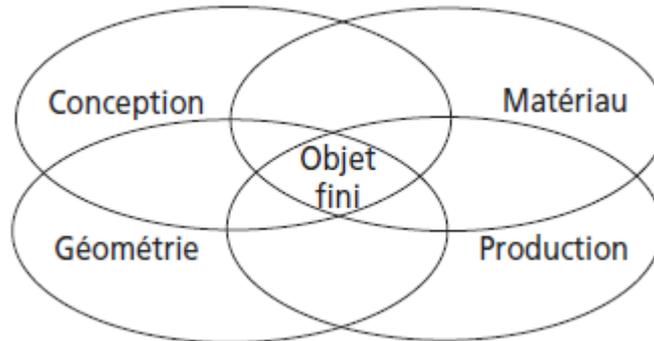


# Chapitre II

## Les MATÉRIAUX et leurs PROPRIÉTÉS

### II.1 Introduction

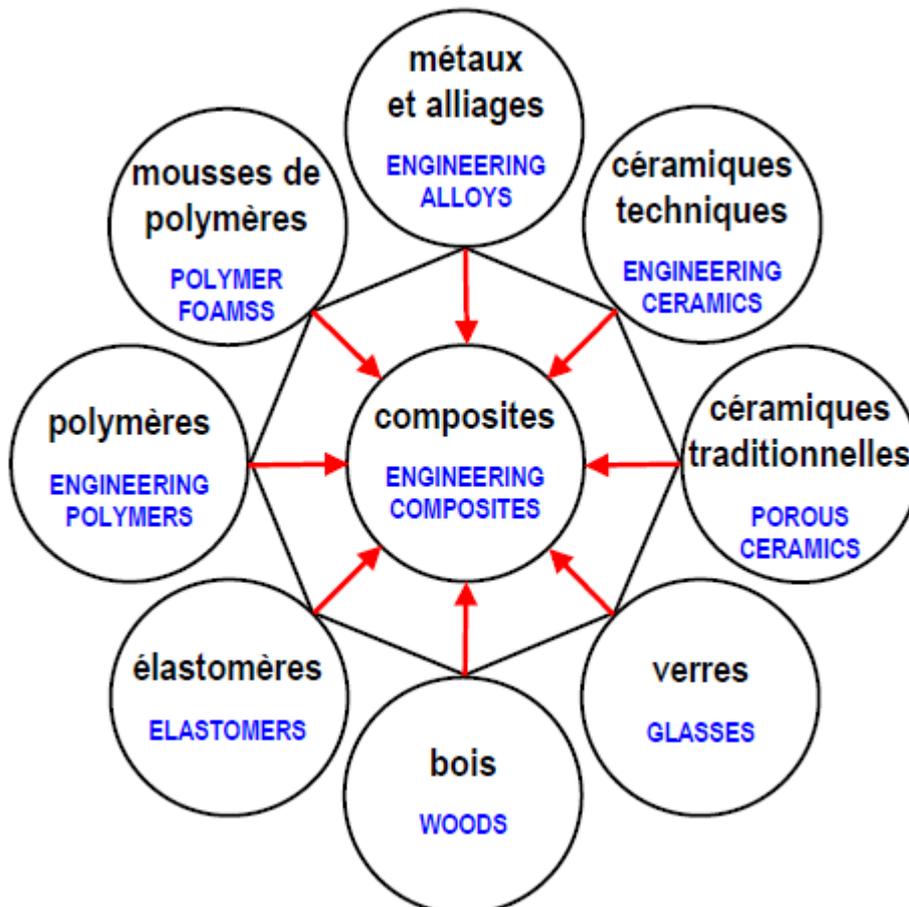
Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de **matériau** est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini (figure ...).



Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini.

### II.2 les familles de matériaux

Le nombre des matériaux techniques est très élevé, estimé entre 40 000 et 80 000. On les range en grandes classes, comme par exemple dans la figure suivante :



On classe habituellement les matériaux en six grandes familles : métaux, polymères, élastomères, céramiques, verres et composites. Les membres d'une même famille ont des traits communs : propriétés, méthodes de mise en œuvre et souvent applications.

