

- 1.8. Modèles de propagation des fissures de fatigue
- 1.9. Modèle de propagation basé sur l'évolution de (ΔK)
- 2. Application sur les biomatériaux pour une prothèse totale de hanche
 - 2.1. Approche mécanique des essais
 - 2.2. Analyse biomécanique de l'articulation de la hanche

Chapitre III : Fatigue fissuration & fatigue endurance

- 1. Introduction
- 2. Propagation des fissures de fatigue
 - 2.1. Essais de fissuration
 - 2.2. Mode de fissuration
 - 2.3. Facteur d'intensité de contrainte
 - 2.4. Lois de propagation expérimentales
 - 2.5. Durée de vie d'une structure
 - 2.6. Approche en durée de vie
 - 2.7. Approche en tolérance aux dommages (1970)
 - 2.8. Endommagement en pointe de fissure
 - 2.9. Mécanisme de propagation
 - 2.10. Influence de l'environnement
 - 2.11. Importance des caractéristiques métallurgiques
 - 2.12. Lois de propagation théoriques
- 3. Durée de vie en fatigue - Endurance
 - 3.1. Chargement standard
 - 3.2. Diagramme d'endurance (de Wöhler, S-N)
 - 3.3. Rapport d'endurance
 - 3.4. Aspect statistique
 - 3.5. Loi de Wöhler
 - 3.6. Données nécessaires pour l'analyse

Chapitre IV : Généralités sur les biomatériaux

- 1. Introduction
- 2. Les champs d'application des biomatériaux
- 3. Classes des biomatériaux
 - 2. Biomatériaux utilisés en orthopédie
 - 3. Les substituts osseux
- 4. Applications des alliages à mémoire de forme
- 4. Propriétés mécaniques et structurales des biomatériaux
- 5. Propriétés physico-chimiques des biomatériaux

Chapitre V : Désignation normalisée des matériaux

- 1. Familles de matériaux
- 2. Critères de choix d'un matériau
- 3. Symboles métallurgiques
- 4. Désignation normalisée des matériaux
- 5. Classification des matériaux
- 6. Les céramiques

7. Les composites
8. Les plastiques

Chapitre VI : Modification des propriétés mécaniques

1. La dégradation et la protection
 - 1.1. Types de réactions chimiques
 - 1.2. Les métaux
 - 1.3. Les alliages
2. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone
3. Les traitements thermiques
 - 3.1. La trempe
 - 3.2. Le revenu
 - 3.3. Le recuit
4. Modification de la composition des aciers
5. Éléments d'alliage et impuretés
6. Propriétés mécaniques
7. Propriétés thermiques
8. Propriétés électriques
9. Propriétés magnétiques

Chapitre : 1

Méthodes de caractérisation des matériaux

Sommaire

1. Contraintes et déformations
2. Traction simple
3. Compression simple
4. Flexion-cisaillement
5. Torsion simple
6. Dureté
7. Essai de résilience

1. Contraintes et déformations

Quand un corps est soumis à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent, par réaction, à l'intérieur de ce corps. Aux contraintes sont associés des déformations. Tant que le comportement du corps se situe dans le domaine élastique, les relations existant entre les contraintes et les déformations sont définies par le domaine élastique, les relations existant entre les contraintes et les déformations sont définies par la théorie de l'élasticité linéaire des milieux continus. Les deux principes hypothèses de cette théorie sont :

- a) que les propriétés du corps sont homogènes et ne varient pas d'un point à l'autre ;
- b) qu'elles sont les mêmes dans toutes les directions.

Cette seconde hypothèse implique que le milieu est isotrope. Dans le domaine élastique, les déformations sont entièrement réversibles : quand les forces sont appliquées sur le corps, celui-ci change de forme, mais retrouve sa forme initiale quand les forces extérieures sont retirées.

1.1. Contraintes

Contrainte de tension $\sigma = \frac{dF}{dS}$

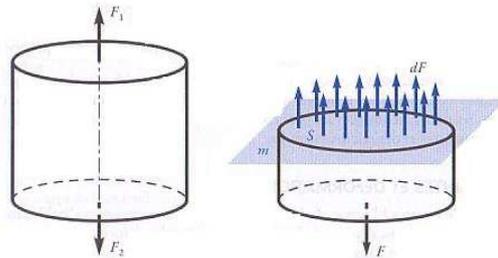
en traction simple $\sigma = \frac{F}{S}$

avec :

σ : Contrainte normale [MPa]

F : effort normale [N]

S : aire de la section droite [mm²]



Dans le système international :

1 Pascal = 1 Newton / 1 m²

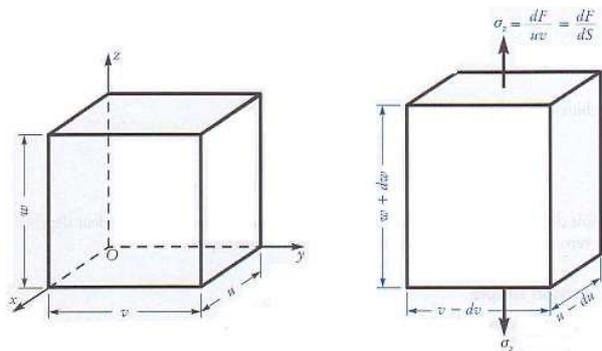
1 MPa = 10⁶ Pa

1.2. Déformations

Dimensions	u	v	w
Allongement	du	dv	dw
Déformation	$\epsilon_x = \frac{du}{u}$	$\epsilon_y = \frac{dv}{v}$	$\epsilon_z = \frac{dw}{w}$

Coefficient de poisson :

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$$



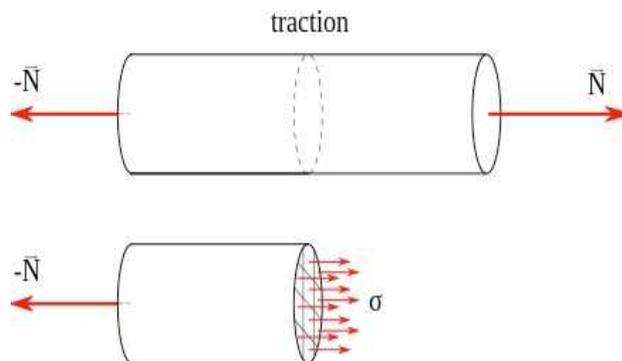
2. Essais Mécaniques

L'ingénieur a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Elles sont tout d'abord indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme et de modélisation des pièces mécanique. L'augmentation de la dimension des demi-produits, les exigences accrues de qualité de précision, les économies d'énergie à réaliser concourent à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations. Il est évident qu'ils ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux faisant intervenir la vitesse de sollicitation, ainsi que les interactions entre les propriétés mécaniques et les évolutions de la structure microscopique.

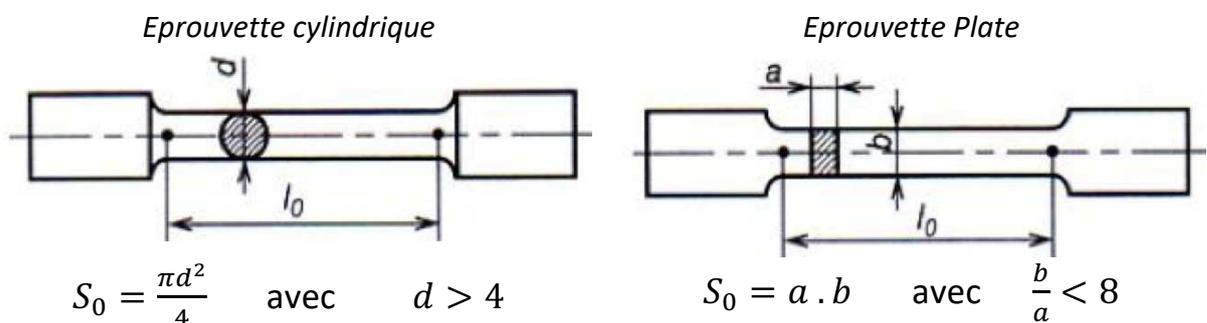
Les essais mécaniques sont des tests qui permettent de mesurer certaines propriété du matériau tel que : dureté, contrainte avant rupture, limite élastique, déformation, taux de compression...

2.1. Traction simple

2.1.1. Définition : Un corps est sollicité à la traction simple lorsqu'il est soumis à deux forces directement opposées qui tendent à l'allonger.



Hypothèses : Solide idéal, matériau homogène isotrope, poutre rectiligne de section constante (Figure 1).

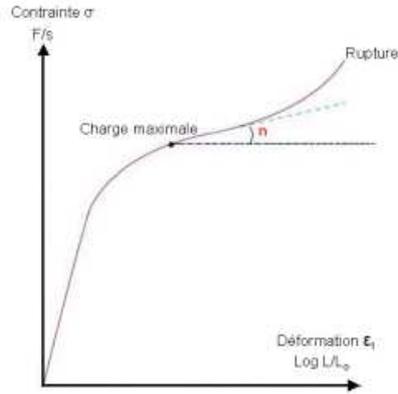


Une partie calibrée de longueur l_0 (mm) et de section S_0 (mm²) est définie entre deux têtes d'amarrage.

$$l_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

Figure 1 : Eprouvette pour essai de traction

2.2.2. Etude des déformations



n est la pente de la droite (déformation plastique).

Figure 2 : Courbe rationnelle de traction

La courbe de traction «rationnelle» donne la contrainte réelle (force/section de l'éprouvette), en fonction de la déformation dans le sens de l'éprouvette. Pendant l'essai de traction, l'éprouvette s'allonge et sa section diminue.

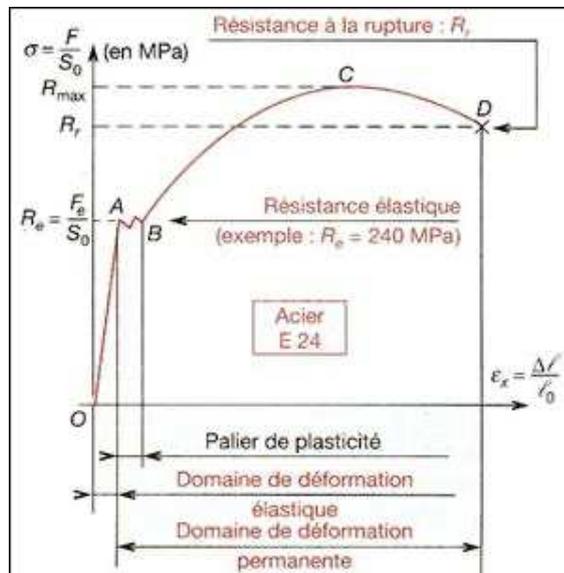


Figure 3 : Courbe conventionnelle de traction (contraintes-déformations)

Nous limitons notre étude de la traction à la zone OA : zone des déformations élastiques.

O-A : domaine des déformations élastiques

A-B : palier de ductilité (palier de Piobert Lüders)

A-B-C-D : domaine des déformations plastiques (déformations permanentes)

C-D : domaine où se produit la striction

D : point de rupture

2.2.3. Limite d'élasticité conventionnelle $R_{e0,2}$

Approximation empirique de la limite d'élasticité. Elle désigne la contrainte qui correspond au point d'intersection de la courbe de contrainte-déformation et d'une parallèle à la portion rectiligne de cette courbe. Le terme « conventionnel » (« offset » en anglais) se rapporte à la distance de décalage entre l'origine de la courbe de contrainte-déformation et le point d'intersection de la parallèle avec l'axe des contraintes. Ce décalage est exprimé en termes de pourcentage de déformation (souvent 0,2%)

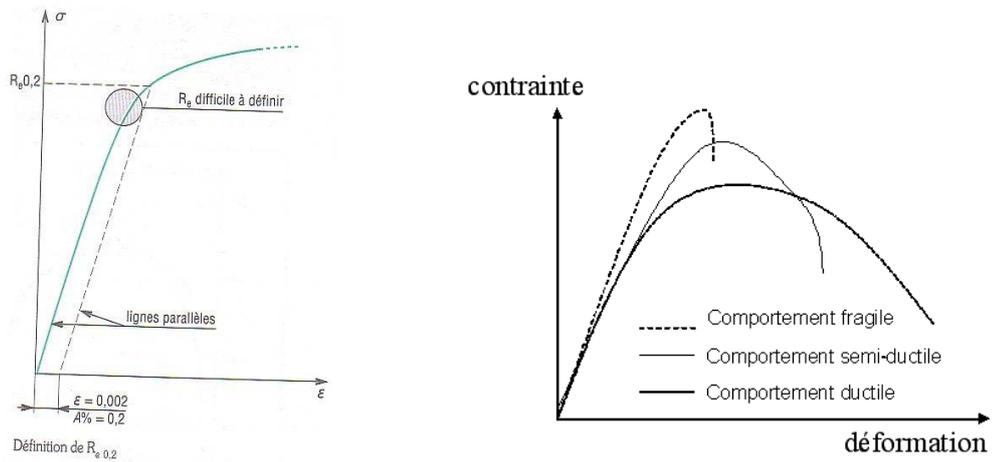


Figure 4 : Courbe conventionnelle de traction

2.2.4. Déformation dans le domaine élastique d'une poutre

$$\sigma = E \cdot \epsilon_x = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

Nous constatons que la déformation ϵ_x est proportionnel à la contrainte σ .
 E : module d'élasticité longitudinale ou module d'Young.

2.2.5. Déformation transversale

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu \epsilon_x$$

ν : Coefficient de poisson selon les matériaux $0,1 \leq \nu \leq 0,5$ (pour l'acier $\nu = 0,3$)
 ϵ_y : contrainte selon (o, \bar{y}).

2.2.6. Condition de résistance

$$|\sigma|_{Max} \leq \sigma_{pe} \quad \text{ou} \quad \frac{|F|}{S} \leq \sigma_{pe} \quad \text{ou} \quad \sigma_{pe} = \frac{\sigma_e}{s}$$

σ_{pe} : résistance pratique à la traction ; s : coefficient de sécurité.

2.2.7. Condition de déformation

$$|\Delta l| \leq \Delta l_{lim} \quad \text{ou} \quad \frac{|F|l_0}{E.S} \leq \Delta l_{lim}$$

Δl_{lim} : limite d'allongement.

2.2.8. Striction

On définit

- le coefficient de striction : $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100$

- l'allongement de striction : $Z_u = \frac{S_0 - S_u}{S_u} * 100$

Où S_u est la section minimale de l'éprouvette après rupture.

2.2.9. Coefficient de concentration de contrainte de traction

$$|\sigma|_{Max} = k_t |\sigma|_{nom} \quad 1 < k_t < 3$$

k_t : est fonction de la forme de la pièce pour un filetage iso ($k_t = 2,5$)

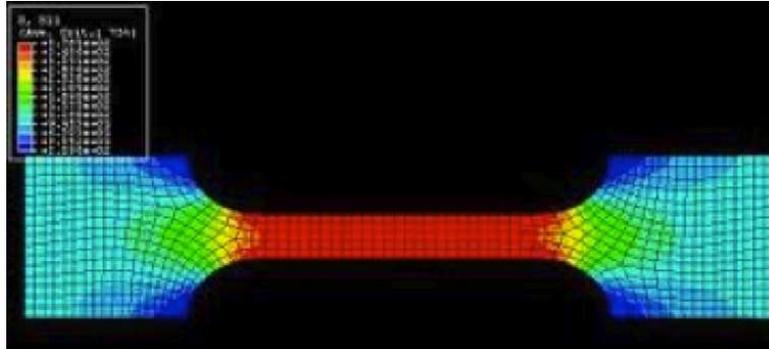


Figure 5 : Modélisation des contraintes sur une éprouvette sollicitée en traction simple

Plan de cisson maximal pour la traction simple

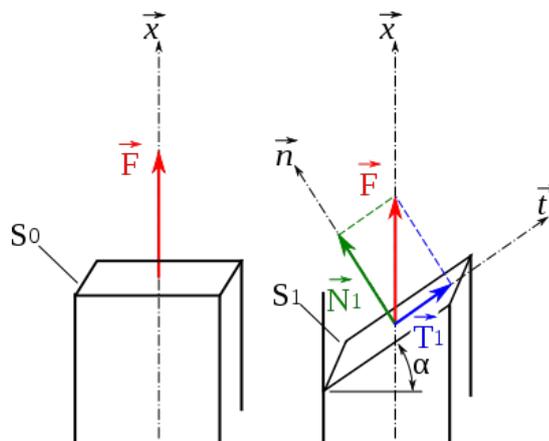


Figure 6 : Plan pour lequel la cession est la plus grande ($\alpha = 45^\circ$).

2.3. Compression simple

Définition : Une poutre est sollicitée à la compression simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées à deux forces directement opposées et qui tendent à la raccourcir.

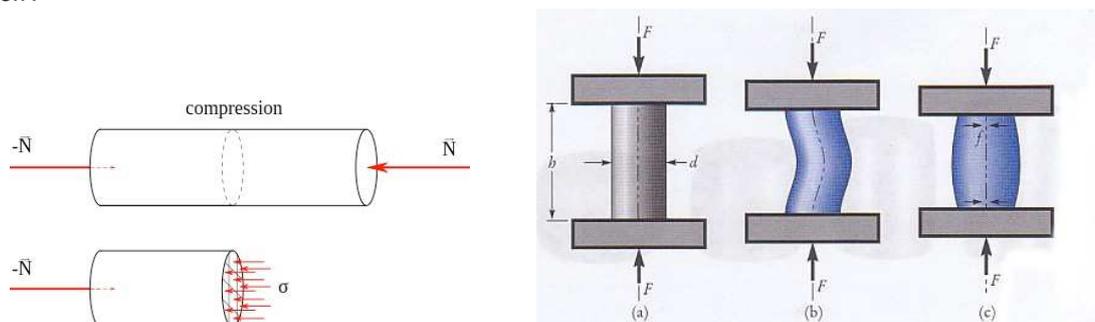


Figure 7 : Essai de compression

2.4. Flexion-cisaillement

2.4.1. Définition

- a) Les poutres doivent posséder un *plan de symétrie* géométrique également appelé **plan moyen**.
- b) La poutre doit être chargée dans le plan de symétrie géométrique.
- c) Une portion de poutre est sollicitée en flexion simple suivant \vec{z} si, pour chacune de ses sections droites, le torseur des efforts de cohésion se réduit à :

$$\{T_{S^+ \rightarrow S^-}\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & M_{fz} \end{array} \right\}_G$$

Nota : Si l'effort tranchant est nul, on dit que la sollicitation est appelée **flexion pure**.

- d) La relation qui lie l'effort tranchant au moment fléchissant se traduit :

$$\frac{dM_{fz}}{dx} = -T_y$$

Dans la plupart des cas, le moment fléchissant s'accompagne d'un effort tranchant (T_y avec M_{fz} , T_z avec M_{fy}). Cela génère de la cission (τ_{xy} pour T_y et τ_{xz} pour T_z). Cette contrainte de cisaillement ne génère que peu de risque de rupture et est donc généralement négligée (modèle de Bernoulli).

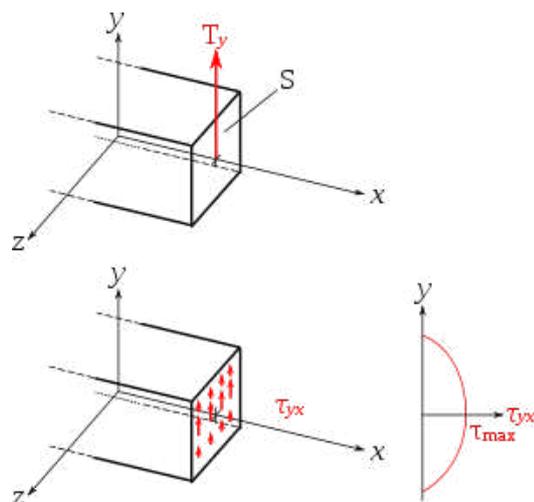


Figure 7 : Effort tranchant sur une poutre en flexion

On note que la cission est maximale là où la contrainte normale est nulle (à la fibre neutre), et que la contrainte normale est maximale là où la cission est nulle (sur les faces externes). On n'a donc pas de synergie entre les deux contraintes.

2.4.2. Etude des contraintes normales

2.4.2.1. Répartition des contraintes

Après une analyse au niveau des fibres (*segment de matière joignant deux points homologues des sections droites*), en respectant l'hypothèse de Navier-Bernoulli, il semble important de remarquer ceci :

- La contrainte normale est nulle sur les fibres neutres ($Y=0$).
- Le signe s'inverse à la traversée du plan (G, \vec{x}, \vec{z}) .
- La répartition est linéaire sur la section droite.
- le point de la section le plus sollicité est celui qui est le plus éloigné des fibres neutres.

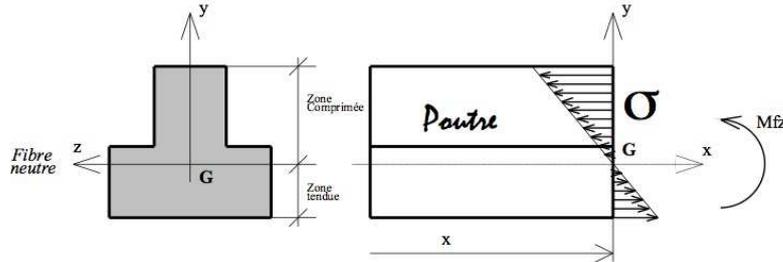


Figure 8 : Répartition des contraintes sur une poutre.

2.4.2.2. Relation entre contrainte normale et moment fléchissant

a) La relation à retenir, liant la contrainte σ , au moment fléchissant du torseur de cohésion.

$$\sigma_M = - \frac{M_{fz} \cdot Y_{(M)}}{\int_{\Sigma} Y^2 \cdot d\Sigma}$$

σ_M : Contrainte normale en un point M de la section droite (MPa).

Y : Ordonnée du point M dans le repère local (mm).

M_{fz} : Moment fléchissant (Nmm).

La somme $\int_{\Sigma} Y^2 d\Sigma$ dépend uniquement de la **section** droite. Nous l'appelons **Moment quadratique** de la section Σ par rapport à l'axe Gz et nous le notons I_{Gz} (mm^4).

$$I_{Gz} = \int_{\Sigma} Y^2 d\Sigma$$

b) Une caractéristique courante des profils permet un calcul rapide de la contrainte maximale dans une section droite à partir du moment fléchissant :

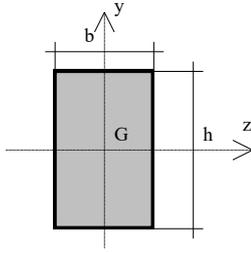
$$\sigma_{\max} = - \frac{M_{fz}}{\left[\frac{I_{Gz}}{Y_{\max}} \right]}$$

On appelle **module de flexion**, la quantité : $\frac{I_{Gz}}{Y_{\max}}$ (fourni par les constructeurs).

Moments quadratique

Ce paragraphe vise juste à donner une petite bibliothèque de moments quadratiques les plus fréquemment rencontrés ainsi qu'une relation de transport.

- Un parallépipède.



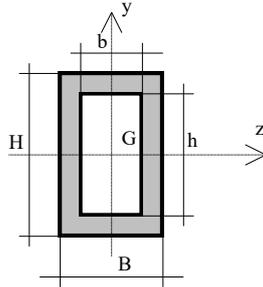
Les relations sont :

$$I_{Gz} = \frac{bh^3}{12}$$

$$I_{Gy} = \frac{hb^3}{12}$$

$$I_G = I_{Gz} + I_{Gy} = \frac{bh}{12}(h^2 + b^2)$$

- Un parallépipède creux.



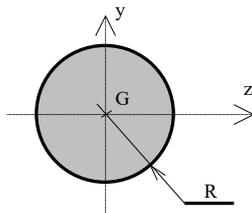
Les relations sont :

$$I_{Gz} = \frac{HB^3 - bh^3}{12}$$

$$I_{Gy} = \frac{HB^3 - hb^3}{12}$$

$$I_G = I_{Gz} + I_{Gy}$$

- Un cylindre.

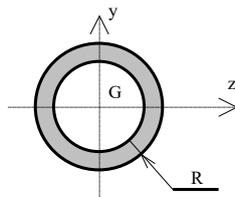


Les relations sont :

$$I_{Gy} = I_{Gz} = \frac{\pi R^4}{4} = \frac{\pi D^4}{64}$$

$$I_G = I_{Gz} + I_{Gy}$$

- Un cylindre creux.



Les relations sont :

$$I_{Gy} = I_{Gz} = \frac{\pi.(R^4 - r^4)}{4} = \frac{\pi.(D^4 - d^4)}{64}$$

$$I_G = I_{Gz} + I_{Gy}$$

- Théorème de Huyghens

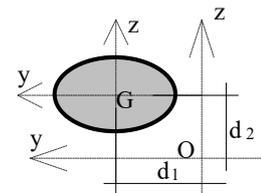
Le moment quadratique d'une surface plane **S** par rapport à un axe Oz , appartenant à son plan est égal à la somme :

- du moment quadratique de cette surface par rapport à l'axe Gz passant par le centre de gravité de la surface et parallèle à Oz .

- du produit de l'aire de la surface **S** par le carré de la distance entre les deux axes.

$$I_{Oy} = I_{Gy} + Sd_2^2$$

$$I_{Oz} = I_{Gz} + Sd_1^2$$

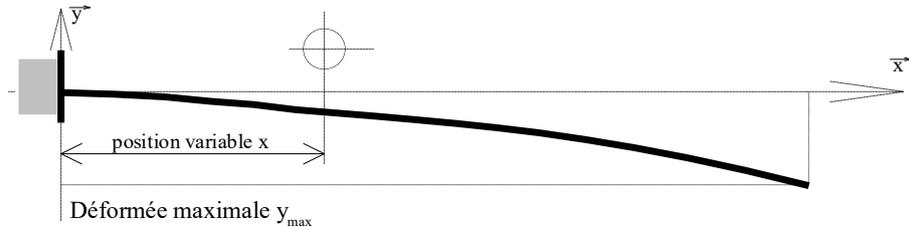


2.4.3. Etude de la déformation

Le dimensionnement de la plupart des poutres sollicitées en flexion simple se fait en exprimant des conditions limites de déformation. En effet, une poutre peut résister à des sollicitations de flexion mais se déformer dans des proportions inacceptables.

