

# Les métaux

## *Cours de C. Fond*

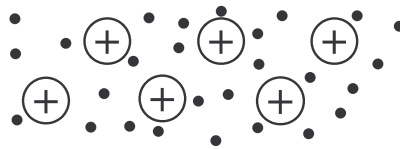
1. Cohésion des métaux .....	2
1.1. La liaison métallique .....	2
1.2. Solides cristallins.....	2
1.2.1. Défauts dans les réseaux cristallins .....	2
2. Propriétés mécaniques des métaux .....	3
2.1. Elasticité .....	3
2.2. Plasticité .....	3
2.3. Limite élastique et critères de plasticité .....	4
2.4. Ecouissage.....	5
2.5. Fluage et relaxation .....	6
2.6. Fatigue .....	7

# Les métaux

## 1. Cohésion des métaux

### 1.1. La liaison métallique

La liaison métallique est une liaison forte. Elle consiste en la mise en commun des électrons de valence. Ils se forment un "nuage électronique" d'électrons délocalisés autour d'un ensemble d'ions. Lorsqu'un atome possède moins de 4 électrons sur la couche extérieure il est dit *électropositif*. C'est le cas des métaux. La liaison métallique crée des structures compactes hautement symétriques. La liberté des électrons favorise la conduction électrique.



*Représentation schématique de la liaison métallique. Les noyaux sont les ions positifs baignant dans un nuage d'électrons.*

### 1.2. Solides cristallins

Lorsque la solidification est suffisamment lente pour permettre une organisation spatiale des atomes ou molécules qui minimise l'énergie potentielle de conformation, un ordre à grande distance est possible et il se forme un solide cristallin. Cette "compaction" entraîne une masse volumique plus élevée que le même matériau à l'état amorphe, i. e. pas d'organisation à grande distance. En *cristallographie*, on cherche à définir le motif de base qui se répète. C'est notamment le cas des métaux dont les structures cristallines classiques sont cubique à faces centrées (12 voisins), hexagonale compacte (12 voisins), cubique centrée (8 voisins). Les cristaux qui se forment croissent à partir de germes de cristallisation. Les joints de grains cristallins sont d'autant plus nombreux que ces germes ont été nombreux.

#### 1.2.1. Défauts dans les réseaux cristallins

Pour comprendre, voire maîtriser, les propriétés mécaniques des matériaux, il faut considérer toutes les échelles pertinentes depuis celle des atomes jusqu'à celle du produit manufacturé. Par exemple, dans le cas des métaux, il faut particulièrement considérer l'échelle des dislocations et celle des grains pour comprendre les mécanismes de déformation.

Type	Nature	Ordre de grandeur typique pour les métaux à 20°C
Lacunes	Défaut ponctuel	Concentration = $10^{-15}$
Défauts intersticiels	Défaut ponctuel	Concentration = $10^{-30}$
Atomes étrangers	Défaut ponctuel	Concentration = $10^{-30}$
précipités	"Défaut" ponctuel	5 nm à 0.1 $\mu\text{m}$
Dislocations (vis, coin, mixte)	Défaut linéaire	$10^6$ à $10^{12}$ cm/cm <sup>3</sup>
Mâcles	Défaut surfacique	Variable selon la taille des grains (1 $\mu\text{m}$ à 1 cm)
Joints de grains	Défaut surfacique	Variable selon la taille des grains (1 $\mu\text{m}$ à 1 cm)