## II.2.1 Les grandes classes de matériaux

De nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux.

- ✚ **Matériaux métalliques.** Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des **liaisons métalliques**.
- ✚ **Matériaux organiques.** Ce sont les matériaux d'origine biologique, les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.
- ✚ **Matériaux minéraux.** Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.
- ✚ **Matériaux composites.** Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.

## II.2.2 Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

### ▪ *Matériaux métalliques*

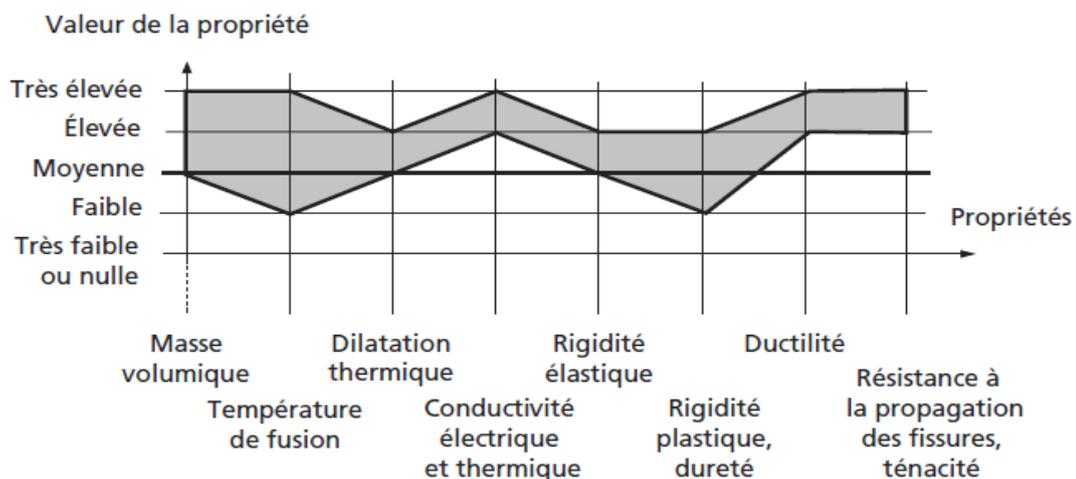
Les matériaux métalliques présentent un certain nombre de propriétés intéressantes :

#### Points forts :

- bonne conductivité thermique et électrique
- généralement paramagnétiques ou ferromagnétiques
- températures de fusion dans un large intervalle de température
- résistances élastiques élevées et isotropes
- tenaces et ductiles ; excellente aptitude à la mise en forme par déformation plastique
- durcissables par traitement thermo-mécanique

#### Inconvénients :

- masse volumique élevée
- sensibles à la corrosion
- sensibles au phénomène de fatigue



▪ **Matériaux organiques**

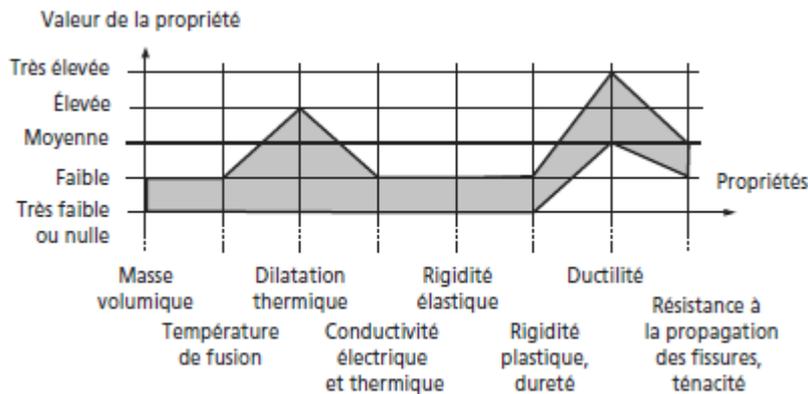
Les matériaux organiques présentent un certain nombre de propriétés intéressantes :