Equation différentielle de la ligne déformée (*Flèche maximale*).

Soit une poutre AB sollicitée en flexion simple et (A, x, y) un repère d'étude, global, qui ne se déplace lorsque la poutre se déforme.



Il est possible d'exprimer la dérivée seconde de la déformée par cette relation :

$$y'' = \frac{M_{fz}(x)}{EI_{Gz}}$$

- y'' : Dérivée seconde de la déformée y (y est le déplacement de la poutre, au point x considéré, suivant l'axe y).
- M_{fz} : Moment fléchissant à la position variable x .
- I_{Gz} : Moment quadratique de la section en G .
- E : Module de Young.

A partir de cette relation, il faut réaliser deux intégrations successives qui font apparaître deux constantes inconnues. Ces inconnues seront levées à partir de conditions aux limites préalablement déterminées.

2.4.4. Etude des contraintes tangentielles.

L'état de flexion se traduit par l'association d'un moment fléchissant et d'un effort tranchant (M_{fz} et T_y dans notre étude). Le moment fléchissant engendre des contraintes normales dans les sections droites de la poutre. L'effort tranchant T_y induit des contraintes tangentielles qui ont pour direction l'axe Y .

Nous donnerons dans ce paragraphe une image élémentaire de la distribution des contraintes tangentielles.

Ces résultats issus d'une étude sommaire devront être corrigés par un coefficient qui dépend de la forme de la section droite.

Envisageons une coupure au niveau d'une section droite S , T_y est l'effort tranchant.

Hypothèse sur la contrainte tangentielle moyenne :

- elle a même direction que l'effort tranchant.
- sa répartition est uniforme sur la surface S . Elle est notée $\tau_{Y_{moy}}$.

Relation liant l'effort tranchant à la contrainte tangentielle.

$$\tau_{Y_{moy}} = \frac{T_y}{S}$$

- T_y : Effort tranchant (N).
- S : Aire de la section droite (mm^2)
- $\tau_{Y_{moy}}$: Contrainte tangentielle moyenne (MPa)

2.5. Résistance des poutres sollicitées à la flexion

2.5.1. Conditions de résistance aux contraintes normales (*traction et compression*)

$$K \cdot \sigma_{\max} \leq R_{pe} \text{ avec } R_{pe} = \frac{R_e}{s}$$

- R_{pe} : Contrainte pratique de limite élastique (MPa).
- R_e : Contrainte de limite élastique du matériau (MPa).
- s : Coefficient de sécurité ($s > 1$)
- σ_{\max} : Contrainte maximale dans la poutre (sans tenir compte des singularités de formes).
- K : Coefficient de concentration de contrainte.

L'expression de la contrainte normale maximale dans la poutre a déjà été déterminée :

$$\sigma = - \frac{M_{fz} \cdot y}{I_{Gz}}$$

Pour les poutres de sections constantes, seuls M_{fz} et y constituent les variables. Il suffit donc de rechercher la section la plus sollicitée par le moment fléchissant et de définir la distance maximale y séparant le point G d'un point M extrême.

2.5.2. Conditions de résistance aux contraintes tangentielles (*cisaillement*)

Par analogie avec ce qui précède, la contrainte tangentielle maximale en service ne doit pas dépasser une contrainte limite élastique au glissement R_g . Cette dernière s'exprime assez simplement en fonction de la résistance à l'extension R_e .

$$\tau_{Y_{\max}} \leq R_{pg} \text{ avec } R_{pg} = \frac{R_g}{s}$$

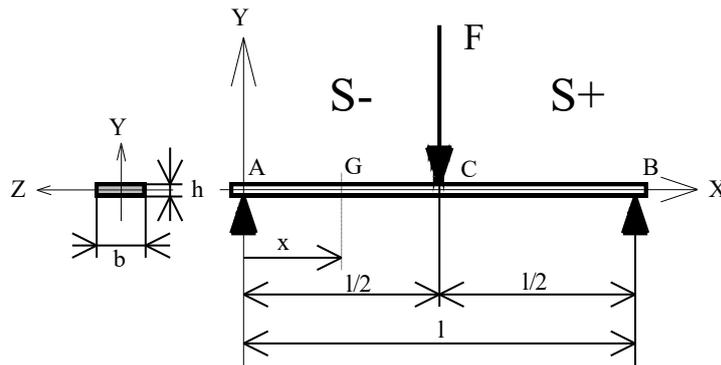
- R_{pg} : Contrainte pratique de limite élastique au glissement (MPa).
- R_g : Contrainte de limite élastique du matériau au glissement (MPa).
- s : Coefficient de sécurité ($s > 1$)
- $\tau_{Y_{\max}}$: Contrainte maximale de cisaillement dans la poutre.

La contrainte limite au glissement R_g s'exprime en fonction de la contrainte limite à l'extension R_e :

- Matériaux ductiles : $R_g \approx 0,5R_e$ (Aciers doux : A34, E24, E26, A40, XC18,).
- Matériaux peu ductiles : $R_g \approx 0,6R_e$ à $0,7R_e$ (Aciers mi durs : A60, A70, XC38, XC65,).
- Matériaux à décohésion franche : $R_g \approx 0,9R_e$ (Aciers durs : XC80, Aciers trempés,).

Définition : DUCTILE : Qui peut être tiré, allongé, étendu sans se rompre. Ex : l'or est le plus ductile des métaux. Exemple.

Schéma d'étude



Hypothèses

Nous ne tenons pas compte du poids propre de la poutre afin de ne pas développer des calculs trop complexes.

Les caractéristiques d'étude sont :

- Poutre de dimensions : $l = 600\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $h = 4\text{mm}$ et coefficient $s=5$.
- Matière A60 : $R_e = 340\text{MPa}$ et $R_g = 0,5R_e$
- Module de Young : $E = 200\text{GPa}$

Etat de sollicitation de la poutre

Les actions aux appuis A et B ont pour valeurs : $Y_A = Y_B = \frac{F}{2}$.

Pour les torseurs de cohésion, deux zones de travail :

- pour $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$

Le torseur des efforts de cohésion a pour expression :

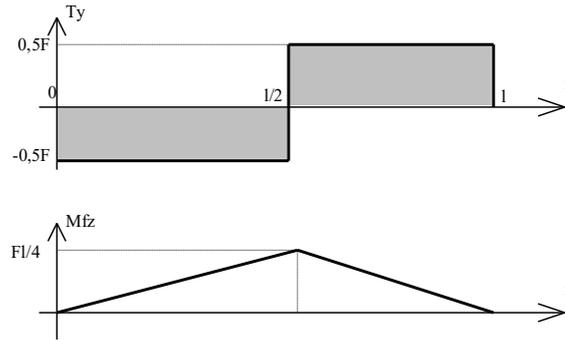
$$\{T_{S^+ \rightarrow S^-}\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ -0,5F & 0 \\ 0 & 0,5xF \end{array} \right\}_{G, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}}$$

- pour $\frac{l}{2} \leq x \leq l$

Le torseur des efforts de cohésion a pour expression :

$$\{T_{S^+ \rightarrow S^-}\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0,5F & 0 \\ 0 & 0,5F(1-x) \end{array} \right\}_{G, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}}$$

Diagrammes



Contraintes normales maximales

Nous n'avons pas de singularité de forme, donc $K=1$

$$M_{fz, \max} = \frac{Fl}{4}; Y_{\max} = \frac{h}{2} \text{ et } I_{Gz} = \frac{bh^3}{12}.$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3Fl}{2bh^2} = 59,1 \text{ MPa}$$

$$R_{pe} = \frac{R_e}{s} = \frac{340}{5} = 68 \text{ MPa}$$

$\sigma_{\max} < R_{pe}$, la poutre résiste aux contraintes normales.

Contraintes tangentielles maximales

Pour une section rectangulaire :

$$\tau_{Y \max} = \frac{3}{2} \tau_{Y \text{ moy}} \text{ or } \tau_{Y \text{ moy}} = \frac{T_Y}{S} \text{ avec } S = bh.$$

$$\tau_{\max} = \frac{3 \times F}{2 \times 2bh} = 0,2 \text{ MPa}$$

$$R_g = 0,5 R_e = 170 \text{ MPa}$$

$$R_{pg} = \frac{R_g}{s} = \frac{170}{5} = 34 \text{ MPa}$$

$\tau_{\max} < R_{pg}$ la poutre résiste aux contraintes de cisaillement.

Effet prépondérant entre contraintes normales et tangentielles

Parmi σ_{\max} et τ_{\max} , nous devons déterminer quelle est celle qui se rapproche le plus de la limite élastique du matériau de la poutre. Pour cela, nous envisageons les rapports

$$\frac{\sigma_{\max}}{R_e} \text{ et } \frac{\tau_{\max}}{R_g}$$

L'application numérique de cet exemple donne $\frac{\sigma_{\max}}{R_e} = 0,173$ et $\frac{\tau_{\max}}{R_g} = 0,0012$.

L'évaluation de ces deux rapports montre que la poutre sollicitée en flexion simple est plus sensible aux contraintes normales qu'aux contraintes tangentielles. Ce résultat peut être généralisé.

Détermination de la flèche maximale

Conditions aux limites:

zone 1 :

- à $x = 0, y = 0, y' = 0, M_{fz} = 0$ et $T_y = -0,5F$ (*liaison ponctuelle immobile*)
- à $x = l/2, y = 0, y' = 0, M_{fz} = Fl/4$ et $T_y = 0$

zone 2 :

- à $x = l/2, y = 0, y' = 0, M_{fz} = Fl/4$ et $T_y = 0$
- à $x = l, y = 0, y' = 0, M_{fz} = 0$ et $T_y = 0,5F$

$$\text{Equations de base. : } y''' = \frac{M_{fz}(x)}{EI_{Gz}} = \frac{Fx}{2EI_{Gz}}$$

$$M_{fz}(x) = \frac{F \cdot x}{2} \text{ (Tiré du torseur de cohésion de la zone 1).}$$

Analyse zone 1:

- Intégration n°1 : $y' = \frac{F}{4EI_{Gz}} \cdot x^2 + C_1$
- Intégration n°2 : $y = \frac{F}{12EI_{Gz}} \cdot x^3 + C_1 x + C_2$

- Détermination des constantes à partir des conditions aux limites :

$$\text{C.I. } f(0) = \frac{21}{12EI_{Gz}} \cdot 0^3 + C_1 \cdot 0 + C_2$$

$$C_2 = 0$$

$$\text{C.F. } f(0) = \frac{F}{4EI_{Gz}} \left(\frac{l}{2} \right)^2 + C_1$$

$$C_1 = -\frac{F}{4EI_{Gz}} \left(\frac{l^2}{4} \right) = -\frac{Fl^2}{16EI_{Gz}}$$

- La flèche pourra être calculée en tout point de la zone 1 à l'aide de cette relation :

$$y = \frac{F}{12EI_{Gz}} x^3 - \frac{Fl^2}{16EI_{Gz}} x$$

$$f \quad y = \frac{Fx}{4EI_{Gz}} \left(\frac{x^2}{3} - \frac{l^2}{4} \right)$$

Pour la première zone, la flèche maximale se trouvera au point $x=l/2$. La flèche aura pour valeur $y=-4,43\text{mm}$. Cette valeur sera réutilisable pour la zone 2.

La flèche au point d'application de l'action est d'environ $4,5\text{mm}$, il faudra vérifier par rapport au contexte si ces $4,5\text{mm}$ ne nuisent pas au fonctionnement du système. Il faudra être sûr que cette flèche est tolérable pour le mécanisme.

2.5. Torsion simple

2.5.1. Définition : une poutre est sollicitée à la torsion simple lorsqu'elle est soumise, à ses deux extrémités à deux couples apposés de moments m_t portés par l'axe.

La poutre est supposée cylindrique de section circulaire constante.

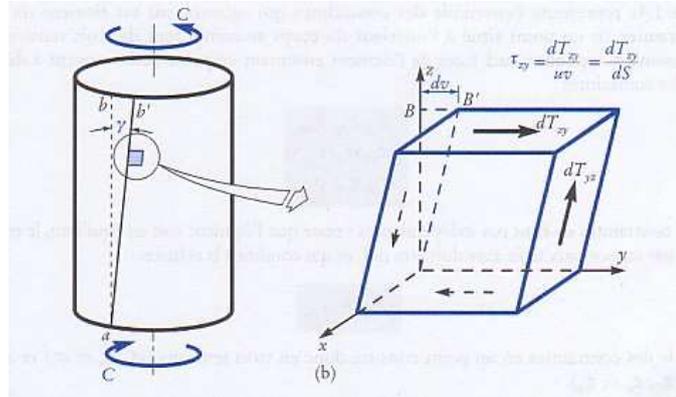


Figure 9 : Poutre en torsion

$$\frac{d\vec{f}}{dS} = \tau$$

τ : est la contrainte tangentielle au point M.

2.5.2. Relation contrainte- déformation

$$\tau = G \cdot \rho \cdot \theta$$

G : module d'élasticité transversal

τ : est maximale lorsque $\rho = R$

θ : angle unitaire de torsion

2.5.3. Relation couple de torsion –contrainte

$$m_t = G \cdot \theta \cdot I_0$$

$$\tau_{Max} = \frac{r \cdot m_t}{I_0}$$

I_0 : moment quadratique

2.5.4. Condition de résistance

$$\tau_{Max} \leq \tau_p$$

τ_p : étant la contrainte tangentielle pratique

2.6. Essai de Dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.

- La dureté de Mohs - La dureté Brinell - La dureté Vickers - La dureté Knoop
- La dureté Rockwell B et C

L'essai de dureté se réalise sur un microduromètre pour avoir plus de précision sur les mesures (Figures 10 et 11).



Figure 10. Micro-duromètre

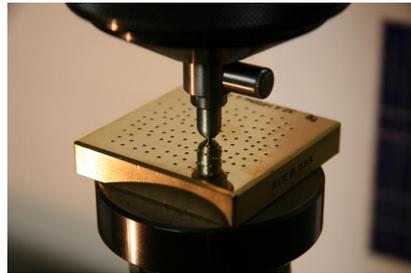


Figure 11. Dispositif d'essai

2.6.1. La dureté de Mohs

La première notion de dureté (1822) provient du minéralogiste allemand Friedrich Mohs qui recherchait un paramètre pour définir les minéraux. Il propose une échelle de 10 classes de dureté relative basée sur la résistance à la rayure par rapport à des matériaux donnés, le talc et le diamant étant les extrêmes.

Dureté	Minéral		Exemples
1	Talc	Très fragile	
2	Gypse	Se raye à l'angle	≈ 2,2 angle
3	Calcite	Fragile	≈ 3,2 cuivre
4	Fluorite	Se raye par le cuivre	
5	Apatite	Moyennement dur	≈ 5,1 lame de couteau
6	Orthoclase	Se raye par le verre ou l'acier	≈ 5,5 Verre
7	Quartz	Dur	≈ 6,5 aiguille d'acier
8	Topaze		
9	Corindon	Très dur	
10	Diamant		

La dureté est une grandeur anisotrope, variant avec les directions cristallographiques ; il est difficile de s'en servir comme caractéristique absolue.

Il existe, de plus, une dureté apparente de certains agrégats friables : l'ocre rouge se raie à l'ongle, mais est formée de fins grains d'hématite rayant le verre.

La texture peut également donner un résultat faux. Par exemple, si la structure est à grains fins, on peut confondre une rayure et l'arrachement de petits grains.

De plus l'échelle n'est pas linéaire, ce qui n'est pas adapté à la mesure des matériaux industriels comme l'acier.

Il faut bien distinguer ténacité et dureté : ainsi le diamant, le plus dur des corps naturels connus, peu tenace, se casse facilement grâce à son excellent clivage octaédrique.

Aujourd'hui, la dureté est mesurée grâce à l'empreinte que laisse un pénétrateur dans un matériau sous une force donnée.

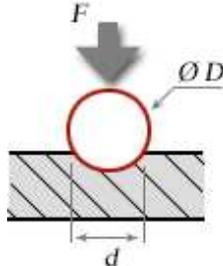
Il existe différents essais selon la forme du pénétrateur et la nature de la mesure de l'empreinte (surface ou profondeur).

Mesure de la surface :

La dureté est donnée en méga pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm²).

2.6.2. Dureté Brinell

L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre (D). La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal.



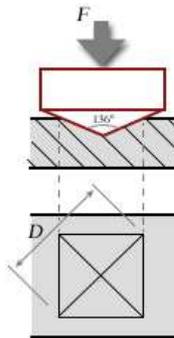
On applique une charge (F) de 500 ou 3000 kgf.

On mesure le diamètre (d) de l'empreinte en millimètres.

$$HV = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

On doit l'essai Brinell à l'ingénieur métallurgiste suédois Johan Brinell (1849 - 1925). Il s'applique aux métaux "peu durs". La norme Brinell de dureté a été éditée dès 1924.

2.6.3. Dureté Vickers



La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre.

Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un identeur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'identeur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°. La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope. La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1,854 F / D^2$$

où F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres. La profondeur de pénétration H est $H = D / 7$.

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.

La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de microdureté, en 1969.

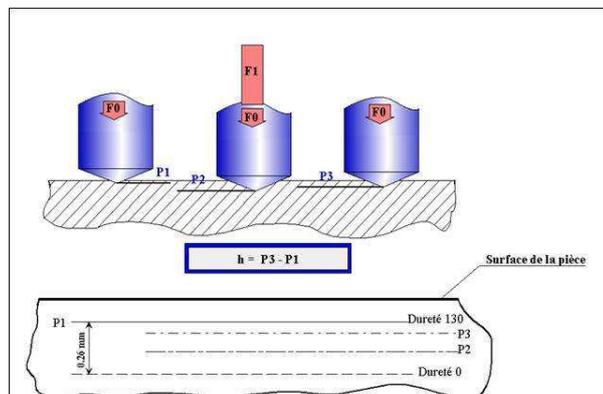
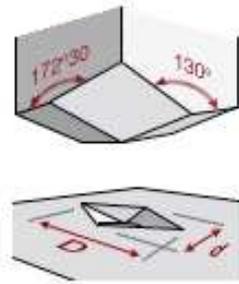


Figure 12. Mode opératoire de chargement pour la mesure de la dureté Vickers.

2.6.4. Dureté Knoop



L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique.

Le pénétrateur en diamant est de forme pyramidale à base rectangulaire avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces. Les charges appliquées sont inférieures à 1 kgf. Le pénétrateur laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0,01 et 0,1 mm ($D = 7 d$ et $H = D / 30$).

Si on mesure la longueur et la largeur de l'empreinte à l'aide d'un microscope, la dureté de Knoop (HK) est donnée par la formule suivante :

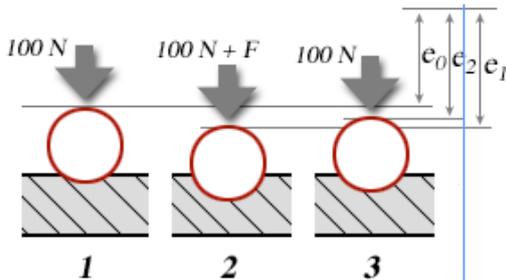
$$HK = 14,229 F / D^2$$

où F est la charge en kgf et D^2 , l'aire de l'empreinte en millimètres carrés. La norme de micro-dureté Knoop a été adoptée en 1969.

Mesure de profondeur :

2.6.5. Dureté Rockwell

Essai Rockwell : mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (HRB) ou d'un cône de diamant de 120° , dureté Rockwell C (HRC).



La norme de dureté Rockwell date de 1932.

L'essai consiste à appliquer une précharge de 100N sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur e_0 . On applique une force supplémentaire F , pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur e_1 . On supprime la force F , le cône reste enfoncé d'une profondeur e_2 .

La profondeur rémanente ($e_2 - e_0$) permet le calcul de la dureté selon la formule : Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

ROCKWELL C

$$HRC = 500 (100 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ($\varnothing 0,2$ mm). La charge F est de 1400 N (150 kgf).

ROCKWELL B

$$HRB = 500 (130 - (e_2 - e_0))$$

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre. La charge F est de 900 N (100 kgf).

2.6.6. Dureté - résistance

Il existe une relation entre la dureté et la résistance à la traction ou rupture R_m . Pour les aciers au carbone : $R_m = 3,5 \text{ HB}$

R_m (MPa)	HB	HRB	HRC
400	130	60	
800	250	100	21
1200	360		36
1600	460		46
2000	530		52

Exemple de dureté Knoop

Diamant C	8000
Nitrure de bore BN	4500
Carbure de silicium SiC	2700
Alumine Al_2O_3	2500

2.6.7. Autres types de duretés

Dureté **Shore** (1907) : mesure l'élasticité par la profondeur de pénétration, utilisée dans le domaine des élastomères, dureté **Meyer** : mesure la plasticité et l'élasticité, On utilise un duromètre Brinell. Soit D (mm), le diamètre de l'empreinte laissée par une charge F (N) : $HM = 4F/\pi D^2$, dureté **Berkovich** : pénétration d'un indenteur de forme "pyramidal" tétraédrique, dureté **Barcol** : pénétration d'une pointe en acier, utilisé pour les plastiques durs, résines composites (évier, baignoires...), échelle graduée de 0 à 100, dureté **Leeb** (1975) : mesure du rebond d'un percuteur, du nom de D. Leeb ingénieur suisse, dureté **UCI ultrasonic convert impedance** (1961) : méthode de mesure électrique, - dureté **Martens**, dureté **Buchholz** : domaine des revêtements organiques (vernis et peintures), longueur de l'empreinte laissée par une roue biseautée sous une charge de 500 g, dureté **crayon** ou **Wolff-Wilborn** : domaine des surfaces fragiles (peinture, revêtement, ...), trace laissée par un crayon dans la gamme 6B à 7H sous une charge de 7,5 N et un angle de 45°, dureté **Persoz-König**, dureté **Sward** : domaine des revêtements organiques (peintures, ...), dureté **Monnin**, dureté **Janka** : utilisée pour le bois, ...

2.7. Essai de résilience (Mouton de Charpy)

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique.

Un des moyens pour caractériser la fragilisation d'un métal sous l'action d'un choc est l'essai de résilience.

La résilience est la résistance aux efforts dynamiques, particulièrement aux chocs et aux percussions. La résilience d'un matériau, d'un acier par exemple, est une caractéristique très importante. Mais les essais déterminent non pas une résistance à la rupture, mais une énergie de rupture, ou plutôt une valeur qui lui est proportionnelle (le chiffre de résilience). Ce chiffre n'est pas une caractéristique intrinsèque de la nature du matériau, car il dépend de la forme et des dimensions des éprouvettes d'essai ainsi que de la vitesse d'impact et de

la forme du couteau de choc. La plupart des mesures de résilience se font à l'aide du mouton-pendule (mouton Charpy) : on rompt d'un seul coup une éprouvette entaillée en son milieu, et on déduit la résilience, qui est le rapport du travail absorbé exprimé en kilogrammètres à la section de rupture au droit de l'entaille. On pourrait aussi mesurer une résistance exprimée en kilogrammes-force par unité de surface à l'aide du mouton Fremont, mais on attache plus d'intérêt au chiffre de résilience obtenu avec le mouton Charpy.

Les paramètres de ténacité (Si l'énergie à fournir pour produire une fracture dans une éprouvette est importante, on dira que le matériau est « tenace ».) déterminés par l'essai de traction n'ont plus de sens lorsque la charge s'applique très rapidement. On parle de choc lorsque la durée d'application de la charge est de l'ordre de 1/100 de seconde. La résistance au choc ou résilience est caractérisée par le quotient de l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette en un seul coup par l'aire de la section rompue. C'est l'aptitude que possède un matériau à résister aux chocs (symbole K_C).

2.7.1. Principe de l'essai

Il consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience, elle est notée K_{C_U} ou K_{C_V} en (J/cm^2) selon l'entaille de l'éprouvette utilisée.

La résilience est définie comme l'énergie de rupture (sous choc) ramenée à la section S de l'éprouvette à l'endroit de la fissure.

$$a_K = W S$$

Bien qu'il s'agisse ici d'une grandeur spécifique (énergie par cm^2), la résilience ainsi définie dépend très fortement des dimensions géométriques de l'éprouvette. On ne peut donc pas utiliser cette valeur pour calculer l'énergie de rupture pour un échantillon d'une autre section par simple multiplication avec la nouvelle section. Afin de pouvoir comparer les mesures de différentes expériences, il est alors absolument nécessaire, de standardiser la section et la taille des éprouvettes. Ceci est en fait la pratique adoptée aujourd'hui (norme ISO 148).

2.7.2. Dispositif expérimental

La machine d'essai la plus couramment utilisée pour sa détermination est le mouton de Charpy (Figures 13 et 14).

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule. Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ mgh_0 , h_0 étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 . L'énergie K_C dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors

$$K_{C_V} = m g (h_0 - h_1)$$

Comme l'énergie cinétique emportée par les débris après la rupture est négligeable, c'est l'énergie de rupture que l'on indique comme résultat de l'essai de résilience. De plus il faut absolument mentionner le type d'échantillon normé qu'on a utilisé pour sa détermination. Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U. Ils ont une entaille en forme de V ou U pour fixer l'endroit de la fissure. L'énergie de rupture est finalement indiquée en J (Joule), précédée par les lettres K_{CV} ou K_{CU} pour désigner qu'il s'agit d'une énergie de rupture (K_C , de l'allemand: Kerbschlagzähigkeit) mesurée avec une éprouvette ayant une entaille en forme de V ou U. Notez que seul des résultats obtenus sur des éprouvettes de dimensions identiques devraient être comparés. Il n'y a pas de méthode générale de conversion de valeurs de résilience, obtenues par une méthode d'essai, en valeurs qui seraient obtenues par une autre méthode d'essai.