*Défauts cristallins dans les métaux.*

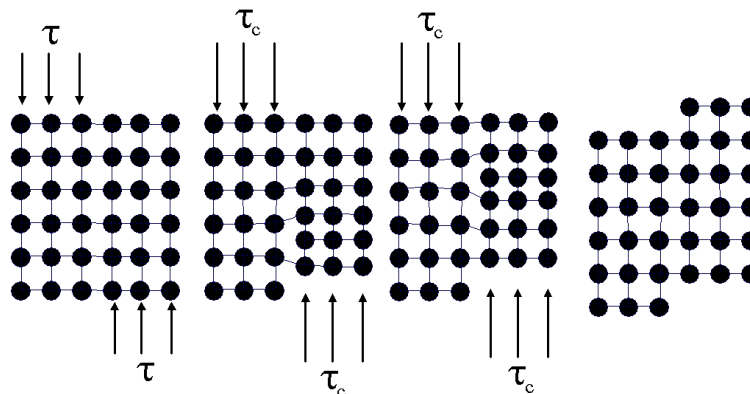
## 2. Propriétés mécaniques des métaux

### 2.1. Élasticité

Lorsque l'orientation des grains (cristaux) est aléatoire, l'élasticité est isotrope. Elle est linéaire et peu dépendante de la température et de la vitesse de sollicitation lorsque le métal est sollicité à des températures ambiantes bien inférieures à sa température de fusion. Ses caractéristiques élastiques sont étroitement liées aux distances inter atomiques et aux potentiels d'attraction-répulsion. Pour l'élasticité et encore bien plus pour la plasticité, il faut distinguer les caractéristiques locales (1 grain) qui diffèrent de celles d'une grande population de grains. Le coefficient de Poisson,  $\nu$ , vaut environ 0.33.

### 2.2. Plasticité

Les mêmes remarques que pour l'élasticité sont valables. En revanche, contrairement aux caractéristiques élastiques, les caractéristiques de la plasticité sont sensibles à la microstructure du métal. Les déformations plastiques ("permanentes", "résiduelles") impliquent uniquement des distorsions<sup>1</sup>, c'est à dire qu'elles conservent le volume ou la densité du métal. Les allongements à rupture sont de l'ordre de quelques % à quelques dizaines de %.



*Schéma de principe montrant le déplacement d'une dislocation coin dans un cristal. Une dislocation préexistante traverse une région du cristal pour laisser une déformation plastique résiduelle (déformation permanente).*

Un métal est un agrégat de grains cristallins. Bien que ces grains aient des propriétés mécaniques anisotropes, un grand nombre de grains présente généralement des propriétés mécaniques isotropes. Ceci est dû à la répartition généralement aléatoire des directions cristallographiques. Lorsqu'un métal est soumis à une sollicitation mécanique, à l'échelle microscopique, chaque grain subit une sollicitation mécanique qui peut être différente de la sollicitation moyenne appliquée à l'échelle macroscopique. Un grain est capable de se déformer plastiquement sous l'effet d'un cisaillement. Cette déformation plastique correspond à des glissements entre plans d'atomes, dans différents plans du cristal<sup>2</sup>. Pour un métal qui n'a encore subi aucune déformation plastique, la sortie du domaine élastique se fait donc progressivement jusqu'à ce que tous les grains participent à la déformation plastique. La limite élastique correspond donc au mouvement des dislocations et non à la contrainte bien plus élevée qui correspondrait à des déplacements relatifs de blocs rigides. Cependant la contrainte macroscopique – moyenne – appliquée évolue peu au cours de cette mise en déformation plastique de tous les grains.

<sup>1</sup> La déformation plastique générée par une contrainte de cisaillement s'appelle distorsion.