**Points forts :**

- faible masse volumique (8 fois moins que l'acier)
- faible module d'élasticité et faible limite d'élasticité
- conductivité thermique faible et résistivité électrique élevée
- bonne résistance à la corrosion par les agents minéraux
- bonnes caractéristiques tribologiques parfois
- transparents parfois
- peu coûteux souvent
- mise en œuvre et assemblage possibles pour pièce complexe

**Inconvénients :**

- fort coefficient de dilatation
- tenue très médiocre en température
- sensibles aux solvants organiques
- sensibles aux UV
- propension à l'absorption d'eau pour certains



▪ **Matériaux minéraux**

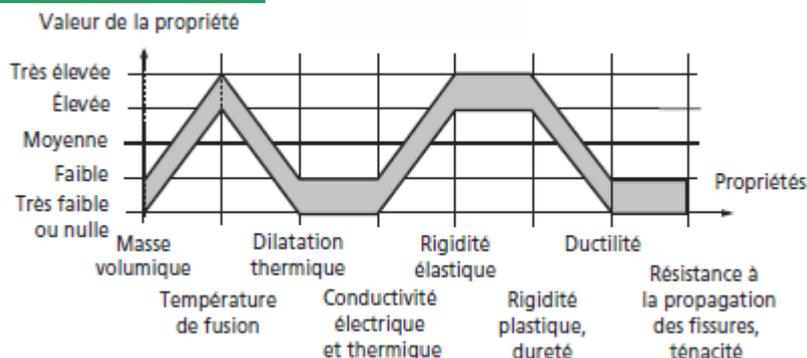
Les matériaux minéraux (céramiques & verres) présentent un certain nombre de propriétés intéressantes :

**Points forts :**

- point de fusion élevé
- limite d'élasticité et module d'élasticité très élevés
- bonnes propriétés mécaniques à haute température
- bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation
- masse volumique souvent peu élevée
- bons isolants électriques
- prix de revient parfois peu élevé

**Inconvénients :**

- comportement mécanique fragile
- faible ténacité (2 fois plus fragile qu'une fonte)
- difficiles à mettre en œuvre
- présentent souvent de micro défauts



## II.3 Définition des propriétés des matériaux

Le concepteur ne recherche pas un matériau en tant que tel, mais une combinaison de caractéristiques, un profil de propriétés. Le nom du matériau n'est qu'une façon d'identifier un profil de propriétés particulier.

Les propriétés standard : densité, modules, résistance, ténacité, conductivité thermique, ect (tableau...), sont définies dans cette partie.

### II.3.1 Les propriétés générales des matériaux

#### ✚ Densité

La densité  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) est égale au rapport de la masse par le volume correspondant.

#### ✚ Coût

Le coût  $C_m$  ( $\text{\$.kg}^{-1}$ ). Le prix d'un matériau est établi à 3 niveaux : celui des fabricants, celui des distributeurs et celui des détaillants. Il varie selon la quantité commandée, le procédé utilisé pour sa fabrication, sa dimension et sa forme.

### II.3.2 Les propriétés mécaniques des matériaux

#### ✚ Modules d'élasticité

Ils sont définis en ( $\text{GPa}$  ou  $\text{GN/m}^2$ ) comme la pente de la partie élastique linéaire de la courbe contrainte-déformation :

- le module d'Young  $E$  : décrit le comportement en traction et en compression
- le module de cisaillement  $G$  : décrit le comportement en cisaillement
- le module de compressibilité  $K$  : décrit l'effet d'une pression hydrostatique
- le coefficient de Poisson  $\nu$  (sans dimension) : rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale dans un essai de traction uniaxial.

Dans un matériau isotrope, les modules sont liés entre eux par les équations suivantes :

$$E = \frac{9K \cdot G}{G + 3K} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

#### ✚ Résistance mécanique

La définition de cette grandeur  $\sigma_f$  (en  $\text{MPa}$  ou  $\text{N/mm}^2$ ) nécessite de faire la distinction entre les familles de matériaux.