Pour obtenir la résilience a_K on divisera encore cette valeur par la section de l'échantillon à l'endroit de la fissure. L'unité habituelle pour exprimer la résilience a_K est le J/cm^2 tandis que l'énergie de rupture K_{CV} est indiquée en J. Comme la valeur a_K ne présente aucun avantage sur l'indication de l'énergie de rupture, on indique aujourd'hui uniquement l'énergie de rupture K_C . Par contre, on constate une certaine ambiguïté dans l'utilisation du mot résilience. Il est utilisé parfois aussi pour désigner l'énergie de rupture.

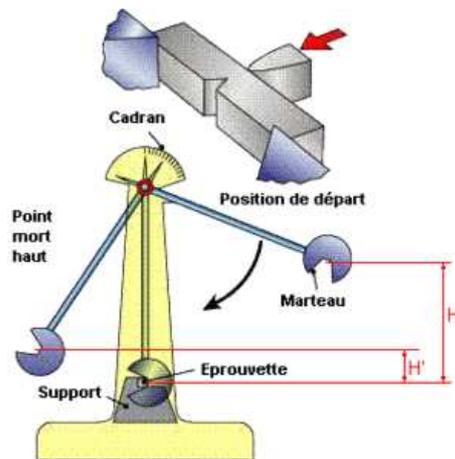
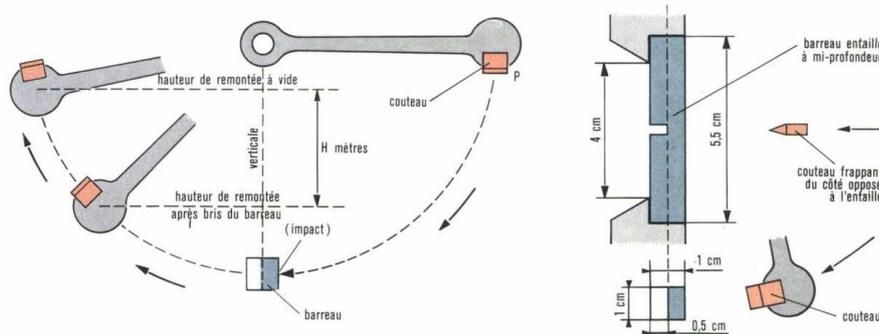


Figure 13. Schéma de principe de l'essai de choc.



Figure 14. Machine mouton de Charpy



- le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ $W_0 = 300 \text{ J}$.
- On libère le couteau. Dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.
- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée W_1
- On calcule la différence $W_0 - W_1 = W = P (h_0 - h_1)$; W est l'énergie absorbée.

2.7.3. Les éprouvettes

L'effet de la forme de l'éprouvette sur l'énergie de rupture est très prononcé. La figure 11 montre les formes et dimensions géométriques de 3 types d'éprouvettes standardisées. Elles ont toutes une longueur de 55 mm et une section nominale de 10x10 mm², mais se distinguent dans leur forme et leur profondeur d'entaille qui se trouve sur le côté opposé à l'endroit où le marteau frappe (Figure 17). Elle a pour objet de garantir un état de contrainte triaxiale, déjà lors de l'amorçage de la fissure, plutôt que de provoquer l'effet d'entaille. C'est pour cette raison que le fond de l'entaille n'est pas pointue mais cylindrique (rayon de 0.25 ou de 1 mm selon type d'éprouvette). L'aire de la section restant à l'endroit de l'entaille est, selon la définition de la résilience α_K , la section à utiliser pour le calcul de sa valeur.

Les trois éprouvettes ne sont pas équivalentes. L'énergie de rupture (J) et la résilience (J/cm²) varient avec la profondeur de l'entaille et le rayon de courbure au fond de l'entaille. Si l'on fait varier le rayon à fond de l'entaille, on modifie la concentration et la triaxialité des contraintes à son extrémité. La résilience est minimale pour une fissure aiguë (rayon = 0, effet d'entaille) et elle augmente avec le rayon. Si le comportement ne dépendait que des dimensions géométriques, on pourrait sans autre trouver une nouvelle définition de la résilience ne dépendant que d'une seule valeur pour différents types d'éprouvettes. Mais les différences des résiliences α_K entre différentes éprouvettes ne varient pas de façon systématique. Elles dépendent du métal et pire encore de son état de ductilité. C'est notamment, le travail effectué pour la déformation plastique qui est très variable. Si l'on fait varier la profondeur de l'entaille d'une éprouvette ductile, même l'énergie de rupture spécifique α_K augmente avec la hauteur restante. Pour un métal fragile, par contre, la résilience ne dépend pratiquement pas de la profondeur. Finalement ce n'est pas seulement la valeur absolue qui en dépend, même la température de la transition ductile - fragile n'est pas identique pour les différents types d'éprouvettes ($\pm 30^\circ\text{C}$). Un constructeur qui aimerait donner une garantie pour la sécurité de son produit doit donc tenir compte d'une importante marge d'incertitude.

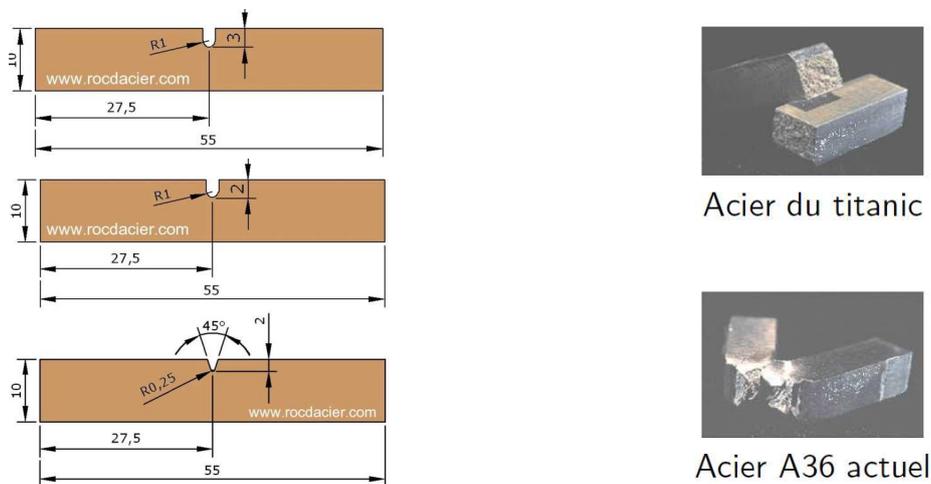


Figure 15. Eprouvettes Charpy standardisées. Le type le plus utilisé est l'éprouvette ISO-V. Dimensions en mm.

Références Bibliographiques

- Des Matériaux, Jean-Paul Bâillon, Jean-Marie Dorlot, 3^{ème} édition
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction
- <http://materiaux.ecam.fr/materiel/essaimecaniques/Essaimeca.html>
- http://lmm.epfl.ch/webdav/site/lmm/shared/TP_MX2-GM2/C%20Traction.pdf

Chapitre : 2

Comportement en fatigue des matériaux

Sommaire

- I. Comportement en fatigue des matériaux
 - I.1. Introduction
 - I.2. Techniques expérimentales pour essais de fatigue
 - I.3. Critères de choix des éprouvettes pour essais de fatigue
 - I.4. Les machines d'essais de fatigue
 - I.5. Déformation plastique en bout de fissure
 - I.6. Techniques de mesure de la propagation des fissures de fatigue
 - I.7. Comportement à la fatigue
 - I.8. Modèles de propagation des fissures de fatigue
 - I.9. Modèle de propagation basé sur l'évolution de (ΔK)
- II. Application sur les biomatériaux pour une prothèse totale de hanche
 - II.1. Approche mécanique des essais
 - II.2. Analyse biomécanique de l'articulation de la hanche

I. Comportement en fatigue des matériaux

I.1. Introduction

L'évaluation de la durée de vie des matériaux et des structures en service est capitale. Beaucoup de paramètres de nature *intrinsèque* et *extrinsèque* ont un effet direct sur la tenue en fatigue des pièces mécaniques.

En milieu physiologique, l'endommagement sous chargement cyclique peut prendre des formes couplées de *fatigue sous corrosion*, de *fatigue par endurance* ou de *fatigue par fissuration*. Ces types de dommages peuvent s'interagir séparément ou simultanément.

Cependant la connaissance de la nature de la charge physiologique appliquée à l'implant et aux prothèses, au cas d'une liaison artificielle, est nécessaire pour un meilleur choix des conditions de chargement en laboratoire : *charge maximale, charge moyenne, rapport de chargement, fréquence ...*

Nous allons prendre les propriétés de base et les résultats les plus spécifiques en termes de résistance à la fatigue des biomatériaux. Notre attention portera essentiellement sur le comportement en fatigue de ce matériau et l'influence de certains paramètres intrinsèques et extrinsèques sur sa résistance et sa fiabilité sous l'effet d'un chargement cyclique [1-8].

I.2. Techniques expérimentales pour essais de fatigue

Les essais de fatigue sont multiples et variés (*fissuration, amorçage, endurance ...*). Le choix de ces essais dépend en grande partie de la nature et de l'importance des structures à tester (aube, turbine, prothèse ...). Dans le cas des biomatériaux, l'étude de la tenue à la fatigue de ces produits, porte de plus en plus sur le comportement à l'amorçage et à la propagation des fissures pour des conditions de chargement données.

I.3. Critères de choix des éprouvettes pour essais de fatigue

Les éprouvettes à utiliser pour les essais de laboratoire sont fonction de la nature des biomatériaux à tester et des paramètres à contrôler (endurance, fatigue oligocyclique, propagation des fissures ...). L'étude de la propagation et de l'amorçage des fissures fait intervenir des éprouvettes normalisées (ASTM) de formes et de dimensions variées.

Les éprouvettes (CT) sont couramment utilisées pour la mesure de la ténacité K_{IC} , mais aussi pour la mesure de l'amorçage et de la propagation des fissures de fatigue si les spécimens sont de faibles épaisseurs (figure 1) [9,10].

L'étude des fissures courtes fait appel à des éprouvettes de flexion trois ou quatre points. Ce genre d'éprouvette semble être mieux adapté à l'analyse de l'ouverture au fond de fissure. D'autres formes d'éprouvettes du type AT (Arc-shaped Tension), du type DCT (Disc-shaped Compact Tension) ou de type disque brésilien sont aussi employées dans l'étude de la propagation ou des fissures de fatigue sur les biomatériaux (figures 2, 3 et 4). Ces éprouvettes ont des géométries et des fonctions de forme proches des structures à tester (réservoirs, tubes, disques, cotyles ...).

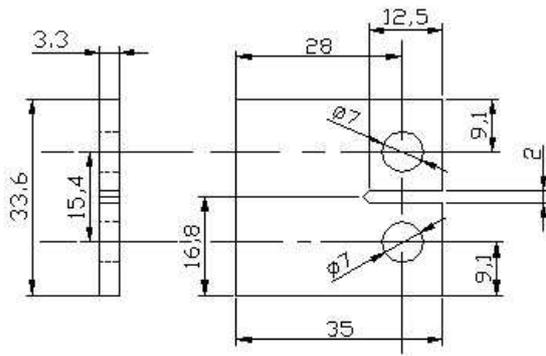


Figure 1 : Epreuve de ténacité. de type CT.

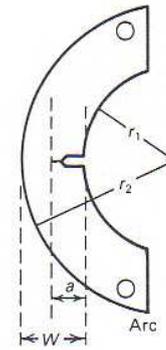


Figure 2 : Epreuve de type AT.

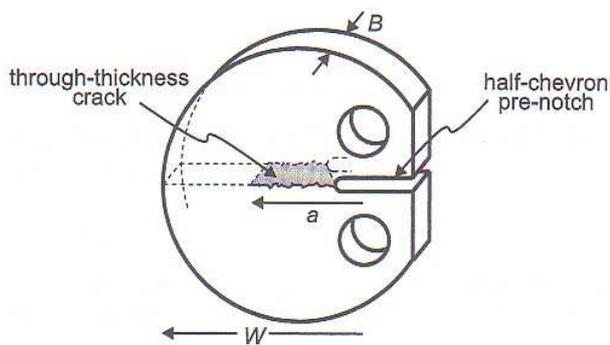


Figure 3 : Epreuve de type DCT.

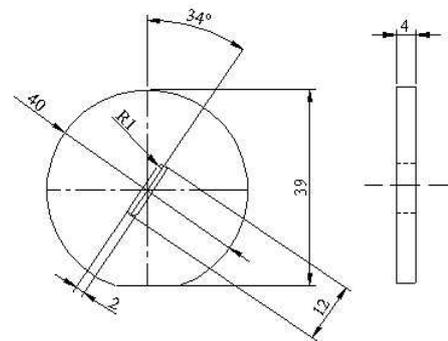


Figure 4 : Epreuve de type disque brésilien.

I.4. Les machines d'essais de fatigue

Cette famille de systèmes couvre des machines résistantes et durables. Conçus pour de fortes capacités en traction, compression et flexion, ces bâtis fonctionnent grâce à un système hydraulique qui actionne un vérin procurant ainsi les forces nécessaires à la réalisation (figures 5 et 6).

Notons que pour les essais monotones les machines appliquent la charge à l'éprouvette soit par un vérin hydraulique soit par un vérin électrique mono vis. Et pour chaque type d'essai on varie les accessoires selon les besoins.

Et que pour les essais cycliques, les systèmes appliquent la charge à l'éprouvette la plus par du temps par un vérin hydraulique, mais les nouvelles machines plus performantes et développé on utilise un vérin électrique mono vis. Les applications comprennent la fatigue à grande fréquence, la fatigue oligocyclique, la mécanique de la rupture, la propagation de fissure, la simulation sur éprouvettes ou composants.

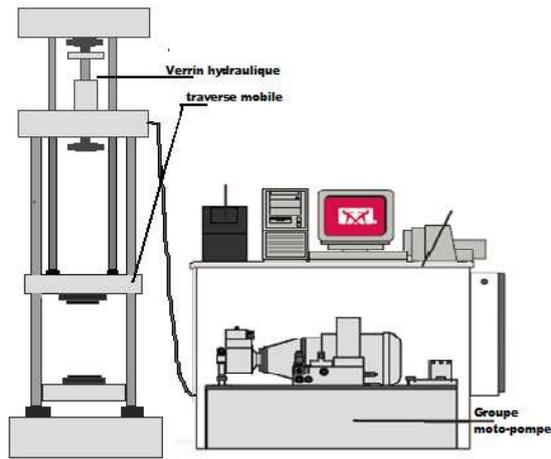


Figure 5a : Exemple de mécanisme d'entraînement servo-hydraulique.

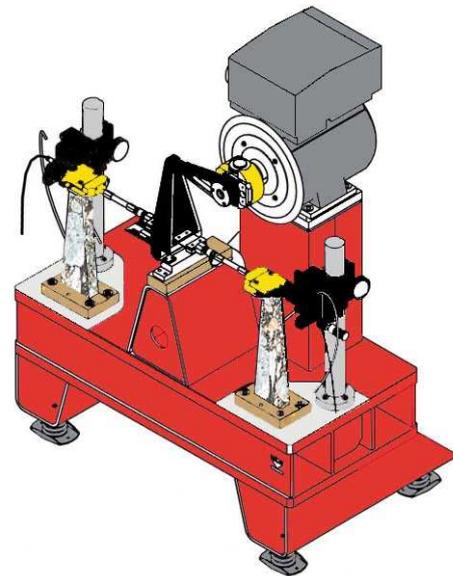


Figure 5b : Exemple de machine de flexion rotative.



(a)

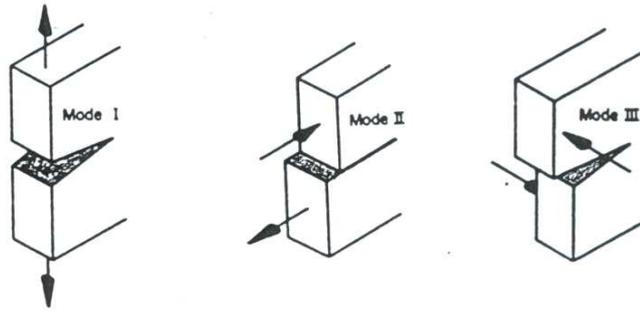


(b)

Figure 6 : (a) Electrohydraulic computer controlled machine for fatigue life tests of materials and small components under laboratory and/or operational (random) loading (b) Instron 8874 bi-axial servo-hydraulic testing system. A bovine tibia under fatigue loading is shown.

1.5. Déformation plastique en bout de fissure

En général la mécanique classique de la rupture propose trois mécanismes élémentaires de rupture illustres par la figure 7 suivante [11].



Mode ouverture Mode de cisaillement Mode de cisaillement antiplan

Figure 7 : Représentation des trois mécanismes de ruptures élémentaires.

- Pour obtenir le mode I, il faut charger l'éprouvette perpendiculairement à l'entaille.
- Pour obtenir le mode II il faut charger l'éprouvette parallèlement à l'axe de l'entaille.
- Le mode pur la propagation des fissures sous charge variable se fait différemment selon les modes de sollicitation.

En sollicitation en mode I, l'état de contraintes et de déformations au voisinage immédiat de la pointe de la fissure est donné par les équations de Westergaard obtenues à partir des équations générales d'élasticité :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{zz} &= \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{et} \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

K_I : facteur d'intensité de contraintes en mode I de rupture.

r, θ : coordonnées polaires d'un point M en amont de la pointe de la fissure.

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 v &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 w &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

En réalité, c'est à une distance r_c en avant du fond de fissure que la rupture trouve un site d'amorçage privilégié où la contrainte σ_{yy} atteignant sa valeur maximale, σ_{Max} (figure 8).

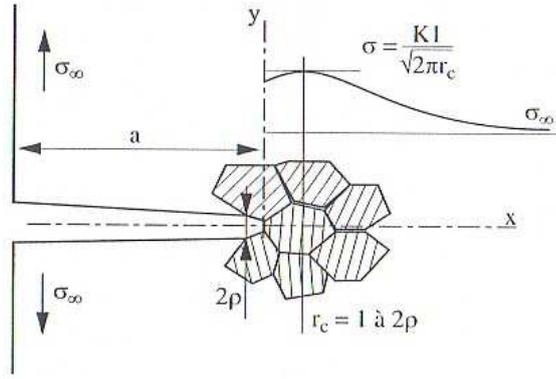


Figure 8 : Profil de la contrainte normale σ_{yy} au voisinage du front de fissuration.

En mode I de rupture et en configuration de contraintes planes ($\sigma_{zz} = 0$), la seule composante active est σ_{yy} . Pour $\theta = 0$, on aura :

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3)$$

Selon l'intensité de chargement, la contrainte σ_{yy} atteindra localement la limite d'élasticité du matériau, jusqu'à la création d'une zone plastifiée en bout de fissure définie par :

$$\sigma_{yy} = R_e = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad \Rightarrow \quad r_y = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \quad (4)$$

Irwin définit ainsi le rayon (r_y) d'une zone plastifiée en bout de fissure en mode I de chargement sur plaque mince (contraintes planes) et en faisant l'hypothèse que la zone plastifiée est circulaire.

Pour le mode II on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad \text{et} \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

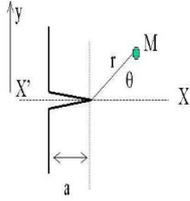
$$u = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (6)$$

$$v = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$w = 0$$

Dans ces relations, G est le module d'élasticité de cisaillement, ν coefficient de Poisson. G et ν sont reliés au module d'Young par la relation : $2G(1+\nu) = E$

Facteur d'intensité de contrainte en mode III, élasticité anti plane.



$r \rightarrow 0$

$$\sigma = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \underline{\sigma}(\theta)$$

$$\sigma_{xz} = -\sin \frac{\theta}{2} \tag{6}$$

$$\sigma_{yz} = \cos \frac{\theta}{2}$$

$r \rightarrow 0$

$$u = \frac{K_{III}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} u(\theta)$$

$$u_z = \sin(\theta/2)$$

1.6. Techniques de mesure de la propagation des fissures de fatigue

Pour détecter, contrôler, suivre la propagation des fissures de fatigue plusieurs techniques expérimentales sont utilisées et dont les plus connues sont :

- la méthode de chute de potentiel ;
- la méthode optique ;
- la méthode de la jauge de propagation ;
- la méthode par ultrason.

1.6.1. Méthode de chute de potentiel

Méthode couramment utilisée pour la mesure des longueurs de fissure (a), sur des céramiques [12]. Cette méthode consiste à mettre un dépôt de cuivre sur la céramique à tester, puis faire circuler un courant électrique d'intensité I entre deux points situés de part et d'autre du plan de fissuration (figure 9). La résistance de la pièce dépend de la surface conductrice de courant entre la partie supérieure et la partie inférieure de l'éprouvette donc de la longueur de fissure (a).

Dans le cas où l'intensité du courant reste constante la différence de potentiel entre deux points de mesure situés de part et d'autre de la fissure, donnerait une mesure de la résistance issue de la loi d'Ohm $\Delta V = I \cdot \Delta R$ avec $R = \rho l/s$.

ΔR étant inversement proportionnel à la surface non rompue. On peut donc établir une relation entre la longueur de fissure (a) et la chute de potentiel (ΔV) (Potential Drop).

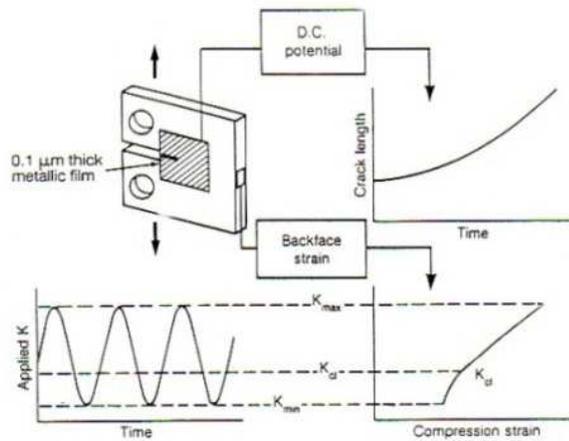


Figure 9 : Exemple type de technique expérimentale utilisée sur la mesure de longueur de fissure sur éprouvette (CT) sous chargement cyclique.

I.6.2. Méthode Optique

Technique visuelle très utilisée pour sa simplicité, la méthode optique permet de lire directement la longueur (a) de la fissure à l'aide d'une lunette optique ou d'une mini-caméra de haute résolution, sur une face polie de l'éprouvette. L'erreur de mesure de (a) étant de l'ordre de quelques centièmes de millimètres [13].

I.6.3. Méthode de la jauge de fissuration

Cette méthode utilise des résistances électriques spéciales dites Jauges de fissuration. Cette technique est préférée dès que l'endroit de la fissure est difficile à localiser comme le cas des structures mécano soudées ou des structures subissant des chargements multiaxiaux provoquant des bifurcations des fissures dans des plans arbitraires [14].

I.6.4. Méthode par ultrason

La méthode par ultrason utilise la réponse des ondes ultrasonores transmises à l'aide d'une sonde émettrice d'ondes élastiques à travers une éprouvette fissurée et un récepteur de signal. La figure 10 montre le schéma de principe de la technique. Son avantage réside dans son aspect non destructif et la localisation de la fissure (a) quelle que soit la complexité de la structure à contrôler.

Cette technique basée sur la méthode des ultrasons est utilisée dans le contrôle postopératoire de certains implants orthopédiques à haut risque de rupture et de fissuration tel que le cas des plaques d'ostéosynthèse à compression dynamique (figure 11).

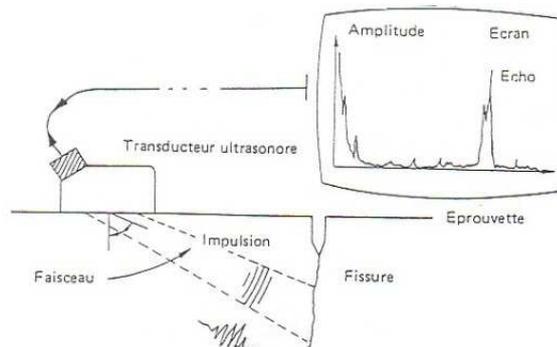


Figure 10 : Principe de la chaîne de mesure et de contrôle des fissures de fatigue par ultrasons.

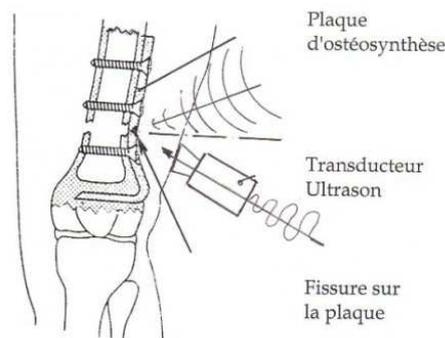


Figure 11 : Principe de la technique d'emplacement et de détection de fissures par ultrasons sur plaque d'ostéosynthèse.

I.7. Comportement à la fatigue

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau. Les étapes principales de la fatigue sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale. Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, le fini de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

L'étude du comportement à la fatigue des biomatériaux en général et des biomatériaux en particulier montre qu'on fait appel à des paramètres très divers et des techniques de mesure et de contrôle très variées. L'agressivité du milieu physiologique et la complexité des chargements imposés aux composants des implants ostéoarticulaires (métalliques ou

céramiques) font que ces biomatériaux doivent avoir une bonne tenue à la fatigue sous toutes ses formes :

- tenue à la fatigue sous corrosion ;
- tenue à la fatigue par endurance ;
- tenue à la fatigue par fissuration ;
- tenue à la fatigue par fluage.

I.7.1. Tenue à la fatigue sous corrosion

Très comparable à la corrosion sous contrainte, le phénomène de fatigue-corrosion apparaît sous l'action conjuguée de l'environnement et d'une sollicitation cyclique. Il se manifeste par un abaissement de la résistance du matériau en fatigue. Le plus souvent, et compte tenu des cinétiques de dissolution et de repassivation assez lentes comparées aux phénomènes mécaniques, ce type d'endommagement survient pour des pièces sollicitées à basse fréquence (fatigue oligocyclique), par exemple lors de cycles de chauffage-refroidissement de structures. Les mécanismes évoqués pour rendre compte de la fatigue-corrosion sont les mêmes que ceux présentés pour la corrosion sous contrainte, et les essais de laboratoire sont en général des essais de fatigue en présence du milieu considéré réalisés soit à amplitude de déformation constante, soit à amplitude de contrainte constante.