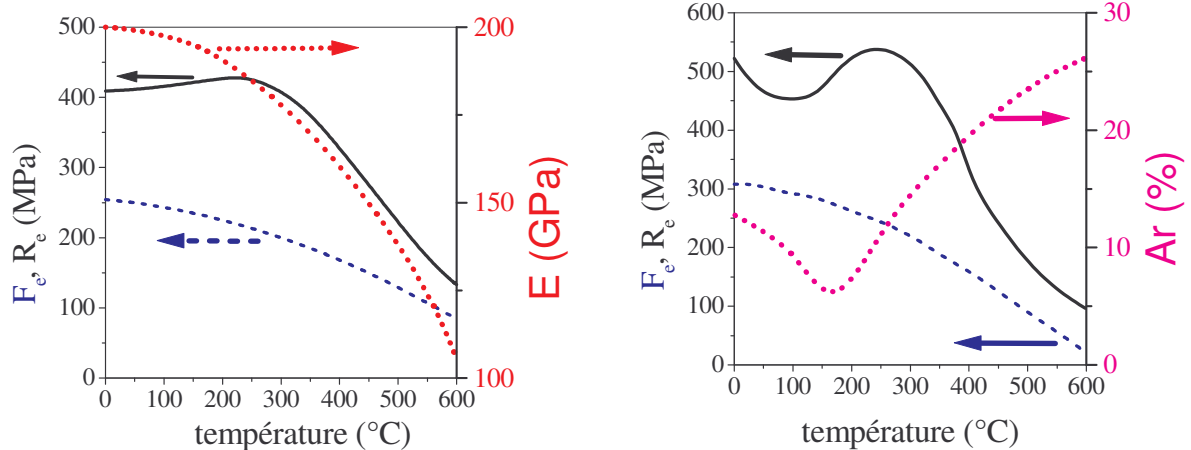
<sup>2</sup> Ceci justifie que la déformation plastique des métaux s'effectue à volume constant.

Métal	Module d'Young macroscopique (GPa)	Coef. de Poisson	Densité (kg / m <sup>3</sup> )	Coef. De dilatation linéaire (°C <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Température de fusion (°C)
Al	68	0.33	2700	2.5 10 <sup>-5</sup>	210	660
Ag	76	0.38	10500	1.96 10 <sup>-5</sup>	420	962
Cu	110	0.34	8960	1.65 10 <sup>-5</sup>	385	1083
Fe	200	0.29	7870	1.2 10 <sup>-5</sup>	76	1535
Mg	44	0.35	1740	2.6 10 <sup>-5</sup>	160	649
Ni	210	0.31	8880	1.3 10 <sup>-5</sup>	61	1455
Ti	116	0.34	4500	0.9 10 <sup>-5</sup>	17	1660
Zn	90	0.25	7100	3.1 10 <sup>-5</sup>	110	420
Pb	14	0.42	11340	2.9 10 <sup>-5</sup>	33	327
Sn	42	0.33	5765	2.4 10 <sup>-5</sup>	63	232

*Quelques caractéristiques physiques de métaux purs à 20°C.*

Métaux et alliages	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à rupture (%)
Aluminium pur	20 (recuit) à 100 (écroui)	45 à 120	50 à 7
Al-7075 recuit	100	225	16
Al-7075 trempé	500	570	11
Fer pur recuit	120	250	38
Acier au carbone	430 à 1800	800 à 2800	14 à 1.6

*Caractéristiques mécaniques de métaux purs et alliages à 20°C.*



*Variations des caractéristiques de deux aciers de type acier doux avec la température.*

### **2.3. Limite élastique et critères de plasticité**

La limite élastique est souvent mesurée en traction uniaxiale. Ceci correspond, par exemple, au cas particulier de l'état de contrainte dans une poutre fléchie en absence d'effort tranchant significatif. Dans le cas général, il faut considérer que le métal est dans un état de contrainte triaxial et être capable de définir la limite élastique. Pour les métaux, les critères de

plasticité sont indépendants de la pression hydrostatique, i.e. seuls les cisaillements interviennent dans le critère<sup>3</sup>. Les critères les plus classiquement utilisés sont celui de Tresca, associé à la plus grande contrainte de cisaillement, et celui de von Mises, associé à l'énergie de cisaillement. Dans le repère principal des contraintes ces critères s'expriment :

$$\text{Critère de Tresca : } (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 < f_e \Leftrightarrow \text{élasticité}$$

$$\text{Critère de von Mises : } \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \}} < f_e \Leftrightarrow \text{élasticité}$$

où  $f_e$  désigne la limite élastique en traction et  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  désignent les contraintes dans le repère principal.

