ensuite séchée et cuite à haute température pour que les particules de matière minérale se collent entre elles et forment une structure solide. Le frittage permet de fabriquer des pièces à haute densité, résistantes et précises, qui peuvent être utilisées dans de nombreux domaines tels que les matériaux de construction, la mécanique, la médecine, etc.

- Agglomérés à l'aide d'un liant (polymère visqueux), les grains de poudre sont compactés dans une préforme.
- Ce comprimé est porté à haute température (au moins  $0,6 T_F$ ). Le liant est éliminé par pyrolyse et/ou évaporation. La minimisation des énergies de surface et d'interface provoque par diffusion volumique et superficielle l'apparition de « cols » entre les particules.
- La porosité est d'abord interconnectée et ouverte.

- Des porosités résiduelles subsistent fréquemment dans les matériaux frittés. Elles sont caractérisées par leur taille et leur fraction volumique. Une porosité résiduelle ouverte permet d'obtenir des matériaux poreux perméables (filtres métalliques, verres poreux...); une porosité fermée permet d'obtenir des matériaux de masse volumique apparente plus faible que le matériau massif correspondant.
- L'application d'une compression uniaxiale (frittage sous charge) ou triaxiale (Hot Isostatic Pressing – HIP – ou Compression Isostatique à Chaud – CIC) pendant le recuit accélère le frittage.



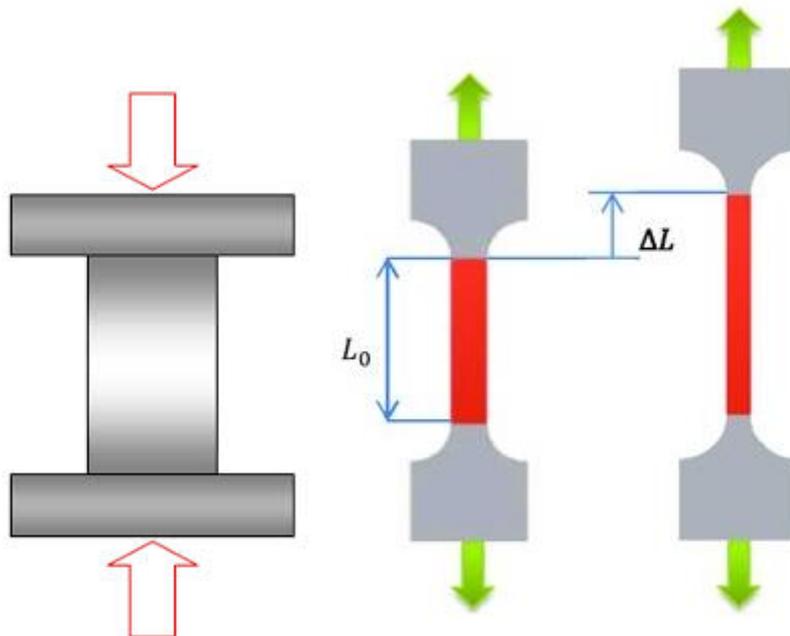
Principaux procédés de mise en œuvre des matériaux céramiques et des verres minéraux.

## 9. Propriétés mécaniques des matériaux minéraux

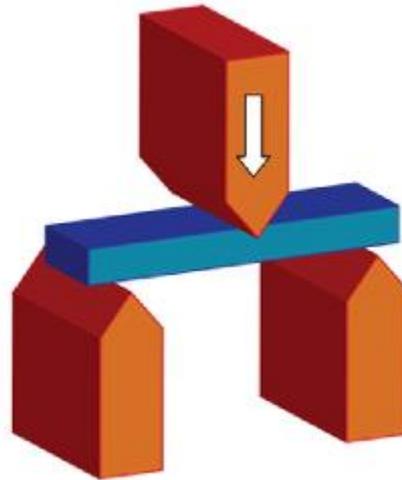
### 9.1. Caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux minéraux

Les essais mécaniques le plus souvent pratiqués sont:

- L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction. Pour les matériaux minéraux, la rupture provenant dans ce cas de la propagation stable de multiples fissures.



- Essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.



### 9.2. Statistique de Weibull de la rupture fragile

Les probabilités de rupture  $P_r(\sigma)$  et de survie  $P_s(\sigma)$  sont les fractions d'un nombre total d'échantillons identiques qui, respectivement, se rompent ou survivent à une contrainte donnée  $\sigma$ , elle sont liées par:

$$P_r(\sigma) = 1 - P_s(\sigma)$$

La distribution de Weibull décrit la probabilité de survie  $P_s(\sigma, V_0)$  de pièces de volume identique  $V_0$ , elle donnée par:

$$P_s(\sigma, V_0) = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

$\sigma_0$  est la valeur de contrainte pour laquelle  $P_s(\sigma, V_0) = \frac{1}{e} = 0,37$

$m$  est appelé le module de Weibull, il est de l'ordre 5 pour les céramiques traditionnelles, de 10 pour les céramiques techniques et des verres et 100 pour un alliage métallique.

Une pièce de volume important présente plus de risque de contenir un défaut de grande taille. Cette influence se traduit par la loi Weibull suivante:

$$P_s(\sigma, V_0) = \exp \left[ - \frac{V}{V_0} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

### 9.3. Effets de la durée de la sollicitation

Le maintien d'une charge appliquée fait chuter la résistance mécanique d'un matériau minéral, par croissance lente des fissures sous contraintes (en particulier en présence d'eau, par hydratation superficielle des fissures dans les minéraux à base d'oxydes). Ce phénomène

est appelé fatigue statique. La contrainte limite  $\sigma$  supportable pendant un temps  $t$  peut se déduire de la contrainte limite  $\sigma_0$  mesurée pendant un essai de durée  $t_0$  par la relation:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n = \frac{t_0}{t}$$

$n$  est l'exposant de sensibilité au temps. Il est de l'ordre de 10 à 20 pour la plupart des verres et des oxydes

#### 9.4. Effets de la taille des grains

La taille des grains est à l'origine d'apparition des plus grands défauts (porosités, microfissures). La contrainte  $\sigma_{max}$  acceptable par une céramique de ténacité  $K_{IC}$  (La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure) est donnée par l'expression empirique suivante:

$$\sigma_{max} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{d_{max}}}$$

$d_{max}$  est la taille des plus gros grains.

#### 9.5. Effets du taux de porosité

La fraction volumique de porosité résiduelles  $P$  d'un matériau minéral est donnée par:

$$\rho = \rho_0(1 - P)$$

$\rho$  est la masse volumique apparente et  $\rho_0$  est la masse volumique à l'état massif

Les propriétés mécaniques, à savoir le module de Young  $E$  et la résistance à la traction  $R_{mt}$  sont liés, respectivement, avec  $P$  par les relations empiriques de McKenzie:

$$E = E_0(1 - 1,9P + 0,9P^2)$$

$$R_{mt} = R_{mt0} \cdot e^{-nP}$$

avec  $4 \leq n \leq 7$  pour la majorité des céramiques.