On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence. Ce phénomène n'est pas rencontré sur la biocéramique puisqu'elle se présente sous la forme la plus oxydée (l'alumine Al_2O_3 , l'alumine-zircone $Al_2O_3-ZrO_2$ et la zircone ZrO_2). Comparativement aux matériaux métalliques, les biocéramiques présentent un taux d'oxydation très lent.

La réaction d'oxydation probable de ces céramiques peut être catalysée par l'influence de certains agents à pH élevé (acides) susceptibles de circuler dans le milieu physiologique (corps humain). Peu de résultats dans la littérature portent sur la fatigue corrosion des biocéramiques.

I.7.2. Tenue à la fatigue par endurance

La plupart des matériaux soumis à des efforts variables de façon périodique, s'endommagent progressivement et, bien qu'ils soient soumis à des efforts inférieurs à leur limite de rupture ou à leur limite d'élasticité, finissent par se rompre, en général brutalement. Ce phénomène, encore appelé fatigue, est évidemment très dangereux lorsqu'il touche une pièce de sécurité d'une machine, d'un véhicule ou de la biostructure humaine.

Les essais d'endurance consistent à soumettre les biomatériaux à des efforts de chargement périodiques, à amplitude contrôlée et à noter le nombre de cycles ou le temps au bout duquel la rupture se produit. Les résultats de ces essais sont obtenus sous forme de courbe dite de **wöhler**, où on peut définir la limite de fatigue du matériau testé. Les diagrammes des figures 8a et 8b représentent l'évolution de l'amplitude maximale de la contrainte appliquée en fonction du temps pour trois types de bio-céramiques : l'alumine (I) de densité 99,5%,

l'alumine (II) de densité 99,99% et l'alumine-zircone testées toutes en mode de chargement statique et cyclique en flexion quatre points et à une fréquence de 10 Hz.

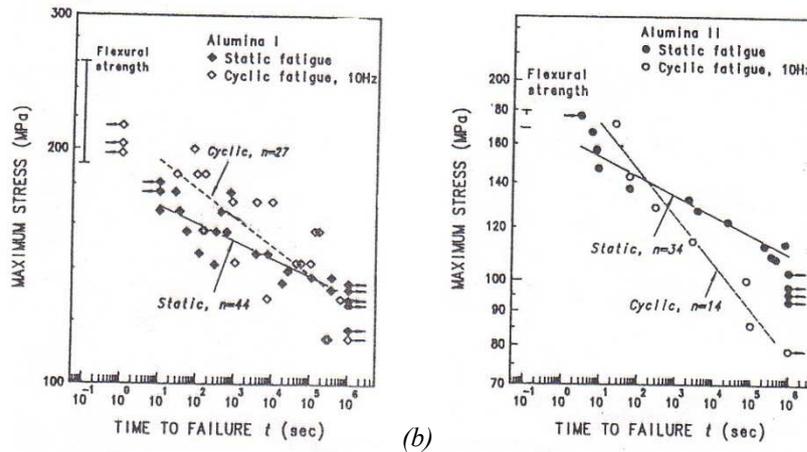


Figure 12 : -(a) Courbes d'endurance et évolution de la contrainte normale à la rupture en fonction du temps, pour une alumine I de densité 99,50%.
 -(b) pour une alumine II de densité 99,99%.

Des essais sur éprouvettes lisses avec un chargement périodique caractérisé par sa contrainte moyenne et sa contrainte alternée permettent de définir le nombre de cycles à rupture du matériau. La rupture en $1/4$ de cycle est le résultat de l'essai de traction, elle est obtenue quand la contrainte maximum (contrainte moyenne plus contrainte alternée) atteint la limite de rupture en traction. On peut représenter sous forme de courbes de Wöhler la relation entre son amplitude de contrainte alternée S_a et N le nombre de cycles à rupture pour chaque valeur de R , rapport de charge ; si nécessaire on répète les essais pour différentes températures. Le rapport de charge R est le rapport entre contrainte minimale (contrainte moyenne moins la contrainte alternée) et contrainte maximale (contrainte moyenne plus contrainte alternée). La limite d'endurance $S_a D(R)$ est la valeur de contrainte alternée en dessous de laquelle il n'y a pas de fatigue [14].

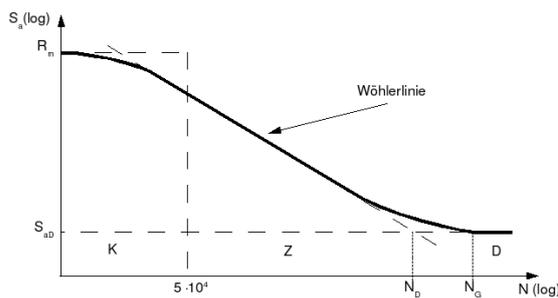


Figure 13a : Courbe de fatigue de Whöler (Woehlerlinie en allemand), représentant en échelles logarithmiques la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles de chargement.

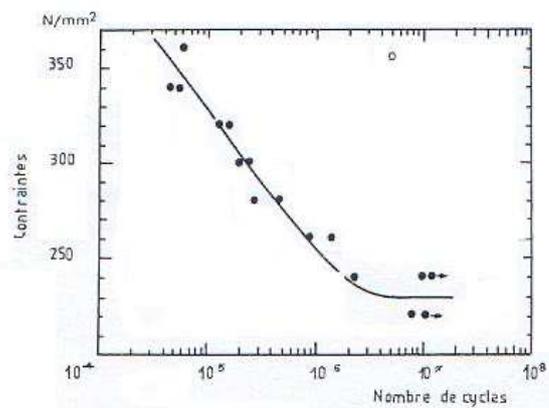


Figure 13b : Exemple de courbe de wöhler , amplitude maximale de la contrainte périodique, nombre de cycles à rupture (en échelle logarithmique), d'un acier doux essayé en flexion plane.

Des facteurs secondaires affectent le nombre de cycles à rupture N : l'état de surface, la fréquence du chargement, la taille de l'éprouvette. Pour étudier la durée de vie d'une structure, on peut utiliser les courbes de Wöhler pour des chargements conduisant à de grandes durées de vie (>50.000 cycles). Il faut pour cela transformer aux endroits les plus contraints le tenseur local variable en son équivalent uniaxial moyen et alterné. Pour des chargements plus intenses, les essais de fatigue conduisant à un effet de rochet (cumul des déformations permanentes à chaque cycle), on leur substitue des essais en déformation imposée. Le cycle de contrainte stabilisé obtenu, caractérisé par sa contrainte moyenne et sa contrainte alternée) permet d'étendre dans le domaine oligocyclique les courbes de Wöhler. Dans le cas d'une structure ou d'une éprouvette entaillée, on doit déterminer aux endroits les plus chargés le tenseur local variable en son équivalent uniaxial moyen et alterné. On suppose de plus que s'il y a plastification, elle n'est que locale : il existe un cycle de contrainte qui se stabilise et que l'on caractérisera par son tenseur moyen et son tenseur alterné ; le tenseur moyen peut donc être affectée par un état de contrainte initial (contraintes résiduelles) et par la plasticité en cas de dépassement local de la limite d'élasticité.

L'invariant pertinent du tenseur alterné est le second invariant de son déviateur, c'est-à-dire sa contrainte de von Mises. L'invariant pertinent du tenseur moyen est sa trace : en effet, des essais de torsion sur des éprouvettes axisymétriques démontrent, en l'absence de plasticité, que la fatigue en torsion n'est pas affectée par la torsion moyenne. Alors que la pression hydrostatique n'affecte pas la plasticité, elle réduit la durée de vie en fatigue quand elle est positive.

En cohérence avec les hypothèses ci-dessus, il est nécessaire d'obtenir un chargement périodique.

- Si le niveau de contrainte maximum au sens de Von Mises est faible (inférieur à 60% de la limite d'élasticité), un chargement cyclé en effort est effectué.
- Si le niveau de contrainte maximum au sens de Von Mises est supérieur, on effectue des essais en déformation imposée afin d'obtenir un cycle de contrainte-déformation stable lors du chargement périodique.

Aux cycles moyens et alternés stabilisés caractérisés par les invariants définis ci-dessus, on associe le nombre de cycles à rupture de l'essai de fatigue réalisé.

Les critères de fatigue consistent à combiner les deux invariants pour relier de façon biunivoque le scalaire ainsi défini au nombre de cycles à rupture.

Les courbes de fatigue relient de façon biunivoque le nombre de cycles à rupture à une amplitude de contrainte alternée, pour différents rapports de charge (ratio contrainte minimum sur contrainte maximum).

À partir de critère de fatigue, on peut relier une contrainte alternée effective au nombre de cycles à rupture, quel que soit le rapport de charge : on obtient une courbe unifiée.

Les essais de fatigue étant généralement effectués sur des éprouvettes lisses, la définition des invariants est évidente.

Pour un chargement quelconque, des décompositions plus ou moins justifiées (algorithme de type comptage rainflow) permettent d'obtenir des chargements cyclés équivalents.

On admet généralement que la période et la forme exacte des oscillations sont sans effet sur le nombre de cycles admissible. D'autre part, la résistance en fatigue peut être modifiée par de nombreux facteurs (état de surface, causes aléatoires, type de charge, température, concentration de contrainte,...), ce qui peut conduire à des études complémentaires.

Dans le domaine oligocyclique, on définit généralement les durées de vie avec la valeur moyenne moins trois écarts-types ($m - 3 \cdot \sigma$), ce qui correspond à une probabilité de 1/741 ou avec la définition B0.1 qui correspond à la probabilité 1/1000. Pour des procédés de fabrication maîtrisés comme ils le sont dans l'industrie aéronautique, un facteur 2,5 existe entre la valeur moyenne et la valeur minimale définie par $m - 3 \cdot \sigma$.

-En fatigue conventionnelle, la dispersion est supérieure à celle de la fatigue oligocyclique.

-La limite d'endurance *SaD* minimale vaut environ la moitié ou le tiers de la limite d'endurance moyenne.

Les facteurs secondaires (état de surface, contraintes résiduelles...) sont plus forts quand la durée de vie augmente.

I.7.3. Tenue à la fatigue par fissuration

A mesure que les événements physiques se succèdent, la capacité d'un système physique à les supporter diminue et le dommage subi augmente.

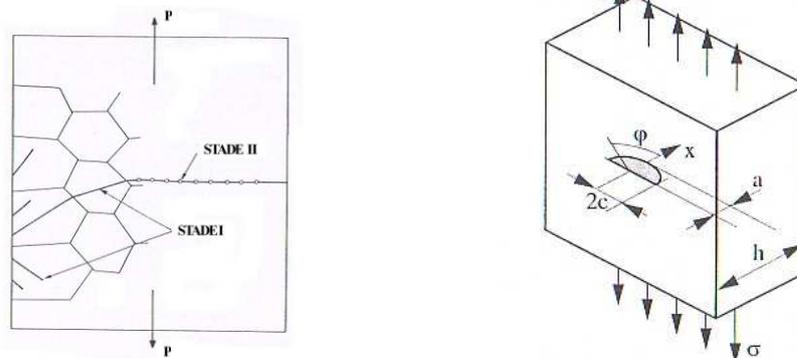
Le dommage, ou le niveau d'endommagement, est un nombre qui caractérise le degré d'avancement de la dégradation qui précède une défaillance. Historiquement cette notion a été introduite lors de l'étude de la fatigue des matériaux. Les défaillances sont dans ce cas des ruptures (traction, torsion, flexion...).

Une défaillance est un dysfonctionnement dont l'origine et la nature sont bien déterminés. Exemples : rupture d'une pièce en un site localisé, usure d'une région particulière d'une surface,... Une même pièce peut avoir plusieurs défaillances. Pour un système complexe, les défaillances sont celles de chacune de ses pièces ainsi que celles associées à l'assemblage des diverses parties [15].

Les récentes recherches sur les céramiques frittées ont surtout visé l'amélioration de la contrainte à la rupture et l'augmentation de la zone de déformation à la rupture, beaucoup trop faible ($< 0,1\%$). Deux approches principales semblent évidentes : d'une part optimiser les technologies de fabrication afin d'éliminer les défauts critiques (pores, inclusions) et d'autre part augmenter la ténacité de ces matériaux : recherche vers les composites fibreux et les matériaux à phases dispersées, par exemple des ajouts de particules métalliques. Par ailleurs, les conditions de fonctionnement en milieu physiologique font que les implants à base d'alumine ou autres matériaux sont souvent soumis à des chargements complexes de type fatigue - contact et de nature biaxiale ou triaxiale (figures 13a et 13b).

La conduite des essais de fatigue en laboratoire, devrait tenir compte de tous ces paramètres. En ce qui concerne les essais de fissuration sur l'alumine, le mode I de rupture supposée être le mode le plus dangereux pourra apporter certaines solutions aux problèmes de rupture de cette céramique. Pour simplifier le problème sur le plan expérimental, il est

admis que les chargements unidirectionnels appliqués à des éprouvettes planes de type CT ou DCT ou de flexion peuvent reproduire totalement ou partiellement les conditions réelles de chargement. Ces éprouvettes peuvent être lisses (essais d'endurance) ou mêmes d'entailles appropriées (essais de fissuration) comme le montrent schématiquement les dessins des figures 13a et 13b. La solution finale du problème peut être une combinaison de plusieurs résultats expérimentaux.



Figures 13a et 13b : Etapes d'amorçage et de propagation de fissure sous chargement unidirectionnel (a) et exemple d'entaille de forme elliptique sur éprouvette plate (b).

I.7.4. Tenue à la fatigue par fluage

À haute température, le phénomène de fluage entraîne la déformation de la structure même si le chargement est constant. Sa combinaison avec la fatigue peut amplifier l'endommagement.

I.8. Modèles de propagation des fissures de fatigue

Vu le nombre élevé de paramètres physiques, mécaniques ou chimiques (milieu physiologique...) qui interviennent lors de l'amorçage et de la propagation des fissures, il existe aussi plusieurs modèles pour prédire la durée de vie à l'amorçage ou à la propagation des fissures de fatigue. Ces modèles sont élaborés sur des bases numériques, phénoménologiques, empiriques ou une combinaison des trois.

Sous chargement cyclique et avant la rupture finale (instable), un matériau ductile passe par trois régimes distincts et représentatifs de son comportement global de résistance à la fissuration (figure 14). Ces trois régimes sont associés au seuil de non-fissuration (A), à la propagation stable (B) et à la rupture instable (C). La description générale des diagrammes de fissuration fait intervenir la variation de la vitesse de propagation (da/dN) en fonction du facteur d'intensité de contrainte nominal ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$). Le taux de croissance de fissure, outre le facteur (ΔK), fait intervenir plusieurs autres paramètres tels que le rapport de chargement ($R = K_{min}/K_{max}$), le facteur d'intensité de contrainte maximal (K_{max}), l'environnement, le type de chargement, la fréquence...

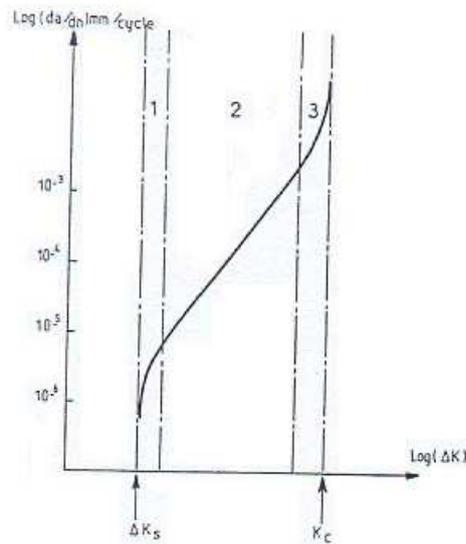


Figure 14 : Schéma représentatif des trois domaines (1, 2 et 3) caractérisant la propagation de fissure (da/dN) en fonction du facteur d'intensité de contrainte (ΔK).

Le nombre élevé de ces paramètres fait que les modèles de contrôle de la fissuration sur matériaux ductiles ou fragiles sont aussi multiples et variés. Ces modèles sont basés sur l'évolution du facteur (ΔK), ou sur le comportement de l'ouverture en fond de fissure ($CTOD$) ou par une description de la fermeture par le biais du facteur (ΔK_{eff}) ou aussi par une analyse énergétique basée sur le comportement de l'intégrale de Rice (ΔJ) sous chargement cyclique. Dans cette étude, nous nous limitons à décrire les trois premiers modèles.

I.9. Modèle de propagation basé sur l'évolution de (ΔK)

Pour des vitesses de propagation comprises entre 10^{-9} et 10^{-6} m/cycle (Régime B), Paris et Erdogan [22] proposaient une loi de fissuration basée sur une approche phénoménologique globale et définie par l'équation :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (7)$$

avec C et m sont des facteurs caractéristiques du matériau à tester.

La caractérisation de la fissuration de plusieurs types de matériaux à partir de l'équation de Paris a donné d'assez bons résultats en général comme le montrent les diagrammes de la figure 15. Nous observons sur ces diagrammes des comportements variés et très divers. Certaines de ces matériaux sont employés pour l'industrie biomédicale (Al_2O_3 , pyrolytic carbon...) pour l'industrie nucléaire (Acier inox-304 ...) ou pour l'industrie aéronautique (alliage d'aluminium 2090-T8 ...). Ces variations dépendent en grande partie de la

microstructure et des procédés de mise en œuvre des matériaux et des procédés de mise en œuvre des matériaux considérés. Certains de ces matériaux sont très fragiles ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) sont fragiles et ne présentent pas de seuil de non fissuration en comparaison avec l'alliage d'aluminium 2090-T8 ou l'alliage d'aluminium-lithium.

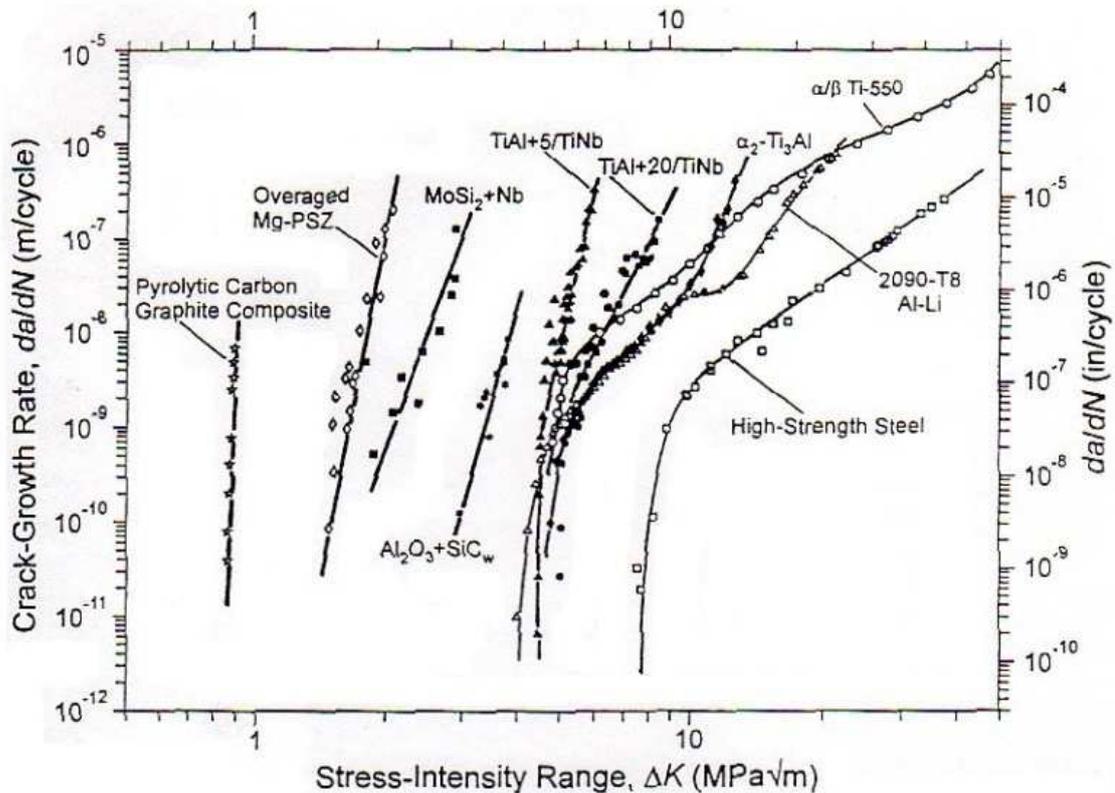


Figure 15 : Exemple de courbes de fissuration ($da/dN - \Delta K$) enregistrées sur des matériaux de types fragiles ou ductiles [36].

II. Application sur les biomatériaux pour une prothèse totale de hanche

II.1. Approche mécanique des essais

L'évaluation de la sûreté des prothèses ostéo-articulaires en biomatériaux soumises à des chargements de fatigue fait appel à des analyses de mécanique de la rupture prenant en compte l'existence de défauts ou de fissures dans les pièces constituant la prothèse. La connaissance des cinétiques de propagation de fissure dans ces pièces est nécessaire pour effectuer des analyses et comprendre les causes de rupture par fatigue. La conduite des essais de la vitesse de propagation de fissure, tient compte de l'évolution des moyens et méthodes d'essais [26].

En ce qui concerne les essais de fissuration sur les biomatériaux conduit selon le mode I de rupture supposée être le mode le plus dangereux pourront apporter certaines solutions aux problèmes de rupture et d'endommagement. Pour simplifier le problème sur le plan

expérimental, il est admis que les chargements unidirectionnels peuvent reproduire totalement ou partiellement les conditions réelles de chargement.

Les conduites des essais de fatigue en laboratoire des biomatériaux doivent s'approcher au maximum des conditions de service de ces produits en utilisant des équipements adéquats et une instrumentation de contrôle et de mesures bien adaptées (figure 16). Le coût très élevé des prothèses de hanche ne permet pas de vérifier sur des pièces réelles, les précisions établies à partir d'éprouvettes en biomatériaux à un coût nettement moindre.

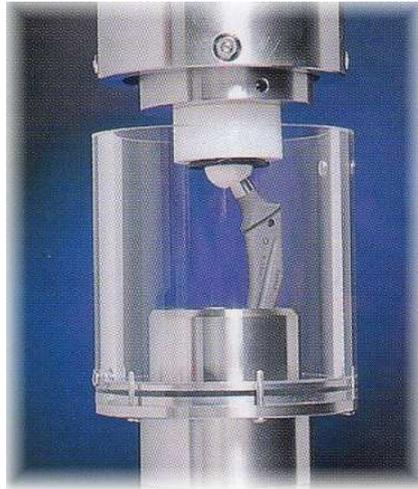


Figure 16 : Exemple de simulateur pour prothèse totale de hanche.

II.2. Analyse biomécanique de l'articulation de la hanche

Il est établi que la marche est cyclique aussi bien au niveau du déplacement squelettique que du fonctionnement musculaire pour chaque individu. Le cycle de marche se décompose en une phase d'appui et une phase oscillante. La phase d'appui peut se décomposer en 4 périodes successives :

a) La mise en charge (0-10%) est une période de décélération. Le transfert du poids du corps s'effectue de la jambe quittant l'appui à celle prenant l'appui. Au niveau de la hanche, les extenseurs de hanche (ischiojambiers, grand adducteur et grand fessier) sont actifs au contact initial pour stabiliser le membre inférieur et contrôler le moment externe de flexion de hanche. Ils agissent ainsi en absorbeurs du choc autour de la hanche sur la mise en charge.

b) Le milieu d'appui (10-30%) est le début de l'appui unipodal. La jambe supporte pleinement le poids du corps, il est nécessaire que la stabilité du membre inférieur soit assurée ainsi que la progression du membre controlatéral. Autour de la hanche, le grand fessier continue son travail d'extension, en diminuant son activité au fur et à mesure que le VRF se rapproche de l'articulation, adaptant son effort à la diminution du moment externe de flexion de hanche.

c) La fin d'appui (30-50%) est la période de fin d'appui unipodal. Elle débute par la verticalisation de la jambe opposée et se termine au contact talonnier controlatéral. Au niveau de la hanche, l'extension passive se poursuit sur toute la période, le tenseur du fascia lata servant à maintenir la position du VRF en arrière de la hanche.

d) La période préoscillante (50-60%) termine la phase d'appui du membre inférieur, c'est à nouveau une période de double appui, le transfert du poids du corps se faisant sur la jambe controlatérale au cours de cette période. Au niveau de la hanche, le droit antérieur se contracte concentriquement au début de la période, initiant le mouvement de flexion de hanche avec les muscles adducteurs. Le droit antérieur, bi-articulaire, absorbe donc de l'énergie au niveau du genou, qui est restituée au niveau de la hanche.

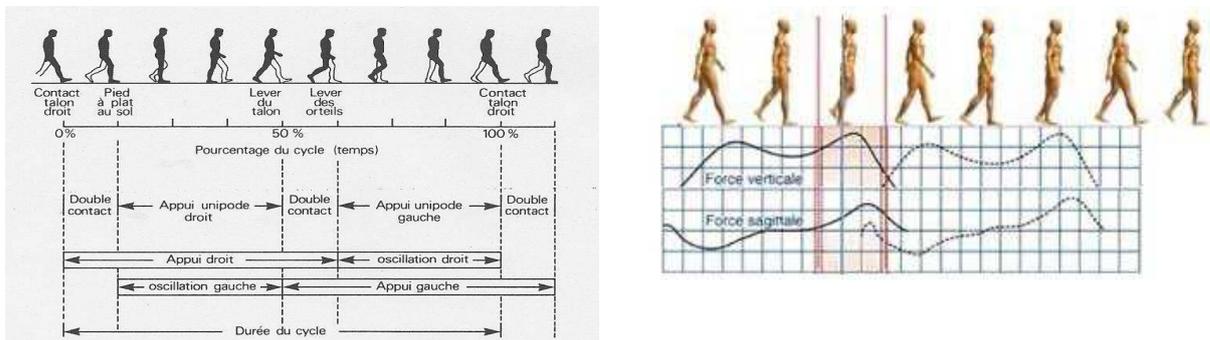


Figure 17 : Cycle de marche

Au cours de la marche, on enregistre sur l'appareil moteur une redistribution des efforts appliqués au système isolé. Dans le cas de l'appui unipodal selon Pauwels, la colonne de la balance (fémur, col et tête fémorales) supporte quatre fois le poids total du corps. L'extrémité interne du bras supporte une fois le poids et l'extrémité externe du fléau supporte quatre fois le poids (figure 18). Ainsi à chaque pas, la hanche normale supporte quatre fois le poids du corps soit environ 280 kg pour un adulte pesant 70 kg, ce qui représente en soit une force considérable.