**Exemple.** Considérons une poutre fléchie par un moment fléchissant  $M_z$  et soumise à un effort tranchant  $T_y$  et à un effort normal  $N_x$ . En utilisant les notations usuelles du cours de résistance des matériaux, si la théorie des poutres s'applique, on peut écrire que :

$$\sigma = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{M_z(x) y}{I_{Gz}}$$

et que :

$$\tau = \frac{T_y(x) S(y)}{b I_{Gz}}$$

à une altitude  $y$  dans la poutre à une abscisse  $x$ . On calcule ensuite les contraintes principales qui valent  $\sigma_1 = 1/2 \{ \sigma + \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \}$ ,  $\sigma_2 = 0$  et  $\sigma_3 = 1/2 \{ \sigma - \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \}$  dans ce cas particulier où les contraintes autres que  $\sigma$  et  $\tau$  sont nulles. Enfin, on calcule la combinaison de ces contraintes qui correspond au critère convenable pour le métal utilisé (von Mises le plus souvent pour les aciers) que l'on compare à la donnée matériau  $f_e$ , mesurée en laboratoire. Cet exemple permet de comprendre les règles de calcul aux ELU (couplages entre  $M_{ELU}$ ,  $T_{ELU}$  et  $N_{ELU}$ ) en construction métallique.

## 2.4. Ecrouissage

On appelle *durcissement des métaux ou écrouissage* l'augmentation de la contrainte d'écoulement plastique, i.e. de la limite élastique,  $\sigma_y$ , avec la déformation plastique. Son origine est essentiellement liée au mouvement des dislocations au sein des grains métalliques. Les dislocations sont des défauts d'empilement dans la structure cristalline. Le mouvement de ces défauts permet de "faire glisser" progressivement un plan cristallin sur un autre et ainsi le métal peut accommoder la déformation qui lui est imposée (avant rupture bien sûr). Citons quelques propriétés des dislocations :

- les dislocations ne peuvent pas traverser les joints de grains,
- les dislocations se repoussent - des forces thermodynamiques tendent à les éloigner au maximum pour minimiser l'énergie potentielle de la structure cristalline,
- lorsqu'une dislocation croise un obstacle tel qu'une autre dislocation<sup>4</sup> (dans d'autres plans de glissement) ou un gros précipité<sup>5</sup> elle se dédouble<sup>6</sup>.

En conséquence, au cours de la déformation plastique, l'empilement des dislocations aux joints de grains ainsi que leur multiplication rend les glissements de plus en plus difficiles. La contrainte doit donc augmenter pour que la déformation plastique puisse se

<sup>3</sup> Cette quasi-insensibilité à la pression hydrostatique n'est généralement pas le cas des sols ou des polymères dont les critères sont dits piézo-dépendants.

<sup>4</sup> Les dislocations progressent dans plusieurs plans de glissement distincts au sein d'un même cristal.

<sup>5</sup> Elle peut cisailer les petits précipités.

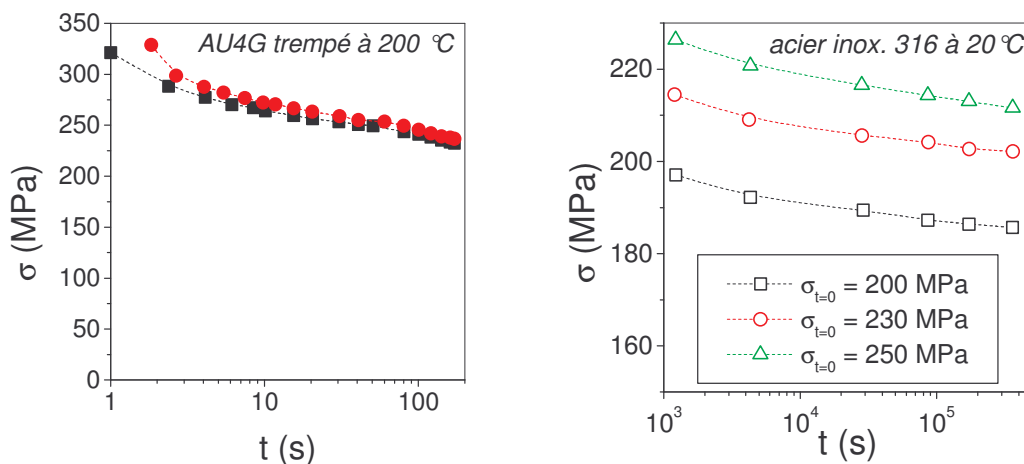
<sup>6</sup> Mot clef pour approfondir : "source de Frank et Read".