##### • pour les métaux :

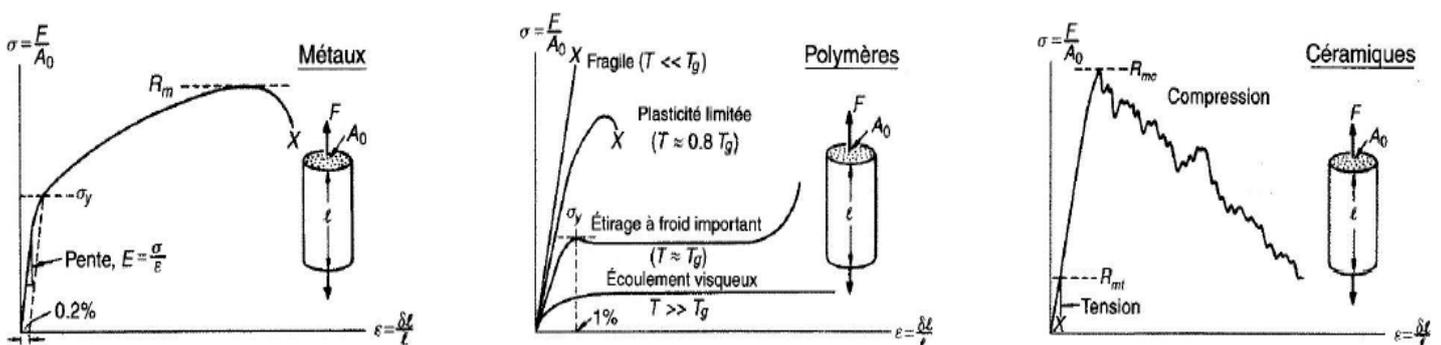
Contrainte associée à une déformation plastique de 0,2%. C'est la contrainte à laquelle les dislocations commencent à parcourir des grandes distances, et elle est identique en traction et en compression.

##### • pour les polymères :

Contrainte pour laquelle la courbe devient clairement non linéaire (typiquement 1% de déformation).

##### • Pour les céramiques et verres :

La résistance, pour les céramiques et verres, dépend fortement du mode de chargement. La résistance en traction  $R_{mt}$  est bien moins importante que celle en compression  $R_{mc}$ , et on a :  $R_{mc} = (10 \text{ à } 15) * R_{mt}$



**Courbe contrainte-déformation de différents types de matériaux**

### ✚ Résistance à la traction

C'est la contrainte nominale  $R_m$  (MPa) à laquelle une éprouvette cylindrique du matériau, chargée en traction, se casse. Elle est supérieure à la limite d'élasticité d'un facteur compris entre 1,1 et 1,3 du fait de l'écroutissage. Pour **les matériaux fragiles** (céramiques, verres et polymère non ductiles) : elle se confond avec la limite d'élasticité.

### ✚ Dureté

La dureté caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures,...), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell), mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore).

Grandeur caractéristique : dureté  $H$  en  $N.mm^{-2}$  ou MPa (HB, HV ou HR selon l'échelle utilisée).

### ✚ Ténacité

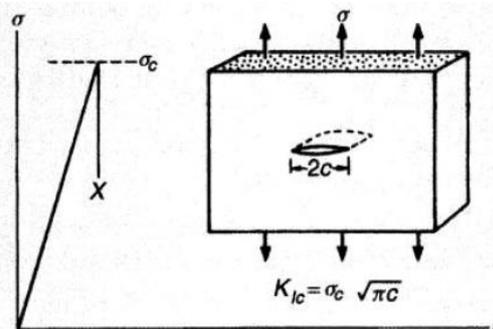
L'énergie de rupture  $G_c$  (en  $kJ.m^{-2}$ ) et la ténacité  $K_c$  (en  $MPa.m^{1/2}$ ) expriment la résistance du matériau à la propagation d'une fissure. On mesure la ténacité en chargeant une éprouvette dans laquelle on a fait une fissure de longueur  $2c$  et en enregistrant la contrainte  $\sigma_c$  pour laquelle la fissure se propage, et on a les relations suivantes :