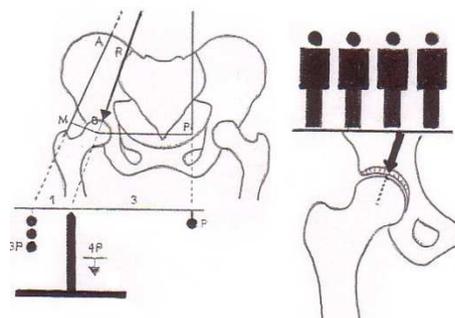


Figure 18 : -(a) Principe de la balance de Pauwels.

-(b) estimation de la charge physiologique appliquée à la liaison naturelle coxo-fémorale.

La réalisation d'une liaison artificielle doit satisfaire les critères de résistance (fatigue et rupture) et les conditions géométriques d'implantation (angles, diamètres...). Compte tenu du poids du corps, de l'angle d'application de cette charge (environ 16°) et de l'angle cervico-diaphysaire, le fémur est exposé à la force de pression résultant de ces différents facteurs auxquels viennent se superposer des efforts de flexion et de traction.

Généralement, dans les conditions normales, le fémur est exposé à des efforts de pression et à des efforts longitudinaux. Ce n'est qu'après l'implantation de la tige de prothèse que l'on voit apparaître des contraintes radiales supplémentaires et des efforts de traction périphérique sur l'os, dans la zone d'insertion de la prothèse dans le fémur (figure 19).

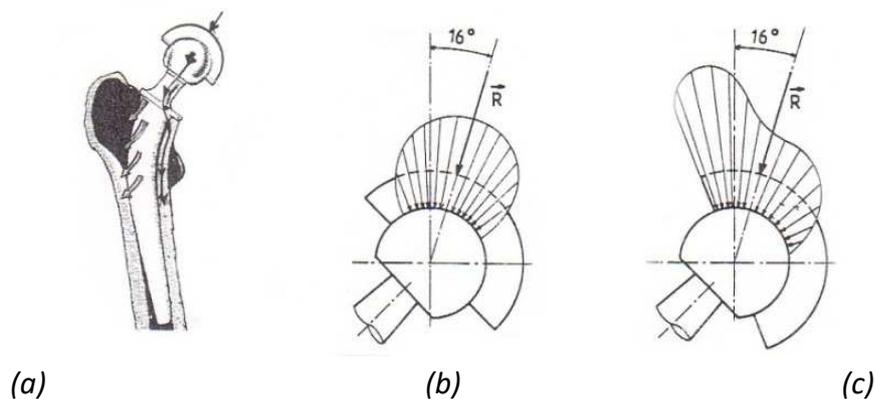


Figure 19 : -(a) Modèle de chargement appliqué au cotyle artificiel.
 -(b,c) concentration de la charge et distribution de la pression de contact à l'interface cotyle / tête de prothèse pour deux positions de la rotule [45].

L'intensité de ces efforts radiaux peut augmenter considérablement, si la surface d'appui supérieure n'existait pas (liaison conique). Ces efforts non physiologiques pourraient conduire à l'élargissement du tube osseux.

- Le contact au niveau de la liaison rotule artificielle doit permettre un jeu de fonctionnement (J) conduisant à une force de contact (R) supposée ponctuelle ;
- L'ancrage de la queue de la PTH doit assurer un maximum de stabilité pour éviter le problème de descellement et garantir une structure saine de l'os fémoral.

Conclusion générale

Le choix de bons matériaux revêt une importance toute particulière. On a cru pendant longtemps qu'il fallait, avant tout, rechercher des matériaux possédant une résistance à la déformation la plus élevée possible. Puis, progressivement, dans de nombreux cas, on a dû s'employer à rechercher des biomatériaux présentant un meilleur compromis entre leur résistance et leur biocompatibilité ou, de façon plus générale, leur tenue à la fatigue. Par ailleurs, surdimensionner n'est pas non plus une bonne solution.

Pendant longtemps, l'orthopédie s'est servie du plâtre pour soigner les fractures et traiter les déformations, mais dès que les métaux ont été utilisés dans le corps humain pour en remplacer une partie absente ou détruite, l'orthopédie connaît un immense développement.

Bien qu'il existe des allergies à certains métaux pris individuellement, le chrome et le cobalt en particulier, ces manifestations allergiques n'ont été signalées que dans le cas d'une application cutanée. À l'heure actuelle, aucune allergie aux pièces prothétiques métalliques ou non n'a été notée, et il n'y a donc pas de risque de rejet par un mécanisme allergique.

L'alumine, la biocéramique la plus utilisée en orthopédie, présente une remarquable biocompatibilité et entraîne dix fois moins de débris de polyéthylène par frottement que ne le ferait un métal dans les mêmes circonstances. La céramique n'est pour l'instant que peu utilisée pour les prothèses du genou et de hanche, car il est difficile de réaliser des formes complexes en céramique à des prix concurrentiels.

Il a été constaté que les biomatériaux d'origine marine ainsi que ceux dérivant avaient des propriétés ostéoconductrices quand ils forment un réseau tridimensionnel poreux permettant la colonisation cellulaire et la déposition osseuse. La recherche actuelle sur les substituts osseux est principalement axée sur les biomatériaux composites.

L'étude de la tenue en service des implants orthopédiques peut être faite sur des implants temporaires (plaques, clous, vis...) qui sont normalement retirés lorsque leur présence n'est plus indispensable et sur des implants permanents, lorsqu'on a pu les récupérer soit en cas d'échec de la prothèse, soit après le décès des patients.

Les problèmes d'échec en service des biomatériaux sont particulièrement liés au descellement des implants cimentés, à l'usure de certains matériaux (polyéthylène...) et leur faible tenue à la fatigue (alumine...) et à la corrosion (biomatériaux métalliques...)

A travers ces quelques exemples de la tenue en service des biomatériaux pour prothèse, nous avons montré que les principales causes d'échec des matériaux étaient liées à une connaissance encore insuffisante des propriétés des biomatériaux utilisés.

Les problèmes d'usure du polyéthylène révèlent que des progrès ne seront faits que lorsqu'on aura amélioré les caractéristiques du matériau, tout en modifiant le dessin des pièces. L'introduction des céramiques qui diminue l'amplitude de l'usure ne l'a pas pour autant supprimée et, tant que la fragilité de ces matériaux ne sera pas atténuée, les risques d'accidents seront encore à craindre. L'expérience sur les matériaux composites carbonés est encore insuffisante et seule une expérimentation rigoureusement contrôlée permettra de dire si les avantages espérés de ces nouveaux matériaux ne sont pas accompagnés de graves inconvénients liés à une éventuelle fragmentation des fibres.

Pour les alliages métalliques pour lesquels on connaît bien les liens entre les propriétés et la structure que l'on peut faire varier par des traitements thermomécaniques, l'analyse du comportement en service des pièces montre que la résistance à la fatigue-corrosion devrait être étudiée dans des conditions expérimentales telles qu'il serait plus facile de comparer objectivement les avantages et les inconvénients des divers alliages proposés.

Références bibliographiques

[1] D. Mainnard, M. Merle, J.P. delagoutte et J.P. Louis, Actualités en Biomatériaux, éditions Romillat, Volume II, 1993.

- [2] M. Haïdopoulos et D. Mantovani, Docteur, mon spécialiste m'a proposé l'implantation d'une prothèse du genou. Qu'est-ce que vous en pensez? Le Médecin du Québec, volume 38, numéro 7, juillet 2003.
- [3] J. M. Meyer, Dégradation des biomatériaux, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [4] F. Langlais, Prothèses articulaires : facteurs biologiques et mécaniques de tolérance, Cahier d'enseignement de la SOFCOT : 1983, conférences d'enseignement, 2^{ème} série, pp. 15à42.
- [5] P. Boutin et D. Blanquaert, Les nouveaux matériaux utilisés dans les prothèses totales de hanche, Document de formation CERAVÉR.
- [6] L. Sedel, L'alumine en chirurgie orthopédique, Extrait de "cahiers d'enseignement de la SOFCOT, N°25 Biomatériaux en chirurgie orthopédique - Expo. Sci. Française.
- [7] S. Hamza et al., Comportement à la fatigue cyclique de disques en biocéramiques sollicités en compression diamétrale, Mécanique & Industries, 6, 145–154 (2005) , EDP Sciences.
- [8] M. F. Ashby, D. R. H Jones, Matériaux I : Propriétés et application.
- [9] Mechanical Testing, Volume 8, ASM International, The Materials Information Society.
- [10] R. O. Ritchie, Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids, International Journal of Fracture 00: pp1-29, 1998.
- [11] C. Batias et J.P. Bailon, La fatigue des matériaux et des structures, 2^{ème} édition revue et augmentée, édition Hermes, 1997.
- [12] R. H. Dauskardt, M. R. James, J. R. Porter and R. O. Ritchie, " Cyclic Fatigue-Crack Growth in a Sic-Whisker-Reinforced Alumina Ceramic Composite: Long-and Small-Crack Behavior" J. Am. Ceram Soc., vol. 75 n°4 pp759-771 (1992).
- [13] G. Pluvinage, Mécanique élastoplastique de la rupture- Critères d'amorçage, Edition CEPADUES.
- [14] P. S. Christel, A. Meunier, D. Blanquaert, L. Sedel, J. Witvoet, "Stress distribution in five femoral protheses of different design and material", 8th Annual Meeting of the Society for Biomaterials Walt Disney World, April 24-27, 1982, p136.
- [15] A. A. Griffith, the teory of rupture. Proceedings of the first international congress of applied mechanics, Delph 1924, p55-63.
- [16] G. R. Irwin, relation of stresses near a crack to teh crack extension force. International congress of applied mechanics. Bruxelles 1926, p245.
- [17] H. M. Westergaard, Bearing pressures and crack. Journal of applied mechanics, juin 1939, p49.
- [18] G. R. Irwin, analysis of stresses and strains near teh end of a crack traversing a plate. Journal of applied mechanics, sept. 1957, p1939.
- [19] W. Elber, equivalent constant amplitude concept for crack growth spectrum loading ASTM, STP 595, p. 236 à 250, 1976.
- [20] C.L. Vaughan, B.L. Davis, J.C. O'Connor (1992) Dynamics of human gait. Human Kinetics Publishers.
- [21] P.C. Paris, The fracture mechanics approach to fatigue, Fatigue an interdisciplinary approach- syracuse university Press, syracuse (1964).
- [22] Erdogan, A critical Analysis of crack propoagation laws. Trans ASME, J. Bas Eng. , 85, p 528-534 (1963).
- [23] H. Smith et P. Shahinian, Environmental effects on fatigue-crack growth rates in silver, Journal of the institute of metals, 99, p243, 1971.
- [24] R. O. Ritchie, Mechanisms of fatigue-crack propagation in ductile and brittle solids, International Journal of Fracture 00: pp1-29, 1998.
- [25] P.C. Paris, The fracture mechanics approach to fatigue, Fatigue, an interdisciplinary approach. - Syracuse University Press, Syracuse (1964).

Chapitre : 3

Fatigue fissuration & fatigue endurance

Sommaire

1. Introduction
2. Propagation des fissures de fatigue
 - 2.1. Essais de fissuration
 - 2.2. Mode de fissuration
 - 2.3. Facteur d'intensité de contrainte
 - 2.4. Lois de propagation expérimentales
 - 2.5. Durée de vie d'une structure
 - 2.6. Approche en durée de vie
 - 2.7. Approche en tolérance aux dommages (1970)
 - 2.8. Endommagement en pointe de fissure
 - 2.9. Mécanisme de propagation
 - 2.10. Influence de l'environnement
 - 2.11. Importance des caractéristiques métallurgiques
 - 2.12. Lois de propagation théoriques
3. Durée de vie en fatigue - Endurance
 - 3.1. Chargement standard
 - 3.2. Diagramme d'endurance (de Wöhler, S-N)
 - 3.3. Rapport d'endurance
 - 3.4. Aspect statistique
 - 3.5. Loi de Wöhler
 - 3.6. Données nécessaires pour l'analyse

1. Introduction

La problématique de la fatigue des structures est issue de la révolution industrielle du XIX^{ème} siècle. Plus précisément c'est un certain nombre de graves accidents (ferroviaires pour la plupart) qui ont incité les ingénieurs à se pencher sur le sujet. La rupture brutale d'éléments mécaniques soumis à des charges cycliques, tels que les essieux sur le matériel roulant, a été un sujet d'étude de William John Macquorn Rankine en Angleterre dès 1843 ou Andreas Wohler en Allemagne dès 1847.

William Rankine a en particulier travaillé sur la "catastrophe ferrovière de Meudon". Cet accident qui a eu lieu le 8 mai 1842 à Meudon, entre Versailles et Paris, a causé la mort de plus de 50 passagers. Parmi les victimes on compte l'explorateur Jules Dumont Durville. La catastrophe ferroviaire de Meudon est le premier accident ferroviaire en France, en l'un des premiers au monde. Rankine a alors montré que la propagation soudaine de fissures avait causé la rupture d'un essieu et que ces fissures naissaient au niveau des zones de concentration de contrainte.

A l'époque il y avait une grande confusion concernant les effets microstructurels des concentrations de contraintes. Une théorie qui avait court supposait une re-crystallisation particulière des zones sous contrainte, donnant ainsi naissance à des régions affaiblies. Cette théorie a été définitivement écartée quelques années après les travaux de Rankine.

Depuis les premiers travaux de Wohler et Rankine, de nombreux modèles mathématiques ont été développés et dès les années 1920 la fatigue des métaux devient un domaine scientifique à part entière.

Le présent chapitre intitulé "Fatigue des structures" présente une vue d'ensemble de la problématique ainsi que des solutions qui ont été développées en vue de déterminer la résistance en fatigue d'une structure ou d'en garantir sa sécurité en fonctionnement.

Un essai de propagation de fissure est un essai de fatigue dans lequel on étudie la propagation d'une fissure au sein d'un matériau. Dans les performances des pièces industrielles la résistance au déchirement est en effet l'une des données clés attendues pour en évaluer la fiabilité et la longévité.

Des sollicitations de nature différentes peuvent provoquer une rupture en fatigue :

- Efforts mécaniques externes (fatigue mécanique)
- Contraintes thermique (fatigue thermique), qui se caractérise par un réseau de fissures de surface appelé faïençage
- Sollicitations répétée en présence d'un milieu corrosif (fatigue-corrosion)

Généralement les ruptures en fatigue se produisent suite à des sollicitations répétées dont le maximum est largement inférieur à la résistance en statique du matériau. Le phénomène se produit sans modifications du comportement macroscopique du matériau, rendant ce mode d'endommagement particulièrement sournois.



Figure 1 : Essais de fatigue sur l'aile du F/A-18.



Figure 2 : A400M wing passes critical test



Figure 3 : réacteur d'avion A380



Figure 4 : Machine de fatigue fluage

2. Propagation des fissures de fatigue

La durée de vie en fatigue se décompose en deux composantes, la durée d'amorçage et la durée de propagation. Tout matériau étant susceptible de comporter des défauts (inclusions, microfissures, zones de déformation plastique, concentrations de contraintes, corrosion,...) on doit dans la pratique tenir compte de leur durée de propagation.

Cette dernière dépend, entre autre, de paramètres matériaux que l'on peut déterminer par des essais en laboratoire.

2.1. Essais de fissuration

Typiquement ces essais se font sur une tôle avec une fissure centrale (Center Crack Tension) chargée en traction oscillante. On mesure l'évolution de la longueur de la fente ($2a$) en fonction du nombre de cycles. Cette longueur se mesure soit optiquement soit en fonction de paramètres électriques.

Pour chaque niveau de chargement on peut ainsi en déduire une vitesse de propagation da/dN en fonction de la longueur de la fissure. Sous cette forme les résultats d'essais de fissurations ne sont pas facilement exploitables, puisque qu'ils sont fonction de la taille de la fente et des conditions d'essai (amplitude de contrainte, géométrie,...). On verra ci-dessous une expression plus générique de ce type de résultats, grâce à l'utilisation du facteur d'intensité de contrainte K .



Figure 5 : Montage de l'éprouvette de fissuration sur une machine MTS de fatigue.

2.2. Mode de fissuration

Généralement la fissure se propage de manière perpendiculaire à la force macroscopique appliquée sur le matériau, il s'agit du mode I. Le chemin de fissuration peut cependant évoluer suivant d'autres directions, en cisaillement dans le plan pour le mode II, et en cisaillement hors plan pour le mode III.

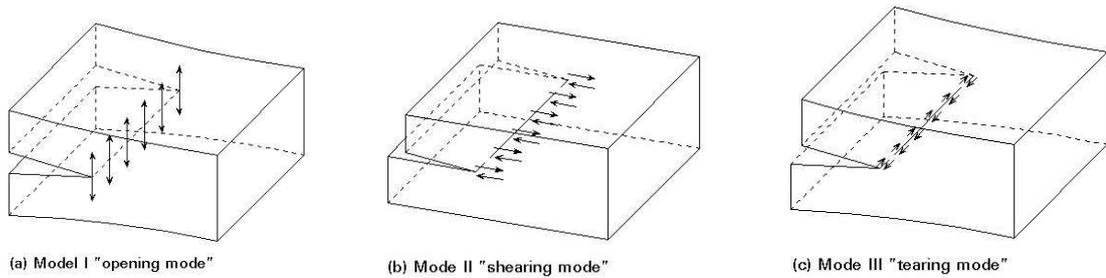


Figure 6 : Mode de fissuration

2.3. Facteur d'intensité de contrainte

La théorie de l'élasticité permet de développer une formulation analytique pour la contrainte dans la région de la pointe de fissure. Les composants du tenseur σ peuvent s'écrire sous la forme :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

K est le facteur d'intensité de contrainte défini par la relation :

$$K = Y S \sqrt{\pi a}$$

où S est la contrainte à l'infini et a est la longueur de la demi-fente. Y est un facteur de correction géométrique.

Dans le mode I la fissure se propage lorsque l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons atomiques est inférieure à l'énergie élastique relaxée par la propagation de la fissure. Cela correspond à un facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} .

La variation du facteur d'intensité de contrainte en mode I de rupture est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta K_I = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

2.4. Lois de propagation expérimentales

Paris et al. ont montré que la loi de propagation des fissures peut se réduire à une formulation générique si l'on introduit un nouveau paramètre : l'amplitude du facteur de concentration des contraintes $\Delta K = K_{max} - K_{min}$. Ainsi on observe la similarité des courbes da/dN en fonction de N pour tout essai, pour autant que le ΔK soit identique.

On peut exprimer ΔK en fonction du rapport de charge :

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \beta (S_{max} - S_{min})\sqrt{\pi a} = \beta S_{max}(1 - R)\sqrt{\pi a} = K_{max}(1 - R)$$

Evolution du diagramme (a,N)

En se basant sur les résultats des mesures de la propagation de fissure l'évolution de la longueur des fissures (a_i) en fonction du nombre de cycles N_i suit des branches paraboliques comme le montre le diagramme de la figure suivante.

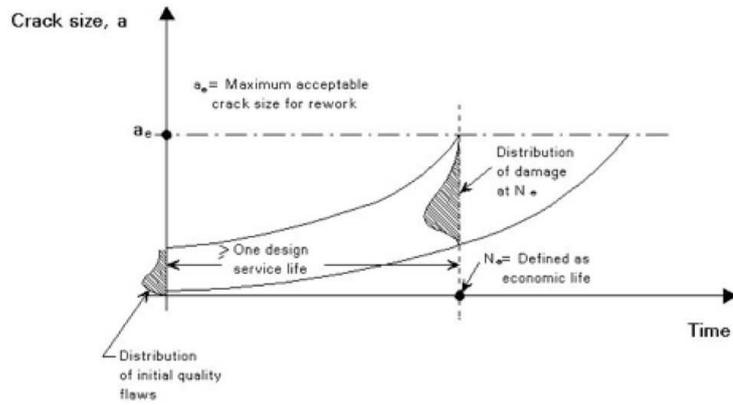


Figure 7 : Diagramme (longueur de fissure (a), nombre de cycles (N))

Après avoir relevé les longueurs de fissures et le nombre de cycles correspondant à chaque longueur, la vitesse de fissuration est calculée par la méthode dite des sécants, qui consiste à choisir trois couples définis par (a_{i+1}, N_{i+1}) , (a_i, N_i) et (a_{i-1}, N_{i-1}) , pour déterminer la vitesse de fissuration à la longueur a_i telle que :

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_i = \frac{1}{2} \left(\frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} + \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}} \right)$$

Une fois les couple $(da/dN)_i$; $(\Delta K)_i$ calculés, ils sont reports sur un diagramme en coordonnées bilogarithmiques (Un repère log-log est un repère dans lequel les deux axes sont gradués selon une échelle logarithmique.).

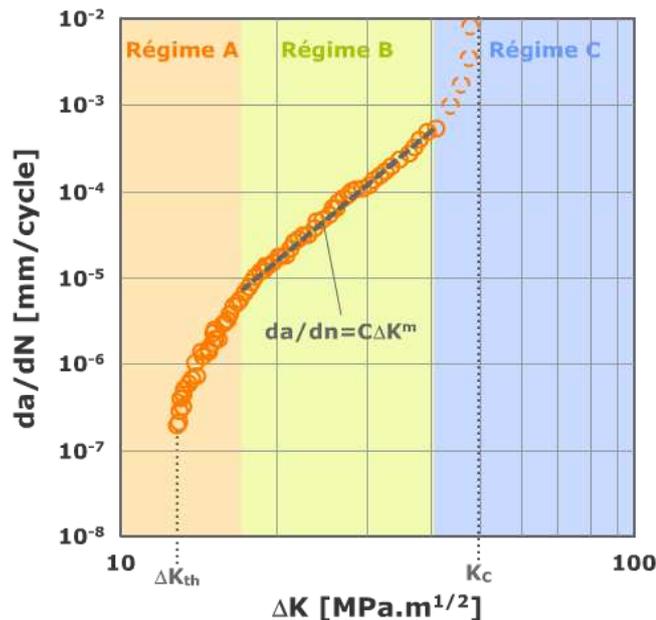


Figure 8 : Diagramme da/dN

La surface de rupture se caractérise généralement par trois domaines (I, II et III) - Site d'amorçage - Zone de propagation - Surface de rupture finale Une « lèvres de cisaillement » sépare la « zone de propagation » et la « surface de rupture finale »

Stade I – Pour de faibles valeurs de ΔK on observe une rapide décroissance de la vitesse de propagation jusqu'à une valeur seuil de ΔK correspondant à la limite où la progression de la

fissure n'est plus mesurable ΔK_{seuil} . Dans ce domaine la microstructure, le rapport de charge et l'environnement ont une influence sur la vitesse de progression. Pour des valeurs de ΔK inférieures à ΔK_{seuil} les cracks sont considérés comme dormants.

Stade II – Domaine de Paris - Pour des valeurs intermédiaires de ΔK la courbe présente une partie linéaire, correspondant à une évolution des vitesses de fissuration selon la loi expérimentale de Paris :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

Lorsqu'une fissure principale se dégage elle aura alors tendance à se propager selon une direction perpendiculaire à la direction d'application de la charge (stade II).

Stade III – Lorsque ΔK augmente et que K_{max} approche le paramètre de ténacité K_c du matériau la vitesse de propagation s'accélère et entraîne une rupture rapide. En pratique, ce domaine n'a pas une grande importance puisque les structures sont généralement dimensionnées pour éviter de fonctionner dans ce domaine.

Rôle des joints de grain :

Les joints de grain peuvent constituer des barrières ou des chemins de fissuration préférentiels (en particulier à haute température et en milieu corrosif).

Différents auteurs ont proposés des variations sur la loi empiriques de Paris afin de rendre compte de l'effet de différents paramètres, en particulier le rapport de charge R (loi de Walker, loi de Forman). La loi NASGRO, développée conjointement par la NASA, le NLR et l'ESA, permet une description complètes des 3 domaines de la courbe da/dN . Elle nécessite cependant de nombreux et longs tests pour déterminer tous les paramètres intervenant dans la loi NASGRO.

Détermination des coefficients m et C de la loi de Paris

Les prédictions de durée de vie en fatigue ont pu réellement commencer lorsque Paul Paris s'aperçu que les relevés de vitesse de propagation de fissures (da/dN) étaient reliés à l'amplitude du facteur d'intensité des contraintes ($K = K_{max} - K_{min}$). En traçant $da/dN = f(\Delta K)$ en échelle log-log, il obtint des droites pour de nombreux matériaux :

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log(\Delta K) + \log(C)$$

ou encore sous la forme la plus connue :

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

m : sera la pente de la droite dans le stade de propagation et $\log(C)$ est l'Intersection avec l'axe des abscisses.