poursuivre. Réciproquement, si la déformation plastique est imposée, le métal oppose de plus en plus de résistance.

## 2.5. Fluage et relaxation

Fluage et relaxation ont la même origine physique et ne se différencient que par les conditions aux limites lors des tests de laboratoire. Il s'agit de mesurer une déformation permanente fonction du temps pour une contrainte inférieure à la limite élastique<sup>7</sup>. Dans le cas du fluage on maintient une contrainte constante tandis que dans le cas de la relaxation on maintient une déformation constante. Les déformations de fluage sont possibles dans les métaux à basses températures, typiquement pour  $T < 0.5 T_f$ , par réarrangements atomiques. Ceux-ci sont favorisés par la présence de lacunes. A plus hautes températures, des mouvements de dislocations contribuent fortement au fluage. Le fluage/relaxation est un mécanisme thermiquement activé.

*Espace pour reproduire les schémas de principe des essais de fluage et relaxation*

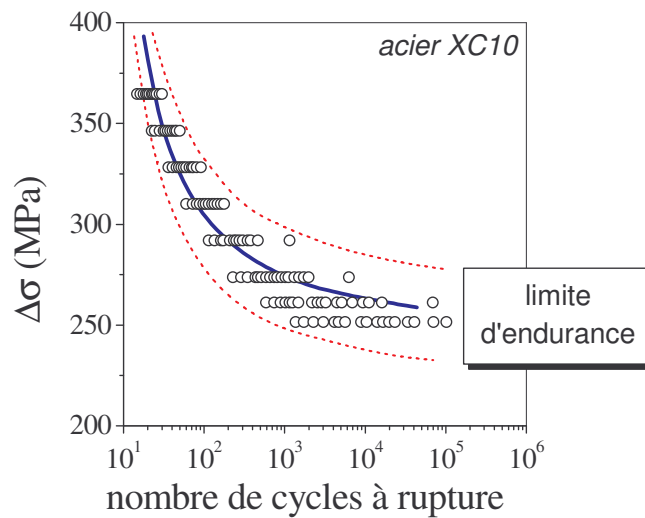


*Exemples de résultats d'essais de relaxation sur métaux.*

<sup>7</sup> Au delà de la limite élastique on parlera de viscoplasticité.

## 2.6. Fatigue

On désigne par fatigue l'endommagement des matériaux sous sollicitations mécaniques cycliques, alternées ou simplement variables. En laboratoire, on caractérise les matériaux à la fatigue presque toujours avec des sollicitations cycliques<sup>8</sup>. Lorsque le matériau est sollicité au-delà de sa limite élastique, le nombre de cycles à rupture est faible et l'on parle de fatigue oligocyclique. Certains matériaux admettent une limite d'endurance, c'est à dire qu'il existe une sollicitation en dessous de laquelle la rupture n'est jamais observée. La rupture, lorsqu'elle intervient, s'amorce sur des défauts intrinsèques (microfissure, crique...) ou extrinsèques (rayure, poinçonnement...) qui croissent jusqu'à la ruine de la structure. On représente souvent la tenue en fatigue à l'aide de courbe de Wöhler.



*Courbe de Wöhler illustrant des résultats d'essais de fatigue.*

<sup>8</sup> On remarque que, la plupart du temps, comme dans le cas des séismes par exemple, ce ne sont pas les données matériaux qui manquent mais le spectre de la sollicitation qui est méconnu.