$$K_c = Y\sigma_c\sqrt{\pi C}$$

Et pour l'énergie de rupture :

$$G_c = \frac{K_c^2}{E(1 + \nu)}$$

Où  $Y$  est un facteur de correction géométrique proche de l'unité, qui dépend des caractéristiques de l'éprouvette.  $K_c$  et  $G_c$  ont des valeurs bien définies pour les matériaux fragiles. Pour les matériaux ductiles, une zone plastique apparaît en tête de fissure, ce qui crée des conditions nouvelles pour la propagation de celle-ci, qui nécessite une modélisation plus évoluée.



Courbe contrainte-déformation en présence d'une fissure de longueur  $2c$

### ✚ Limite d'endurance

Un chargement cyclique ne fait pas que dissiper de l'énergie, mais peut aussi provoquer la germination et la croissance d'une fissure, menant à une rupture par fatigue. La plupart des matériaux possède une limite d'endurance, qui est l'amplitude de contrainte en deçà de laquelle la rupture ne se produit pas, ou alors seulement après un très grand nombre de cycle ( $> 10^7$ ). Cette notion s'exprime par un nombre sans dimension, le rapport de fatigue  $f$  qui est égal au rapport entre la limite d'endurance et la limite d'élasticité.

## II.3.3 Les propriétés thermique des matériaux

### ✚ Conductivité thermique

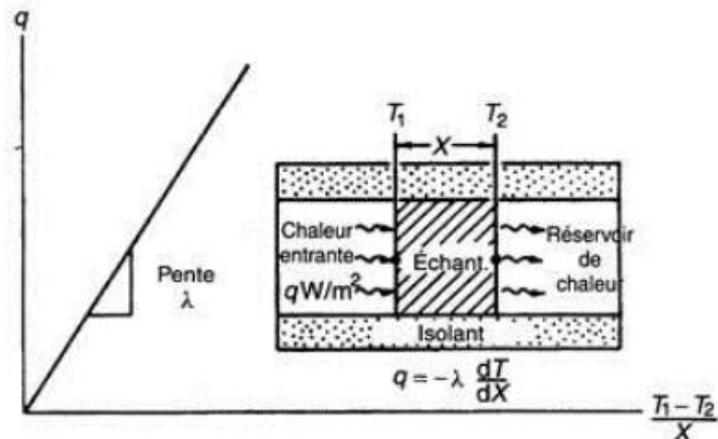
La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant.

Plus la valeur de la conductivité thermique est faible et plus le matériau est **isolant**, plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau est **conducteur**.

Grandeur caractéristique : conductivité thermique  $\lambda$  en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  (watts par mètre-kelvin).

Le flux de chaleur est égal à

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dX} = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{X}$$



Mesure de la conductivité thermique.

### ✚ Températures caractéristiques

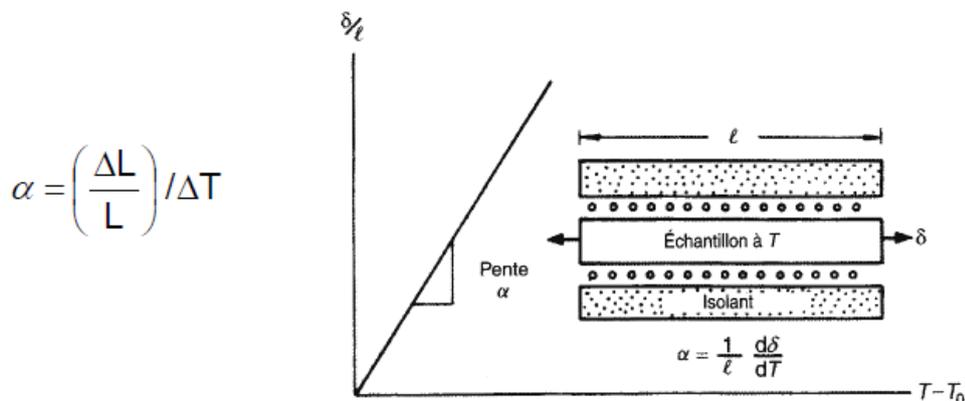
Le point de fusion ou la **température de fusion**  $T_f$  (en K) d'un corps représente la température à une pression donnée, à laquelle un élément pur ou un composé chimique fond c'est-à-dire passe de l'état solide à l'état liquide.