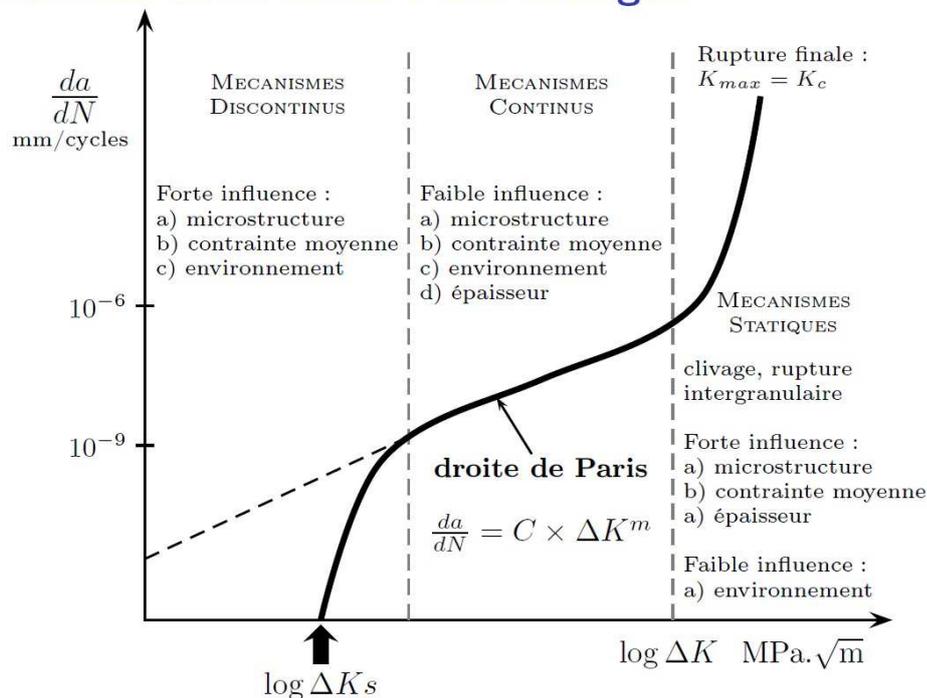
En utilisant $K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}$ et en séparant les variables a et N on peut alors calculer la durée de vie restante N_f pour la structure :

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C (Y \sigma \sqrt{\pi a})^m}$$

Valeurs limites ΔK_s et K_{Ic}

Matériau	K_{Ic} (MPa. \sqrt{m})	ΔK_s (MPa. \sqrt{m})
acier haute résistance (ex : 35NCD16)	60	1 à 4
acier moyenne résistance (ex : 15MND6)...		
... (basse température)	40	3
... ($T > T_{trans}$)	200	8
alliages d'aluminium (ex : 7075)	30	1,5 à 4
alliages de titane (ex : TA6V)	80	2 à 8
composite verre-résine	7	
polyéthylène	6,5	
polystyrène	0,4	
résine époxyde	0,1	
verre	0,01	

Limites de la loi de Paris-Erdogan



2.5. Durée de vie d'une structure

Définitions : Durée de vie totale = durée de vie à l'amorçage + durée de vie en propagation;
 $(N_t) = (N_a) + (N_p)$

Suivant la durée de vie visée, le type de matériau, sa géométrie et les conditions de sollicitation, l'un ou l'autre des states de rupture peut devenir prépondérant.

Dans le domaine de la fatigue à grand nombre de cycles (endurance) les sollicitations sont telles que le matériau reste dans le domaine élastique.

Dans le domaine de la fatigue à faible nombre de cycles (oligocyclique) les contraintes sont généralement suffisamment élevées pour engendrer des déformations plastiques

2.6. Approche en durée de vie

Durée de vie totale = nbre de cycles pour former un fissure principale + nbre de cycle pour

que ce défaut propage jusqu'à rupture finale.

Deux concepts : Durée de vie sûr (Safe Life) - 1950 : On estime alors le temps d'amorçage des fissures (déterminé expérimentalement ou par calculs). Selon cette approche un composant est remplacé avant de développer des fissures en fatigue.

Redondance (Fail Safe) - 1960 : Une structure endommagée doit pouvoir supporter un niveau de chargement sévère multiplié par un coefficient de sécurité. Des inspections périodiques doivent permettre le remplacement de l'élément défaillant.

2.7. Approche en tolérance aux dommages (1970)

On suppose que tout matériau contient un défaut (soit préexistant, soit créé en service). La durée de vie est alors définie comme le nombre de cycles nécessaires pour faire propager ce défaut jusqu'à une taille critique. On définit ainsi des intervalles d'inspection réalisée avec des contrôles non destructifs.

2.8. Endommagement en pointe de fissure

Si on considère une fissuration en mode I, la théorie de l'élasticité nous donne le champ de contrainte aux environs de la pointe de la fissure qui se réduit, lorsque $\vartheta=0$ (i.e. dans le plan de propagation de la fissure) à l'expression :

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

D'après cette relation la contrainte tend vers l'infini lorsque r tend vers 0. En réalité il y a un moment où la contrainte dépasse la limite élastique et on observe la formation d'une zone plastique, avec redistribution des contraintes locales. Des analyses microstructurales ou des simulations par éléments finis montrent que la zone plastifiée a une géométrie complexe, avec des branches rayonnant depuis la pointe de fissure.

2.9. Mécanisme de propagation

Les ruptures en fatigue présentent généralement des stries sur la surface de fracture. Cependant ces stries ne sont pas présentes lorsque la rupture se passe sous vide. Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer la formation de ces stries, dont le modèle de Laird ou celui de Pelloux. Ce mécanisme concerne le domaine II (domaine de Paris).

Proche du seuil les mécanismes sont différents, à ce niveau on n'observe plus de stries ; la distance de propagation par cycle déduite des valeurs macroscopiques est alors de l'ordre des distances interatomiques. La propagation est alors discontinue et régie par d'autres mécanismes (transgranulaires, ou selon des plans cristallographiques simples).

2.10. Influence de l'environnement

Pour la plupart des métaux les essais en fatigue effectués en atmosphère inerte donnent des vitesses de propagation inférieures à celles obtenues dans un environnement actif, tel que l'air. L'humidité contenue dans l'atmosphère est considérée être à l'origine de ce phénomène. Les molécules d'eau absorbées sur la surface de rupture se dissocient, l'hydrogène pénètre dans le matériau et fragilise le métal.

Un milieu corrosif engendre différentes formes de perte de résistance à la fissuration, l'effet dépend de la température et du matériau testé.

2.11. Importance des caractéristiques métallurgiques

La taille des grains, la présence de précipités, leur tailles et répartition sont autant de facteurs qui influencent la propagation d'une fracture, essentiellement au niveau du seuil. En particulier une augmentation de la taille des grains entraîne une augmentation du facteur ΔK_{seuil} .

2.12. Lois de propagation théoriques

Le grand nombre de facteurs intrinsèques (module de Young, limite d'élasticité, paramètres matériau) et extrinsèques (rapport de charge, milieu environnant, température, géométrie,...) influençant la cinétique de propagation des fissures rend très difficile l'élaboration d'un modèle théorique décrivant le phénomène de manière rigoureuse.

Certains modèles se basent sur le cumul de dommages (Weertman, Rice) d'autres sur les propriétés cycliques (Tomkins, McClintock, Lantaigne et Bailon) ou encore sur l'ouverture en fond de fissure.

3. Durée de vie en fatigue - Endurance

Afin de prévenir la rupture de pièces en service on effectue généralement des essais en laboratoire sur des éprouvettes de petite dimension soumises à des chargements simples. Les résultats permettent de déduire les conditions limites d'utilisation en nombre de cycles admissibles et contraintes admissibles.

La courbe $S-N$ d'un matériau définit les valeurs de contrainte alternée par rapport au nombre de cycles requis pour causer la rupture à un ratio de contraintes donné. L'illustration présente une courbe SN type. L'axe Y représente la contrainte alternée (S) et l'axe X représente le nombre des cycles (N). Une courbe $S-N$ est basée sur le ratio des contraintes ou la contrainte moyenne.

Les courbes $S-N$ sont basées sur la durée de vie en fatigue moyenne ou sur une probabilité donnée de rupture. La génération d'une courbe $S-N$ pour un matériau requiert plusieurs tests afin de varier statistiquement la contrainte alternée, la contrainte moyenne (ou ratio des contraintes) et de compter le nombre de cycles.

Les tests de génération de courbes $S-N$ sont exécutés dans un environnement de chargement contrôlé. En général, un chargement uniaxial est utilisé durant les tests. Mais comme l'environnement de chargement réel est généralement multiaxial, une correction peut être requise.

3.1. Chargement standard

La charge appliquée lors d'essais en fatigue est typiquement :

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin (wt)$$

Où σ_m est la contrainte moyenne et σ_a est l'amplitude de la contrainte, qui varie entre σ_{min} et σ_{max}

Le rapport de charge R est alors défini par $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$

3.2. Diagramme d'endurance (de Wöhler, S-N)

Le diagramme d'endurance, également appelé diagramme de Wöhler ou courbe S-N, représente la contrainte alternative nécessaire pour engendrer la rupture à N_f cycle (on considère le cas de chargements alternés symétriques).

Globalement ces diagrammes comportent trois zones :

- Le domaine de fatigue oligocyclique : rupture avant 10^4 cycles, déformation plastique.
- La zone d'endurance limitée : env. 10^4 à 10^6 cycles suivant le niveau de contrainte. Pas de déformation plastique macroscopique dans ce domaine.
- Une zone d'endurance illimitée : généralement on observe une contrainte σ_D en-dessous de laquelle il n'y a pas de rupture (avec asymptote : limite de fatigue à N fixé : limite d'endurance).

Les essais sont très longs : 10^8 cycles à 10 Hz \approx 27778 h > 3 ans !

Rq : En l'absence d'essais on utilise la résistance en traction (σ_m). Limite d'endurance à 10^7 cycles en uniaxial : 50% de (σ_m) (aciers), 35% de σ_m (alliages Al).

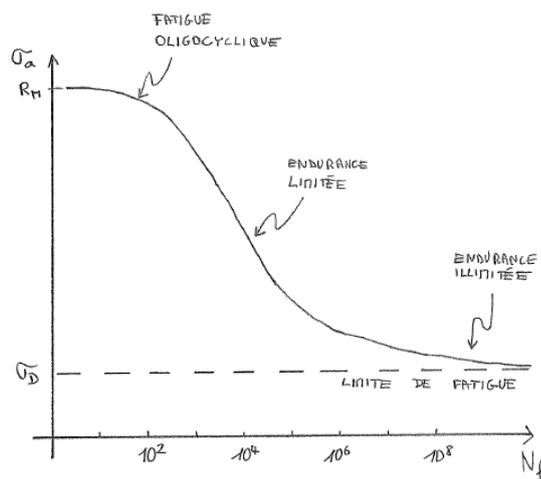


Figure 9 : Diagramme de Wöhler

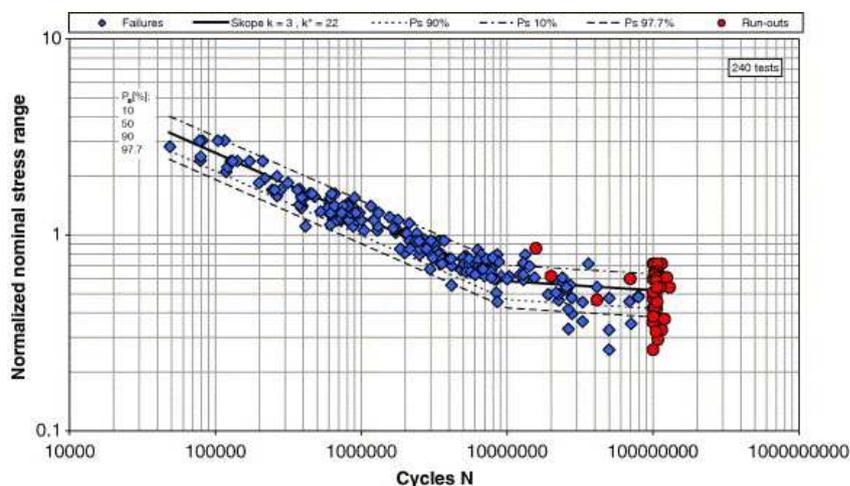


Figure.10. Overall normalized evaluation and comparison with the proposed course of the SN-curve for welded steel joints.

3.3. Rapport d'endurance

On définit le rapport d'endurance par la relation σ_D/R_m , où R_m est la résistance à la traction.

3.4. Aspect statistique

Les résultats d'un essai en fatigue présente une grande dispersion. Des échantillons apparemment identiques testés dans les mêmes conditions présentent une durée de vie qui peut varier sensiblement. Une analyse statistique est donc nécessaire afin de déterminer une durée de vie moyenne pour chaque cas de charge et tracer la courbe qui relie la charge cyclique et le nombre de cycle à la rupture.

Cette dispersion peut s'expliquer par différents facteurs :

- Liés au matériau (inclusions, porosité, inhomogénéité,...)
- Liés à la préparation des éprouvettes (rugosité, écrouissage, ...)
- Liés à l'environnement (montage de l'éprouvette, variations du testeur, corrosion,...)

3.5. Loi de Wöhler

Historiquement le premier modèle mathématique donnant la contrainte σ_a provoquant une rupture après N cycles a été proposé par Wöhler :

$$\sigma_a = \frac{a - \log(N)}{b}$$

où a et b sont des paramètres dépendant du matériau.

Dans le cas du dimensionnement en durée de vie totale on s'assure que le composant mécanique survivra durant l'intégralité de sa durée de vie. La rupture prévue (par exemple par la détermination d'un diagramme de Wöhler) ne se produit que bien au-delà de la durée d'exploitation du composant. Cette approche est généralement coûteuse et nécessite de très nombreux essais en fatigue pour la détermination du diagramme d'endurance (de Wöhler).

3.6. Données nécessaires pour l'analyse

Matériau

Ténacité K_c

Loi de propagation da/dN

Géométrie

Facteur géométrique $\beta=\beta(a)$ Pour des configurations standards, ce facteur géométrique est donné sous forme de relations analytiques. Pour des cas plus complexe il peut également être calculé dans le cadre de simulations par éléments finis.

Chargement

σ_{min} et σ_{max} pour les zones critiques que l'on souhaite analyser.

Certain modèle peuvent nécessiter d'autres paramètres tels que la limite élastique, fréquence, rapport de charge etc...

Caractéristiques des métaux :

Ténacité : propriété d'un matériau de résister à la rupture fragile et à la propagation des fissures

Résilience : aptitude à la résistance aux chocs ; elle est caractérisée par l'essai de choc et s'exprime en joule par cm²

Dureté : aptitude à la résistance à la pénétration, au poinçonnement

Ductilité : caractère d'un matériau qui se déforme avant de se rompre (opposé à fragile); aptitude à être étiré ou réduit en fils

Fragilité : propriété d'un matériau à se rompre sans déformation préalable.

Usinabilité : aptitude à être façonné par l'action d'outils de coupe

Endurance: résistance aux efforts alternés (fatigue)

Elasticité : propriété d'un matériau à se déformer dans une direction donnée de manière proportionnelle et réversible à la contrainte qui lui est appliqué dans cette direction

Plasticité : aptitude à prendre une forme quelconque et de la conserver. Inverse de l'élasticité

Malléabilité : aptitude à être façonné à froid ou à chaud, et notamment à être converti en feuilles minces

Fusibilité : aptitude à passer d'un état solide à un état liquide sous l'action de la chaleur

Coulabilité : aptitude à être fluide à l'état fondu

Bibliographie

-http://www.simulationmateriaux.com/Fatigue/fatigue_des_structures-duree_de_vie_en_fatigue-endurance.php

- http://help.solidworks.com/2012/French/SolidWorks/cworks/S-N_Curve.htm

Chapitre : 4

Généralités sur les biomatériaux

4^{ème} année Instrumentation et Maintenance Industrielle (IMI₄)

Sommaire

1. *Introduction*
2. *Les champs d'application des biomatériaux*
3. *Classes des biomatériaux*
 - 3.1. *Les biomatériaux métalliques*
 - 3.2. *Les biomatériaux inorganiques non métalliques*
 - 3.3. *Les polymères synthétiques*
 - 3.4. *Les composites biomédicaux*
 - 3.5. *Les biomatériaux d'origine biologique*
 - 3.6. *Les nanobiomatériaux*
4. *Conclusion*

1. Introduction aux biomatériaux

Il ne peut sans doute pas exister une définition totalement satisfaisante des biomatériaux. Selon la définition du consensus de Chester (1991) : «*Les biomatériaux sont des matériaux destinés à être en contact avec les tissus vivants et/ou les fluides biologiques pour évaluer, traiter modifier les normes ou remplacer tout tissu, organe ou fonction du corps*».

Le domaine des biomatériaux, notamment les alliages à mémoire de forme (AMF), les polymères biodégradables, les biocéramiques, les bioverres et les nanobiomatériaux constituent des axes de recherche stratégiques et hautement prioritaires pour l'industrie de la santé. Ils représentent, au niveau international, un enjeu économique important.

Une première génération de biomatériaux comprenait, jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, des métaux et alliages résistants à la corrosion utilisés en chirurgie dentaire et ultérieurement en chirurgie orthopédique. Les tissus ou tricots de polyester ont été utilisés en 1950 comme matériaux de prothèse vasculaire. C'est secondairement que les propriétés de résistance à la corrosion, aux contraintes mécaniques, à l'usure et à la rupture, ainsi que leur relative inertie vis-à-vis des tissus vivants, ont été exploitées.

Après la seconde Guerre Mondiale, l'intérêt suscité par les propriétés des matières plastiques et leur faible coût a toutefois été tempéré par des interrogations sur leurs risques toxiques. En effet, ces matériaux ne sont pas chimiquement purs et peuvent être contaminés par divers réactifs et additifs utilisés pour leur synthèse ou leur transformation. Leur contact avec les fluides biologiques peut donc favoriser la libération in vivo de tout ou partie de ces contaminants et exposer ainsi le receveur aux risques toxiques de ces produits. Cette prise de conscience a pesé sur les stratégies de production. Elle a imposé un contrôle de qualité sur les procédures de synthèse et de transformation de ces polymères et a incité à la mise en œuvre d'additifs sélectionnés pour leur faible toxicité.

Une seconde génération de biomatériaux a alors eu pour objectif de satisfaire à un label spécifique de «qualité médicale». Par exemple les teneurs en Nickel ont été réduites à une valeur minimale pour en limiter la toxicité. La disponibilité d'alliages riches en titane, conjuguant hautes performances mécaniques, légèreté et résistance à la corrosion a constitué une nouvelle opportunité pour les matériels à usage orthopédique. Tous ces efforts ont abouti à la production de biomatériaux permettant la confection de matériels implantables sans risques toxiques et bien acceptés par le receveur. Néanmoins, l'implant demeure un corps étranger dont les performances fonctionnelles se trouvent progressivement réduites à cause de son incapacité à s'intégrer aux tissus vivants.

Une troisième génération de biomatériaux fait l'objet de recherches actuelles et constitue un progrès récent du génie tissulaire liés à l'essor des biotechnologies pour aboutir à des systèmes hybrides en associant des matériaux inertes à une composante cellularisée.

On peut également concevoir le domaine selon une approche "*transversale*" : il recouvre en effet l'ensemble de la recherche et du développement concernant, d'une part, les biomatériaux qui sont mis en jeu dans ces systèmes, d'autre part, la fonction des systèmes artificiels, envisagée sur le plan biologique.

2. Les champs d'application des biomatériaux

Ce paragraphe rassemble un échantillonnage significatif des domaines médicaux où l'usage des biomatériaux s'est révélé pertinent. Pour chaque domaine, les types de produits nécessaires sont désignés.

- a) Ophtalmologie
 - *Lentilles (souvent exclues du domaine pour cause de brièveté du contact)*
 - *Implants*
 - *Coussinets de récupération*
 - *Produits visqueux de chambre postérieure*
- b) Odontologie - stomatologie
 - *Matériaux de restauration et comblement dentaire et osseux*
 - *Traitements prophylactiques*
 - *Orthodontie*
 - *Traitement du parodonte et de la pulpe*
 - *Implants*
 - *Reconstruction maxillo-faciale*
- c) Chirurgie orthopédique
 - *Prothèses articulaires (hanche, coude, genou, poignet, cheville, épaule...)*
 - *Orthèses et cartilage*
 - *Ligaments et tendons artificiels*
 - *Remplacement osseux pour tumeur ou traumatisme*
 - *Chirurgie du rachis*
 - *Réparation de fractures (vis, plaques, clous, broches,...)*
 - *Matériaux de comblement osseux injectable*
- d) Cardiovasculaire
 - *Valves cardiaques*
 - *Matériel pour circulation extracorporelle (oxygénateurs, tubulures, pompes, ...)*
 - *Cœur artificiel*
 - *Assistance ventriculaire*
 - *Stimulateurs cardiaques*
 - *Prothèses vasculaires*
 - *Matériels pour angioplastie liminale coronarienne et stents*
 - *Cathéters endoveineux*
- e) Urologie/ néphrologie
 - *Dialyseurs*
 - *Poches, cathéters et tubulures pour dialyse péritonéale*
 - *Rein artificiel portable*
 - *Prothèses de pénis*
 - *Matériaux pour traitement de l'incontinence*
- f) Endocrinologie-chronothérapie
 - *Pancréas artificiel*
 - *Pompes portables et implantables*
 - *Systèmes de libération contrôlée de médicaments*
 - *Biocapteurs*
- g) Chirurgie esthétique
 - *Matériaux et implants pour chirurgie esthétique*
 - *Produit d'agrandissement de sein*
- h) Chirurgie générale et divers
 - *Drains de chirurgie*
 - *Colles tissulaires*
 - *Peau artificielle*
 - *Produits de contraste*
 - *Produits pour embolisation et radiologie interventionnelle.*

3. Classes des biomatériaux

Les révolutions techniques et scientifiques sont étroitement associées au développement de matériaux nouveaux. Les matériaux de base peuvent être classés en six grandes catégories : Les métaux et alliages métalliques, les inorganiques non métalliques, les polymères synthétiques, les composites biomédicaux, les biomatériaux d'origine biologique et les nanobiomatériaux (figure 10). Chaque catégorie de matériaux possède un certain nombre de propriétés spécifiques qui caractérisent leur réponse à l'action des sollicitations auxquelles ils sont soumis.

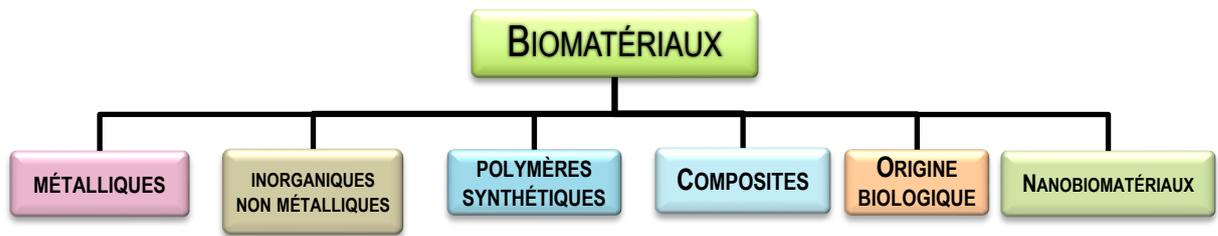


Figure 10 : Classes des biomatériaux.

3.1. Les biomatériaux métalliques

Les alliages métalliques sont principalement utilisés comme biomatériaux en orthopédie dans le cas de remplacement d'os ou d'articulation (Prothèse de hanche, de genou, d'épaule, de cheville,...) ou aux fins de faciliter la guérison des fractures (plaques, fixateurs externes,...). Par addition judicieuse d'éléments d'alliage mais aussi par traitements thermiques ou mécaniques, il est possible de façonner les propriétés des métaux et d'obtenir ainsi un compromis entre des propriétés à première vue contradictoire telles que ductilité, dureté, ténacité, résistance à la flexion, résistance à la fatigue,... Par ailleurs ces métaux doivent répondre à d'autres exigences telles que la biocompatibilité et la résistance à la corrosion, étant donné que l'environnement pour lesquels ils sont destinés (le corps humain) est lui-même un milieu agressif.

La plupart des métaux et alliages doivent être considérés comme instables du point de vue thermodynamique, c'est-à-dire qu'ils ont tendance à produire des combinaisons métalliques comme par exemple métal+oxyde. La transformation non voulue d'un métal en une combinaison ou même en ion métallique représente le processus de base de la corrosion.

Au début des années 20, on a découvert que l'introduction de chrome dans un acier exerçait une action décisive sur la corrosion. La résistance à la corrosion de l'acier était sensiblement améliorée. Aujourd'hui, il est reconnu que cette plus forte résistance est due à la formation spontanée d'une couche superficielle d'un oxyde métallique exceptionnellement stable du point de vue thermodynamique. L'existence spontanée de limite de phase métal/environnement détermine les deux limites de phase métal/couche recouvrante et couche recouvrante/environnement. C'est la composition chimique appropriée de la couche de protection qui confère à l'acier sa grande résistance chimique.

3.1.1. Métaux nobles

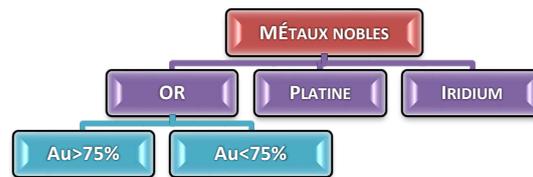


Figure 11 : Les métaux nobles

3.1.2. Métaux purs

Alors que le titane pur est très ductile pour un bon nombre d'applications, l'addition de vanadium et d'aluminium ($TiAl_6V_4$) permet de maintenir à température ambiante un mélange des formes allotropiques α (Hexagonale) ductile et β (cubique centrée) dure et fragile assurant un très bon compromis des propriétés mécaniques. Les alliages $TiAl_6V_4$, possèdent une limite élastique beaucoup plus élevée que les alliages de cobalt et surtout un module d'élasticité moitié de celui des autres métaux. Cette dernière caractéristique fait de ces alliages de titane un matériau se rapprochant des longs os qu'ils peuvent remplacer. La résistance à la fatigue des $TiAl_6V_4$ est deux fois supérieure à celle des alliages coulés de cobalt. D'autre part et grâce à la formation d'une couche naturelle d'oxyde, les alliages de titane présentent une résistance à la corrosion dans les milieux physiologiques. Ils se caractérisent enfin, par une excellente tolérance dans les milieux mous ou durs et au contact du sang.

3.1.2.1. Les aciers inoxydables

L'acier à plus forte teneur en carbone convient mieux à la réalisation d'implants chirurgicaux temporaires car ses caractéristiques mécaniques sont supérieures. Par contre sa résistance à la corrosion est inférieure à celle des aciers à faible teneur en carbone. Ces derniers sont destinés à la fabrication des implants permanents. Ces aciers présentent des caractéristiques mécaniques, comparativement à d'autres alliages, on note :

- Une charge de rupture un peu faible.
- Une limite d'élasticité basse (facteur favorable pour les plaques d'ostéosynthèse, cela permet d'obtenir une certaine ductilité. Mais, présente un inconvénient pour les implants fémoraux de hanche, compte-tenu de la possibilité de déformations permanentes).
- Une résistance faible à la corrosion sous tension.

3.1.2.2. Le Chrome

Le chrome peut être considéré comme un élément essentiel. Sa toxicité varie selon la forme sous laquelle il se présente. La forme hexavalente est plus toxique que la forme trivalente. En milieu professionnel, le chrome est un agent mutagène et cancérigène redoutable. Son absorption se fait surtout au niveau du tractus gastro-intestinal, mais également par la voie respiratoire et par la voie cutanée. Les dérivés du chrome ne franchissent pas les téguments, ils ne franchissent pas non plus les membranes cellulaires, où ils sont retenus en formant des complexes stables avec les protéines.

Par contre, les dérivés du chrome ont un pouvoir oxydant puissant vis à vis des molécules organiques. Ils franchissent facilement la membrane cellulaire, et sont alors réduits en chrome qui est la forme stable de cet élément.

L'accumulation du chrome varie selon sa forme chimique et s'effectue d'abord au niveau du foie, puis de l'utérus, des reins et de l'os. Chez l'homme, les teneurs en chrome des organes diminuent avec l'âge, sauf au niveau des poumons. Son élimination se fait principalement par voie urinaire. Le chrome a également un pouvoir allergogène redoutable.

3.1.2.3. Le Cobalt

L'absorption du cobalt se fait par voie digestive, cutanée et pulmonaire. Le cobalt est à priori un élément essentiel. Le cobalt absorbé est surtout stocké au niveau des reins, du foie et du pancréas. Sa fixation dans l'organisme se fait par complexation avec des protéines. Le cobalt est le principal responsable de la fibrose pulmonaire due aux «métaux durs». Il prend la troisième place après le nickel et le chrome parmi les allergogènes métalliques. Son pouvoir cancérogène n'est pas évident chez l'homme.

3.1.2.4. Le Titane

Le titane, son oxyde de TiO_2 ainsi que les différents titanates ont pratiquement toujours été considérés comme des substances inertes et donc peu toxiques. Les intoxications chroniques se produisent essentiellement dans la métallurgie du titane et dans l'industrie de l'oxyde de titane. Néanmoins, leur fréquence reste faible.

Mis à part le titane, les métaux cités ci-dessus (*chrome et cobalt*) qui sont contenus très souvent dans des alliages utilisés pour des biomatériaux ont des effets toxiques. De plus, le chrome et le cobalt figurent pratiquement en têtes des dix substances les plus allergogènes qui sont à elles seules responsables d'environ 80 % des cas de dermatose de contact.

Quant aux implants et prothèses, les ions de chrome ou cobalt qu'ils contiennent sont métabolisés dans l'organisme et on peut les retrouver aisément soit sous forme d'un précipité dans les tissus entourant l'implant, soit directement dans le sang et les urines.

Une corrélation a pu être établie entre les concentrations des métaux retrouvés dans les prélèvements ou fluides biologiques et le temps écoulé depuis l'implantation, une éventuelle complication clinique, et la nature d'un alliage.

3.1.2.5. Le Nickel

Le nickel est un métal blanc argenté qui possède un éclat poli. Il fait partie du groupe du fer. C'est un métal ductile (malléable). On le trouve sous forme combinée au soufre dans la millérite, à l'arsenic dans la nickéline.

Grâce à sa résistance à l'oxydation et à la corrosion, il est utilisé dans les pièces de monnaie, pour le plaquage du fer, du cuivre, du laiton, dans certaines combinaisons chimiques et dans certains alliages. Il est ferromagnétique, et est fréquemment accompagné de cobalt. Il est particulièrement apprécié pour les alliages qu'il forme.

3.1.2.6. Alliages métalliques

Pour répondre aux exigences de la médecine en ce qui concerne les propriétés chimiques plus précisément les réactions inflammatoires. Il est inimaginable d'utiliser autre que les

aciers inoxydables (316L). En effet Certains biomatériaux contiennent des éléments qui s'ils étaient libérés en grande quantité dans l'organisme, pourraient provoquer des réactions inflammatoires immunologiques non désirables.

3.1.2.7. Alliages à Mémoire de Forme (AMF)

Les alliages à mémoire de forme présentent une combinaison unique de propriétés rassemblant la biocompatibilité, la biofonctionnalité et la super-élasticité. L'introduction de ces nouveaux biomatériaux dits "*intelligents*" dans les domaines de la médecine en général et de l'orthopédie en particulier, a apporté des nouvelles solutions pour le traitement des ostéosynthèses. Le principe de ces alliages est basé sur leur transformation de phase à basse température (39°). A la température ambiante, les agrafes en NiTi (figures 12 et 13), employées en ostéosynthèse, sont en phase martensitique, lors de la pose et la fixation, ces éléments subissent par échauffement *in-vivo* (température du corps), une transformation austénitique génératrice d'une déformation. Selon la forme et la taille de l'implant NiTi choisies, une activation de forces de compression ou de tension prend forme pour assurer la consolidation d'un os fracturé ou corriger des cas de mal formation congénitale ignorée pour longtemps par manque de moyens.

L'extension des techniques à mémoire de forme aux autres domaines de la médecine fournit des solutions efficaces et des résultats spectaculaires, en particulier pour la chirurgie dentaire, la chirurgie cardio-vasculaire, la chirurgie crano-faciale, l'endochirurgie et la gynécologie.

Les alliages à mémoire de forme regroupent un ensemble d'alliages métalliques ressentant diverses propriétés :

- *La superélasticité* : l'alliage est capable de se déformer énormément (jusqu'à 10%) de manière réversible sous l'effet d'une contrainte ;
- *L'effet mémoire simple sens* : l'alliage est capable de retrouver par chauffage sa forme initiale après une déformation mécanique ;
- *L'effet mémoire double sens* : l'alliage est capable après "éducation" d'avoir deux positions stables, l'une au-dessus d'une température dite critique et l'autre en dessous ;
- *L'effet caoutchoutique* : l'alliage (sous forme martensitique auto-accommodé) subissant une déformation conserve au relâchement une déformation résiduelle ; si le matériau est à nouveau contraint puis déchargé, cette déformation résiduelle augmente ;
- *L'effet amortissant* : l'alliage est capable d'amortir des chocs ou d'atténuer des vibrations mécaniques. En effet la super-élasticité ou même simplement l'élasticité de la phase martensitique présentent un phénomène d'hystérésis qui entraîne une dissipation de l'énergie.



Figure 12 : Agrafe pour rachis



Figure 13 : Agrafe en Alliage à mémoire de forme

3.2. Les biomatériaux inorganiques non métalliques

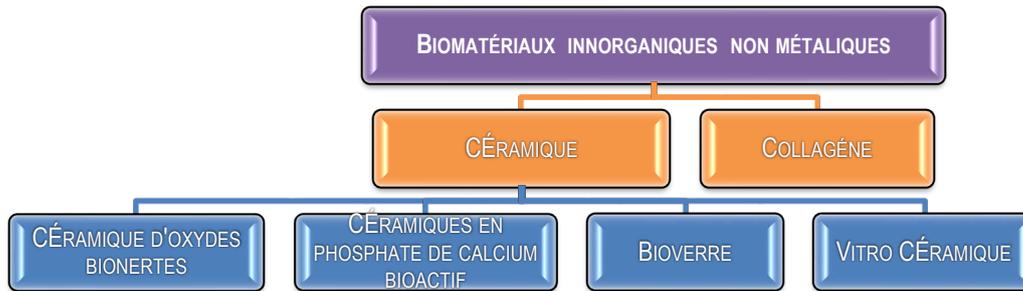


Figure 14 : Les biomatériaux inorganiques non métalliques

3.2.1. Les biocéramiques

Les biocéramiques reconnues comme "*vielles techniques*" se présentent sous formes diverses:

- Sous forme d'oxydes : oxyde d'aluminium Al_2O_3 , oxyde de zirconium ZrO_2 , SiO_2 ;
- Sous forme de carbures : Carbure de silicium SiC ;
- Sous forme de nitrures, bromures et fluorures.

Ces matériaux sont utilisés dans les domaines les plus variés : aérospatiale, microélectronique, moteur à turbines, valves cardiaque, prothèses totales articulaires. Ces céramiques de nouvelle génération, constituent une classe de matériaux aux propriétés remarquables : bonne résistance à la corrosion, haute résistance à l'usure et au frottement et bonnes résistances mécaniques en compression. Plusieurs céramiques de textures très variées et biocompatibles font que ces produits occupent de plus en plus une place de choix dans les applications médicales et en orthopédie en particulier.

Dans ces cas, il s'agit de céramiques massives obtenues par frittage et dont la porosité doit être minimale. L'alumine α est le matériau le plus couramment employé sous forme de sphères fixées par un emboîtement conique sur des tiges généralement en alliage de titane et frottant sur des cupules en polyéthylène ou en alumine.

3.2.2. Les bioverres

Le bioverre 45S5 est un matériau bioactif qui permet l'ostéointégration (ostéoproduction) et l'ostéoconduction. Il est biocompatible, 100 % synthétique et entièrement biorésorbable. Cependant malgré les nombreuses propriétés de ce matériau, des limites technologiques sont identifiables et notamment au niveau de sa fragilité et de sa mise en forme. Afin de lever le verrou technologique, la tendance est d'associer une phase polymère résorbable à une phase minérale. *Ce matériau peut donc être considéré comme une alternative très prometteuse aux substituts osseux utilisés actuellement en orthopédie.*

3.2.3. Les collagènes

Le collagène est une glycoprotéine fibreuse dont le rôle peut être comparé à une armature. C'est la protéine la plus abondante de l'organisme. Il est sécrété par les cellules des tissus conjonctifs.

Contrairement à l'élastine présente aussi dans les tissus conjonctifs, le collagène est inextensible et résiste bien à la traction. Il est constitué de différents types selon leur

localisation. Il est notamment indispensable aux processus de cicatrisation. Après certaines transformations, on peut en faire de la colle.

Il est composé de trois chaînes polypeptidiques associées. Ces trois chaînes pouvant se combiner de différentes manières, on devrait en toute rigueur parlé des collagènes, et non du collagène. Chaque type de collagène possède une structure propre et se retrouve dans des organes particuliers. Par exemple, le collagène de type I intervient dans la formation de la peau, des tendons, des os et de la cornée, tandis que le type III se retrouve au niveau du système cardiovasculaire.

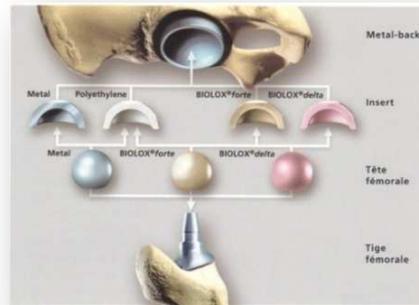


Figure 15 : Élément de prothèse de hanche.

Figure 16 : Couple utilisés pour une prothèse de hanche

3.3. Les polymères synthétiques

Les polymères appelés plus couramment matériaux plastiques, ont pris une place de plus en plus importante durant les dernières années. Ce phénomène est très perceptible pour beaucoup d'objets de la vie courante, mais également dans le domaine médical où de nombreux implants sont réalisés dans des matériaux faisant partie de la grande famille des polymères.

- application en odontologie : *dents, matériaux d'obturation* ;
- domaine cardio-vasculaire : *cœur artificiel, vaisseaux* ;
- chirurgie esthétique : *peau artificielle* ;
- en orthopédie : *implants ostéo-articulaires et ligaments artificiels.*

Les polymères les plus connus sont les polyéthylènes, les résines acryliques, les polymères biodégradables et les silicones.

Les Polymères biorésorbables

Bioresorbable = Susceptible une fois implanté dans l'organisme d'être totalement dégradé en produit simples qui sont éliminés par voies naturelle.

Si dans le cas des métaux, une parfaite inertie du matériau est recherchée, dans le cas de certains types de polymères une complète dégradation dans le milieu physiologique (le corps) est parfois désirable lorsque le biomatériau a cessé d'accomplir sa fonction. On parlera donc de polymères biostables ou biodégradables. Pour les traitements d'ostéosynthèse en chirurgie orthopédique, ces polymères biodégradables sont encore au stade de l'expérimentation et gardent cependant des applications très limitées vue qu'ils ne supportent pas des charges mécaniques élevées indispensables pour le traitement des fractures, par exemple, sur os long.

Les polymères biorésorbables (PGA, PLA, polydioxanone) sont utilisés notamment pour la réalisation de matériels d'ostéosynthèse résorbables ou de planchers orbitaires et dans la chirurgie du septum nasal ainsi qu'en chirurgie esthétique (Newfill : ce produit à base de PLA ne doit être utilisé qu'en se conformant strictement aux indications du fabricant avec une technique d'injection rigoureuse, sous peine de complications).

Les inconvénients suivants sont propres aux polymères biorésorbables :

- *perte de leur rigidité avant l'achèvement de la consolidation osseuse ;*
- *dégradation hétérogène (phases cristallines, phases amorphes) ;*
- *libération de produits de dégradation acides altérant la biocompatibilité ;*
- *rigidité relative (gênante pour la compliance avec les tissus mous ou les vaisseaux).*

Différents composites à base d'acryliques (BOP et HTR) ont été proposés en chirurgie orale et maxillo-faciale (comblement, reconstruction).

Le polyéthylène à haute densité (PEHD ou UHMWPE) a été largement utilisé pour les implants orthopédiques, en particulier pour les surfaces portantes articulaires (prothèse de hanche ou de genou). En Chirurgie maxillo-faciale et plastique, son utilisation s'est raréfiée depuis l'apparition de silicones. Parmi les polymères fluoro-carbonés, le polytétrafluoroéthylène (PTFE) est utilisé dans les membranes pour la RTG, l'augmentation des tissus mous, patchs vasculaires. Sous forme de composite, il a été proposé pour des implants maxillo-faciaux et des prothèses d'ATM (mais les propriétés mécaniques insuffisantes ont entraîné son retrait dans cette dernière application).

Les Silicones

Ce sont des matériaux caractérisés par des liaisons silicium-carbone et silicium-oxygène. Les silicones que l'on obtient à partir de divers silanes présentent des propriétés physiques et des aspects différents sous forme de : gommés élastomères, huiles, résines, pâtes. Ces silicones sont utilisés depuis de nombreuses années dans le domaine cardio-vasculaire (tubes de transfusion, cathéters ...) ; en chirurgie plastique (mamelle...) et en orthopédie (prothèses articulaires de doigts...). Les silicones ont une bonne biotolérance sous forme massive et une excellente inertie chimique, mais ils ont cependant l'inconvénient d'être perméable aux gaz et gardent des prix relativement élevés.

Les résines acryliques

Les résines acryliques, non trivial donné aux polymères dérivés d'acide acrylique et méthacrylique, furent à l'origine utilisées pour des prothèses maxillo-faciales, mais aussi pour des yeux, nez ou oreilles artificiels. Une phase importante du développement des résines biomédicales acrylique fut l'introduction, par CHARNLEY en 1960, du polyméthyl méthacrylate (PMMA), prenant à froid comme ciment de fixation pour les prothèses de hanche.

3.4. Les composites biomédicaux

Les développements récents des matériaux composites pour besoins des industries aéronautique et spatiale ont conduit à élaborer des carbone-carbone et des carbone-céramique dont les propriétés se sont avérés proches de l'optimum recherché pour les biomatériaux constituant les prothèses chirurgicales. Ces biomatériaux allient les qualités biologiques du procédé de dépôt chimique en phase vapeur de la matrice et les qualités biomécaniques des renforts fibreux de composites, formant ce que l'on appelle les

"composites carbonés pyrolytiques". En effet l'implantation dans l'organisme impose des exigences particulières aux biomatériaux que ces composites carbonés pyrolytiques sont en mesure de satisfaire simultanément. Parmi ces exigences :

- Une biocompatibilité intrinsèque du pyrocarbone et du carbure de silicium qui ne provoque de rejet de la part de l'organe receveur de l'implant.
- Une stabilité chimique des constituants qui rend le composite résistant à l'agressivité physiologique.
- Une porosité naturelle communicante de la structure du matériau qui autorise une colonisation dans la masse de la prothèse par les tissus biologiques environnants.
- Une flexibilité structurale des composites qui s'harmonise avec l'élasticité de l'os receveur dans le cas des implantations orthopédiques.
- Une endurance inégale en fatigue, critère primordial pour tenir aux sollicitations alternées de plus de dix millions de cycles que le patient peut subir durant la vie courante.

Les composites destinés pour les applications médicales sont classées en deux grandes familles distinctes :

- Les produits "souples" carbone-carbone sous forme de textures fibreuses en carbone empesées au pyrocarbone en phase vapeur pour constituer des renforts tissulaires "flexibles".
- Les produits "durs" carbone-carbone sous forme de renforts fibreux en carbone densifiés au pyrocarbone en phase vapeur pour confectionner des prothèses articulaires, d'ostéosynthèse, d'implants dentaires etc.

Les nouvelles familles des composites carbone-céramique sous forme de renforts carbonés et matrice SiC en phase vapeur, se font développer ces dernières années pour la mise au point de valves pour pompes cardiaques artificielles et de matériel d'ostéosynthèse de nouvelle génération.

3.5. Les biomatériaux d'origine biologique

La greffe osseuse, le comblement de pertes de substance osseuse, ou la réparation et la reconstruction sont de plus en plus fréquentes en chirurgie traumatologique ou orthopédique et de ce fait, elles génèrent des besoins croissants en produits de comblement ou de substitution osseuse.

La structure macroporeuse d'un substitut osseux permet la colonisation osseuse et la néo vascularisation jusqu'au cœur du biomatériau. Toutefois, le pourcentage de macroporosité influe de manière importante sur la résistance mécanique qui diminue lorsque la macroporosité augmente.

De nos jours, des matériaux d'origine biologique et synthétique, sont de plus en plus utilisés en chirurgie traumatologique ou orthopédique. Ces matériaux biocompatibles, également désignés sous le nom de biomatériaux, sont assimilables aux tissus vivants et peuvent jouer le rôle de promoteur de la repousse osseuse tout en évitant tout risque de transmission infectieuse. La greffe osseuse, le comblement de pertes de substance osseuse, ou la réparation et la reconstruction sont de plus en plus fréquentes en chirurgie traumatologique ou orthopédique et de ce fait, elles génèrent des besoins croissants en produits de comblement ou de substitution osseuse.

Les matériaux composites, en particulier les plastiques renforcés utilisés actuellement (fibres de verre, de carbone, d'aramide, de kevlar ou de bore) sont relativement chers, ce qui pousse à penser à utiliser d'autres fibres moins chères sans pour autant diminuer les performances du matériau. L'utiliser des fibres naturelles, ici les fibres d'alfa ou les fibres d'agave, d'autant plus qu'elles constituent des matériaux locaux, de bon prix et bien répandus en Tunisie.

3.5.1. Biomatériaux d'origine animale

Les biomatériaux d'origine animale on trouve :

- *dérivés de tissus durs et mous de mammifères : ivoire, dent, os (allogénique, xénogénique, BMP...), cartilage, collagène*
- *dérivés des fluides biologiques : fibrinogènes et fibrine, acide hyaluronique*
- *dérivés des œufs d'oiseaux : coquilles d'œufs (poule, autruche)*
- *dérivés des mollusques : nacre (huître)*
- *dérivés des carapaces de crustacés et des cuticules d'insectes : chitine*
- *dérivés des sécrétions d'araignées : soie d'araignée*
- *dérivés des madréporaires : corail*

3.5.1.1. Le Corail

Sous le nom de corail on désigne plusieurs groupes d'origines animaux qui, bien qu'appartenant tous au groupe des cnidaires, en sont éloignés par leur anatomie et leur organisation. Le véritable corail est le corail rouge (*corallium rubrum*) de la méditerranée, connu depuis l'antiquité et utilisé en joaillerie (figure 17).

Les coraux se reproduisent en général une fois par an et leur croissance est très lente. En Tunisie, la pêche du corail est interdite pendant la phase de reproduction sexuée.

Le corail possède une architecture poreuse propice à la colonisation par tissu osseux. Il est constitué essentiellement de carbonate de calcium, à plus de 97% sous forme de cristaux d'aragonite. Les propriétés physiques et mécaniques varient selon la porosité. Le corail a été utilisé en clinique dès 1979 en chirurgie orthopédique et maxillo-faciale.

3.5.1.2. La Nacre

La nacre est une substance dure, brillante, à reflets blancs et irisés. Ces matériaux naturels sont extraits à partir de la coque interne de certains coquillages. Il est constitué principalement de fines couches de carbonate de calcium qui se superposent et est sécrété par le manteau de ces mollusques. La première nacre utilisée comme substitut osseux est celle d'une grosse huître perlière (*Pinctada Maxima*). En Tunisie, nous disposons de l'huître perlière (*Pinctada radiata*) au Golfe de gabès. Certaines autres espèces d'huître comme *Pinna nobilis* (Bizerte, Kerkena et Elbibane) contiennent de la nacre (figure 18). La nacre utilisée en chirurgie maxillo-faciale provient d'un mollusque bivalve. Elle est constituée de carbonate de calcium.



Figure 17 : Le corail rouge



Figure 18: La nacre

3.5.2. Biomatériaux d'origine végétale

Parmi les biomatériaux d'origine végétale comprennent quant à eux :

- *arbres d'Europe (bouleau, chêne) et d'Afrique (ébène vert)*
- *graminées arborescentes d'Asie (bambou)*
- *squelettes calcifiés d'algues rouges (Corallina officinalis)*
- *dérivés des parois cellulaires (cellulose, saccachitine)*
- *les fibres d'alfa et d'agave*

Parmi les actions, celles qui intéressent les biomatériaux utilisés dans le domaine de l'orthopédie (confection d'appareillage orthopédique, de bandes plâtrées...); qu'il s'agisse de l'amélioration des biomatériaux déjà existants ou de l'élaboration de nouveaux matériaux, l'alfa et l'agave seront des biomatériaux fort intéressants dans le domaine de la médecine.

3.5.2.1. L'Alfa

L'alfa (de l'arabe *halfa*) ou sparte est une plante herbacée vivace de la famille des poacées, originaire des régions arides de l'ouest du bassin de la Méditerranée, qui sert notamment à fabriquer des papiers d'impression de qualité. Par extension, le terme désigne aussi le papier fabriqué à partir de cette plante (figure 19).

L'alfa est une plante utilisée pour ses fibres. On en tire une pâte à papier recherchée. Ses feuilles peuvent s'employer pour la fabrication de cordages et d'objets de sparterie.

C'est une plante qui présente aussi un intérêt sur le plan écologique pour lutter contre l'érosion dans les régions de steppes arides.

3.5.2.2. L'Agave

Agave est un genre de la famille des Agavacées composé de nombreuses espèces. Ils sont également connus sous les noms de « *pita* », « *maguey* » ou « *cabuya* » (figure 20).

Ces plantes forment une rosette de feuilles épaisses, succulentes, se terminant par une pointe acérée et présentant des bords épineux. Comme les *Yucca*, autre genre de la famille *Agavaceae*, les espèces du genre *Agave* sont appréciées comme plantes ornementales.

Les agaves ont une croissance lente et il faut attendre plusieurs années avant qu'elles ne fleurissent. C'est une espèce monocarpique : elles ne fleurissent qu'une seule fois avant de mourir. La grande hampe florale porte en général de nombreuses fleurs tubulaires. La multiplication est assurée par les graines et par des rejets ou des bulbilles à la base de la rosette qui vient de fleurir. Avant de mourir, le pied mère qui a fleuri donne très souvent des rejets.



Figure 19 : L'Alfa



Figure 20 : L'agave

3.6. Les nanobiomatériaux

Les nanomatériaux constituent un champ de recherche et de développement impliquant l'utilisation de procédés permettant la structuration de la matière au niveau atomique, moléculaire ou supramoléculaire à des échelles caractéristiques de 1 à 100 nanomètres (*nm*). On peut alors observer de nouveaux comportements de la matière dus à la prépondérance des lois de la physique quantique s'exprimant essentiellement à cette échelle. De nouvelles propriétés biologiques, chimiques ou physiques apparaissent et de nombreuses applications industrielles et médicales se développent rapidement. Ainsi, on peut considérer que l'avènement des nanotechnologies constitue un tournant majeur dans le développement industriel du XXI^{ème} siècle.

Un nanomatériau est défini comme un solide dont une des dimensions au moins est inférieure à 100 nanomètres. On distingue trois grandes familles de nanomatériaux :

- les nano-objets : *nanoparticules, nanofibres, etc.* ;
- les matériaux nanostructurés en surface ;
- les matériaux nanostructurés en volume.

L'essor conjoint des nanosciences et des nanotechnologies est porteur de bouleversements conceptuels et de ruptures technologiques encore insoupçonnés. Par essence et suivant la définition retenue au niveau international, les nanosciences et les nanotechnologies visent la réalisation, l'étude et la manipulation, à l'échelle du milliardième de mètre, de structures, systèmes ou objets dont la taille typique est inférieure à 100 nm et dont les propriétés physiques, chimiques ou biologiques découlent spécifiquement de cette taille nanométrique. Le changement radical vient de ce que les comportements observés sur de tels objets ou structures ne peuvent plus se déduire simplement par un simple facteur de réduction de taille car les prédictions habituelles, valables pour les systèmes macro- ou micro-scopiques sont mises en défaut.

Les progrès accomplis dans la maîtrise de la matière à l'échelle du nanomètre ouvrent des perspectives nouvelles, sources d'enjeux scientifiques, techniques et économiques majeurs dans des champs d'activité variés et au croisement de plusieurs disciplines.

4. Conclusion

Dans le combat pour l'augmentation de la durée de vie de la bio structure humaine, le biomatériau est l'alternative la plus sérieusement envisagée par les médecins. Ce domaine de la science des matériaux subit une grande évolution. Le domaine de la science biomédicale est donc un domaine pour lequel les exigences vont être de plus en plus importantes dans la course à l'augmentation de la durée de vie des êtres humains.