**La température de transition vitreuse**  $T_g$  (en K) est une propriété des matériaux non cristallins qui ne possèdent pas de point de fusion bien défini, et caractérise la transition entre le solide et le liquide visqueux.

Il est utile de définir deux autres températures, **la température de service maximale**  $T_{\text{max}}$  et la **température de ramollissements**  $T_s$  (en K). La première correspond à la température maximale à laquelle un matériau peut être utilisé sans subir d'oxydation, de modifications chimiques ou de fluage excessif. La deuxième est la température à laquelle le matériau peut s'écouler facilement pour permettre sa mise en forme.

### ✚ Coefficient de dilatation

La plupart des matériaux se dilatent quand ils sont chauffés (Figure...). La déformation thermique par degré de température s'exprime par le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  (en  $\text{K}^{-1}$ ). Si le matériau est isotrope thermiquement, la dilatation volumique par degré sera  $3\alpha$ , s'il est anisotrope, il faudra définir d'autres coefficients et la dilatation volumique sera égale à la somme des déformations thermiques principales.



Coefficient de dilatation thermique

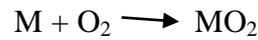
## II.3.4 Usure, oxydation et corrosion

Ces phénomènes sont difficiles à quantifier, en partie parce qu'ils concernent la surface et non le volume, et également parce qu'ils font intervenir deux matériaux et non plus un seul. Lors d'un glissement d'un solide, le volume de matière perdu sur une surface par unité de longueur parcourue s'appelle l'usure volumétrique  $W$ . la

résistance à l'usure de la surface est caractérisée par le coefficient d'usure d'Archard  $k_A$  (en  $m \cdot MN^{-1}$ ) définie par :  $\frac{W}{A} = k_A P$

Où A est l'aire de la surface et P la pression entre les deux corps.

La corrosion sèche correspond à la réaction chimique qui intervient entre la surface d'un solide et un gaz. Typiquement un métal M réagit avec l'oxygène  $O_2$  pour former une couche d'oxyde  $MO_2$  en surface :



Si l'oxyde est protecteur, formant une couche continue sans fissure (épaisseur  $x$ ), la réaction se ralentit avec le temps :

$$x^2 = k_p \left\{ \exp - \left( \frac{Q}{RT} \right) \right\}$$

Tableau II.1 : propriétés des matériaux intervenant en conception et leurs unités SI

Type	Propriété	Symbole	Unité
Général	Coût	$C_m$	\$/kg
	Densité	$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$
Mécanique	Modules d'élasticité (Young, cisaillement, compressibilité)	$E, G, K$	GPa
	Résistance mécanique	$\sigma_f$	MPa
	Énergie de rupture	$G_c$	$kJ \cdot m^{-2}$
	Ténacité	$K_c$	$MPa \cdot m^{1/2}$
	Capacité d'amortissement	$\eta$	-
	Limite d'endurance	$\sigma_e$	MPa
Thermique	Conductivité thermique	$\lambda$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
	Diffusivité thermique	$a$	$m^2 \cdot s^{-1}$
	Chaleur spécifique	$C_p$	$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$
	Température de fusion	$T_f$ ou $T_m$	K
	Température de transition vitreuse	$T_g$	K
	Coefficient de dilatation thermique	$\alpha$	$K^{-1}$
	Résistance au choc thermique	$\Delta T$	K
	Résistance au fluage	-	-
Usure, corrosion	Coefficient d'usure d'Archard	$k_A$	$MPa^{-1}$
	Vitesse de corrosion	$K$	mm/an
	Constante de vitesse parabolique d'oxydation	$k_p$	$m^2 \cdot s^{-1}$