Le choix de bons matériaux revêt une importance toute particulière. On a cru pendant longtemps qu'il fallait, avant tout, rechercher des matériaux possédant une résistance à la déformation la plus élevée possible. Puis, progressivement, dans de nombreux cas, on a dû s'employer à rechercher des biomatériaux présentant un meilleur compromis entre leur résistance et leur biocompatibilité ou, de façon plus générale, leur tenue à la fatigue.

Pendant longtemps, l'orthopédie s'est servie du plâtre pour soigner les fractures et traiter les déformations, mais dès que les métaux ont été utilisés dans le corps humain pour en remplacer une partie absente ou détruite, l'orthopédie connaît un immense développement. Dans toutes les études faites, nous constatant que pratiquement tous les phénomènes intervenant dans la tenue en service des matériaux implantables prenaient naissance à la surface des implants. C'est donc par l'étude des surfaces et de leurs modifications par

traitement physico-chimiques et/ou mécaniques ou par des revêtements, que l'on devrait faire progresser les techniques actuelles de fabrication des implants chirurgicaux.

Bien qu'il existe des allergies à certains métaux pris individuellement, le chrome et le cobalt en particulier, ces manifestations allergiques n'ont été signalées que dans le cas d'une application cutanée. À l'heure actuelle, aucune allergie aux pièces prothétiques métalliques ou non n'a été notée, et il n'y a donc pas de risque de rejet par un mécanisme allergique.

Il a été constaté que les biomatériaux d'origine marine ainsi que ceux dérivant avaient des propriétés ostéoconductrices quand ils forment un réseau tridimensionnel poreux permettant la colonisation cellulaire et la déposition osseuse. La recherche actuelle sur les substituts osseux est principalement axée sur les biomatériaux composites.

L'étude de la tenue en service des implants orthopédiques peut être faite sur des implants temporaires (plaques, clous, vis...) qui sont normalement retirés lorsque leur présence n'est plus indispensable et sur des implants permanents, lorsqu'on a pu les récupérer soit en cas d'échec de la prothèse, soit après le décès des patients.

Références bibliographiques

- [1] D. Mainnard, M. Merle, J.P. Delagoutte et J.P. Louis, Actualités en Biomatériaux, éditions Romillat, Volume II, 1993.
- [2] M. Haïdopoulos et D. Mantovani, Docteur, mon spécialiste m'a proposé l'implantation d'une prothèse du genou. Qu'est-ce que vous en pensez? Le Médecin du Québec, volume 38, numéro 7, 2003.
- [3] J. M. Meyer, Dégradation des biomatériaux, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [4] F. Langlais, Prothèses articulaires, facteurs biologiques et mécaniques de tolérance, Cahier d'enseignement de la SOFCOT, 1983, conférences d'enseignement, 2^{ème} série.
- [5] P. Boutin et D. Blanquaert, Les nouveaux matériaux utilisés dans les prothèses totales de hanche, Document de formation CERAVER.
- [6] L. Sedel, L'alumine en chirurgie orthopédique, Extrait de "cahiers d'enseignement de la SOFCOT, N°25 Biomatériaux en chirurgie orthopédique - Expo. Sci. Française.
- [8] M. F. Ashby, D. R. H Jones, Matériaux I : Propriétés et application.
- [9] J. P. Mercier, G. Zambelli, W. Kurz, Introduction à la science des matériaux, édition Presses polytechniques et universitaires romandes, troisième édition 1999.
- [10] J.P. Bailon et J. M. Dorlot, des matériaux, presses internationales polytechnique de Montréal, 2000.
- [11] Agence nationale de la recherche, programme national en nanosciences et nanotechnologies, France 2005.
- [12] M.F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux, propriétés et applications, Dunod, 1996.
- [13] R. Schmidt, Comportement des matériaux dans les milieux biologiques, Presses polytechniques et universitaires romandes, applications en médecine et biotechnologie, 1999.
- [14] Observatoire français des techniques avancées, Matériaux polymères, enjeux et perspectives, Masson, 1995.
- [15] G. David, Les aciers inoxydables, propriétés – mise en œuvre-emploi, normes, Lavoisier, tec & doc, 1990.

- [16] J.M. haussonne, C. Carry, Céramiques et verres, principes et techniques d'élaboration,, Presses polytechniques et universitaires romandes, applications en médecine et biotechnologie,2005.
- [17] Maurice Reyne, Les matériaux nouveaux, HERMES, technologies de pointe, (44), 1990.
- [18] S. Hamza, N. Slimane, Z. Azari, G. Pluinage, Structural and mechanical properties of the coral and nacre and the potentiality of their use as bone substitutes, Applied Surface Science, Volume 264, 1 January 2013, Pages 485-491.
- [19] S. Hamza, M. Bouchemi, N. Slimane, Z. Azari, Physical and chemical characterization of adsorbed Protein onto Gold Electrode Functionalized with Tunisian Coral and Nacre, Materials Science & Engineering C, Volume 33, Issue 1, 1 January 2013, Pages 537-542.
- [20] Association de l'aluminium du Canada, L'industrie canadienne de l'aluminium et l'environnement, Troisième trimestre 1997-Bibliothèque National du Québec.
- [21] P. Boutin et D. Blanquaert, Les céramiques et ceramo-métalliques, Document de formation CERAVER.
- [22] P. Boutin, Arthroplastie totale de la hanche par prothèse en alumine frittée - étude expérimentale et premières applications cliniques, Revue de chirurgie orthopédique et réparatrice de l'Appareil moteur (Paris) 1972, tome58, n°3.

Chapitre : 5

Désignation normalisée des matériaux

Sommaire

1. Introduction
2. Familles de matériaux
3. Critères de choix d'un matériau
4. Symboles métallurgiques
5. Désignation normalisée des matériaux
6. Tableau d'équivalence entre différentes appellations
7. Tableau périodique des éléments
8. Caractérisation des matériaux
9. Classification des matériaux
10. Les céramiques
11. Les composites
12. Les plastiques
13. Les matériaux frittés

1. Introduction

L'objectif est de décrire et d'indiquer les caractéristiques, les propriétés et la désignation des principaux matériaux.

En métallurgie, la désignation des métaux et alliages est la désignation normalisée des matériaux métalliques, à indiquer par exemple sur les dessins de pièces.

En traitement de surface comme en traitement thermique, la connaissance précise de la nature d'un matériau est nécessaire pour pouvoir établir une gamme de traitement appropriée.

La moindre variation de propriété d'un matériau peut aboutir à l'utilisation d'une gamme de préparation ou de traitement excessivement différente de la gamme type.

En traitement thermique une variation de composition a une influence importante sur la position des points de transformation, et sur la possibilité de traitement qui en découle (température durée, modalités de refroidissement)

Par ailleurs, la facilité avec laquelle un métal s'oxyde et donc risque de se passiver doit être pris en compte pour l'adhérence d'un revêtement.

Il est donc nécessaire de connaître le système permettant de coder et décoder la nature d'un matériau devant être revêtu.

2. Familles de matériaux

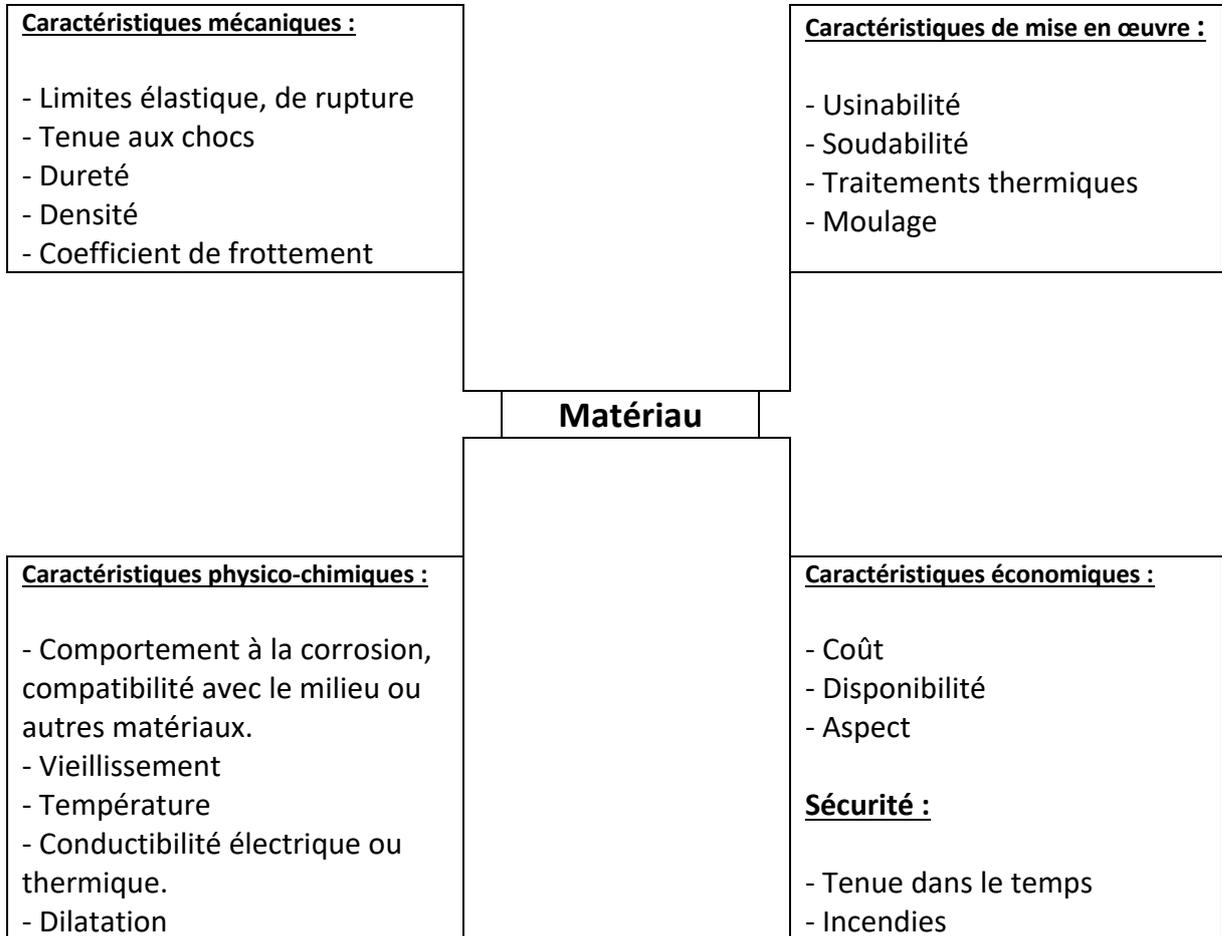
Les matériaux se divisent en plusieurs familles.

Matériaux Métalliques	Ferreux (acier, fontes, ...) Non ferreux (alliages d'aluminium, de cuivre, ...)
Matière Plastique	Thermoplastiques Thermodurcissables Elastomères
Matériaux Minéraux	De grande diffusion : granulats, ciments, bétons Spécifiques : verres, amorphes, cristaux, céramiques
Matériaux composites	A âme organique A âme métallique

Chaque matériau possède des caractéristiques spécifiques. Certains possèdent une grande résistance mécanique, pouvant supporter des contraintes importantes en subissant de faibles déformations, alors que d'autres vont se déformer sous le moindre effort pour épouser la forme du support.

3. Critères de choix d'un matériau

Lors de la conception du produit, le concepteur va choisir un matériau qui répond aux critères imposés par le cahier des charges fonctionnelles.



4. Symboles métallurgiques

Jusque dans les années 1990, on utilisait en France des symboles dits « métallurgiques » pour indiquer les éléments chimiques dans les alliages. Ces symboles étaient utilisés dans plusieurs normes, par exemple la norme NF A 02-004 pour les alliages d'aluminium ou la norme NF A 35-573/4 pour les aciers.

Élément	Aluminium	Bore	Chrome	Étain	Magnésium	Cobalt
Symbole chimique	Al	B	Cr	Sn	Mg	Co
Symbole métallurgique	A	B	C	E	G	K

Élément	Manganèse	Nickel	Silicium	Zinc	Cuivre	Titane
Symbole chimique	Mn	Ni	Si	Zn	Cu	Ti
Symbole métallurgique	M	N	S	Z	U	T

5. Désignation normalisée des matériaux

5.1. Désignation numérique (Cas de l'Aluminium)

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont référencés par une désignation de 4 chiffres. Cette désignation est conforme aux directives de l'Aluminium Association (Washington DC 20006, États-Unis), ce qui donne par exemple : 7075. Les quatre chiffres sont parfois précédés par les lettres AA (exemple : AA 6061), acronyme de « Aluminum Association ». Les quatre chiffres sont parfois suivis par une lettre qui indique une variante nationale d'une composition existante.

Cette désignation a été reprise en Europe par la norme EN 573-3 en ajoutant les préfixe EN, A (aluminium) et W (wrought : mot anglais signifiant corroyage). Ce qui donne EN AW-7075. Dans les faits, très souvent, seuls les quatre chiffres sont utilisés.

Cette notation à quatre chiffres est très usitée internationalement et a dans la pratique remplacée les anciennes appellations nationales.

Le premier chiffre indique l'élément d'addition principal de l'alliage :

- 1XXX (série des 1000) : alliage comportant au minimum 99 % d'aluminium (exemple : 1050)
- 2XXX (série des 2000) : cuivre (exemple 2024)
- 3XXX (série des 3000) : manganèse (exemple : 3003)
- 4XXX (série des 4000) : silicium (exemple : 4006)
- 5XXX (série des 5000) : magnésium (exemple : 5083)
- 6XXX (série des 6000) : magnésium, silicium (exemple : 061)
- 7XXX (série des 7000) : zinc (exemple : 7020)
- 8XXX (série des 8000) : autres éléments.

Le deuxième chiffre indique une variante (exemple : 7075 comporte 0,50 % de fer et le 7175 plus pur comporte 0,20 % de fer). Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000, ces deux derniers chiffres y indiquant le pourcentage d'aluminium (exemple : 1050 qui comporte au minimum 99,50 % d'aluminium).

5.2. Désignation ISO

Il s'agit d'une désignation utilisant les symboles chimiques dite souvent ISO (suivant ISO 209-1 : aluminium et alliages d'aluminium corroyés - Composition chimique et formes des produits. Partie 1 : composition chimique).

Exemple : AlCu4MgSi

5.3. Désignation alphanumérique européenne

Il existe une norme européenne qui décrit des appellations très proches des appellations de type ISO. Cette norme porte la référence EN 573-2 (Aluminium et alliages d'aluminium - Composition chimique et forme des produits corroyés - Partie 2 : système de désignation fondé sur les symboles chimiques). En principe, cette appellation ne doit pas être utilisée seule mais doit être mise derrière l'appellation numérique, entre crochets.

Exemples : EN AW-2024 [AlCu4Mg1], EN AW-6060 [AlMgSi], EN AW-7075 [Al Zn5, 5MgCu] (désignation exacte suivant la série de norme EN 573).

8. Caractérisation des matériaux

CRITERES	Tenue aux efforts	Dureté	Tenue aux frottements	Tenue aux chocs	Forte élasticité	Coefficient de frottement faible	Tenue à la corrosion	Usinabilité	Soudabilité	Moulage	Conduction électrique	Isolant thermique	Transparence	Densité faible
MATERIAUX														
Aciers Usage général Ex : Poutrelle, tube	X	X	X	X		M		X	X	M	M			
Aciers Non alliés Ex : Pièce forgée, ressort	X	X	X	X		M		X	X	M	M			
Aciers Faiblement alliés Ex : Engrenages	TB	TB	TB	TB		M		X	X	M	M			
Aciers Fortement alliés Ex : inox, roulement à billes	TB	TB	TB	TB		M	TB	M	M	M	M			
Fontes Lamellaire Ex : Bâtis	X	X	X			M	M	TB		X	M			
Fontes Sphéroïdales Ex : Vilebrequin	X	X	X	X		M	M	TB		X	M			
Alliages d'aluminium Ex : Carter léger	X	M					TB	TB	X	X	TB			X
Alliages de cuivre Laiton Ex : Robinetterie	X	M	M				TB	TB		X	TB			
Alliages de cuivre et de Bronze Ex : Roue dentée	X	M	X			TB	TB	M		X	X			
Plastiques Thermoplastiques Ex : couvercle léger				X	M		X			X		X	X	X
Plastiques Thermodurcissable Ex : couvre culasse							X			X		X	X	X
Plastiques élastomères Ex : Joint torique				X	X		X			X		X		X
Céramiques Traditionnelles Ex : ciment, verre		X	X				X			X		X	X	
Céramiques techniques Ex : Alumine, Zicone...	X	X	X			M	X			X		X		

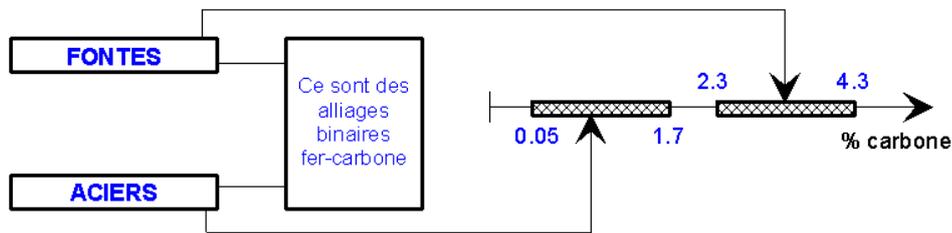
X : Application correcte

M : Application moyenne

TB : Application très bonne

9. Classification des matériaux

9.1. Les métaux ferreux



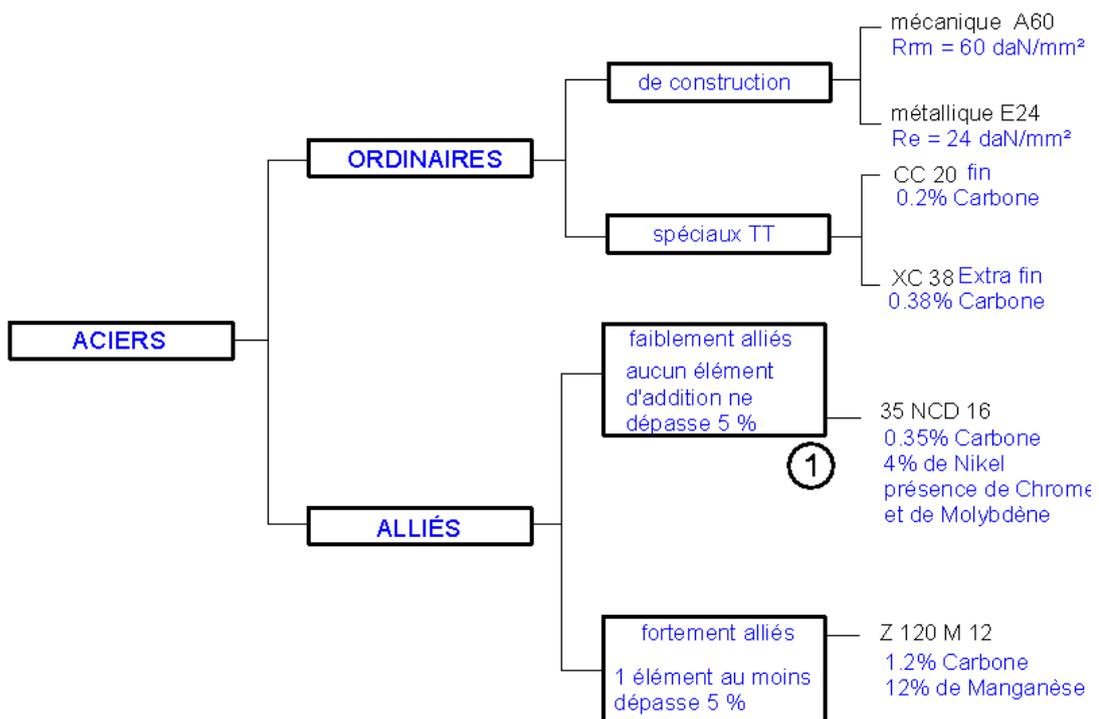
9.1.1 Les Aciers

L'acier est un alliage de fer et de carbone comportant de 0,1 % à 2 % de carbone. De couleur gris foncé, l'acier est généralement obtenu par affinage de la fonte (la teneur en carbone est abaissée) suivant divers procédés.

Plus ou moins dur suivant le pourcentage de carbone (on parle par exemple d'acier doux pour des aciers possédant de 0,2 % à 0,3 % de carbone), l'acier peut être allié à de nombreux matériaux modifiant ainsi sensiblement ses propriétés (les aciers alliés à du chrome sont par exemple inoxydables).

De plus les aciers sont susceptibles de recevoir des traitements thermiques (trempe, revenu, etc.) ou thermochimiques (cémentation, nitruration, etc.) qui modifieront ses propriétés mécaniques.

Dépass son coût de revient faible, la diversité de ses nuances et ses propriétés mécaniques, l'acier est le métal le plus utilisé en construction mécanique. Ses applications trop nombreuses pour être citées sont présentes dans quasiment tous les secteurs de l'industrie.



9.1.1.1. Classification par emploi

La désignation commence par la lettre :

Lettre	Signification	Valeur numérique
E	Acier de construction	Re mini
S	Acier de construction y compris les aciers à grains fins	Re mini
H	Acier à haute résistance laminé à froid pour emboutissage à froid	Re mini
P	Acier pour appareil à pression	Re mini
D	Acier pour formage à froid	Degré D'emboutissage

Re = limite élastique en N.mm² ou en MPa

- Il existe d'autres lettres L,B,Y,etc., pour plus d'informations, se référer à la norme

- Dans le cas d'aciers livrés moulé la désignation est précédée de la lettre G (ex : GS 235)

S pour les aciers d'usage général

E pour les aciers de construction mécanique.

Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élasticité en mégapascals.

Ex: S 235 : Limite élastique de 235 MPa.

S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G (idem pour les aciers faiblement et fortement alliés).

Exemple : GS 335 : acier moulé ayant une limite élastique de 335 MPa.

9.1.1.2. Classification par composition chimique

a) Aciers non alliés

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique.

La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés: poutrelle, barre, ...) aux dimensions normalisées.

Utilisation : Ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

Désignation : On écrit successivement:

Lettre C + pourcentage de carbone multiplié par 100.

Ex: C 35 : 0,35% de carbone.

b) Aciers faiblement alliés

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse (ce pourcentage est ramené à 1% pour le manganèse).

Utilisation : Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance.

Désignation : On écrit successivement:

- Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments d'addition (multipliées par 4, 10, 100, ou 1000, Tableau ci-dessous)
- Eventuellement des indications supplémentaires concernant la soudabilité (S), l'aptitude au moulage (M), ou la déformation à froid (DF).

Exemple : 35 Cr Mo 4 S → 0.35 % carbone
1 % chrome ; traces de molybdène (< 1 %) ; Soudable
Facteur pour les aciers faiblement alliés

Élément d'addition	coefficient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1 000

c) Aciers fortement alliés

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse 5% en masse.

Utilisation : Ce sont des aciers réservés à des usages particuliers. Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui n'est autre qu'un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%).

Désignation : On écrit successivement :

- La lettre X.
- Un nombre égal à 100 fois la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.
- Dans le même ordre, les teneurs des principaux éléments (sans coefficient multiplicateur).

Exemples : X6 Cr Ni Mo Ti 17-12 → 0.06 % carbone
17 % chrome ; 12 % molybdène
traces de titane (< 1 %)
X4 Cr Mo S 18 → 0.04 % carbone
18 % chrome
traces de molybdène et de silicium (< 1 %)

9.1.2. Les Fontes

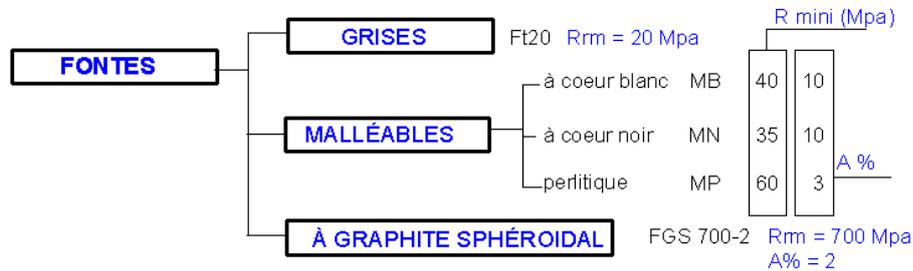
Les fontes sont des alliages de fer et de carbone où la proportion de carbone est comprise entre 2,5 % et 6 %. Les fontes sont obtenues dans des hauts-fourneaux par le traitement d'un mélange de minerai de fer, de coke et d'éléments d'addition appelés fondants.

Les fontes sont en général peu malléables et très dures mais offrent une excellente coulabilité. Suivant la structure du carbone ou des carbures de fer contenus dans celles-ci, les fontes ont été classées en différents groupes présentant des caractéristiques mécaniques

communes (fontes blanches, fontes austénitiques, etc.). Les fontes peuvent également être alliées.

Très employées, les fontes servent notamment à la réalisation de pièces telles que des pompes, des bâtis de machines-outils, des flasques, etc.

Elles sont assez fragiles (cassantes), difficilement soudables, et ont une bonne usinabilité.



a) Fontes grises

Les fontes grises sont les plus couramment utilisées parce qu'elles :

- sont économiques.
- amortissent bien les vibrations.
- ont une bonne coulabilité et usinabilité.
- sont peu oxydables.
- ont une bonne résistance à l'usure par frottement.
- résistent bien aux sollicitations de compression.

Utilisation : Carters, bâtis, blocs moteurs, pièces aux formes complexes ...

Désignation : La désignation commence par le préfixe : EN-GJL

Le nombre qui suit indique la valeur de résistance minimale à la rupture par extension.

Exemple : EN-GJL-300 → fonte à graphite lamellaire de résistance à la rupture de 300 MPa.

b) Fontes malléables à graphite sphéroïdale

Les fontes à graphite sphéroïdal sont obtenues par adjonction d'une faible quantité de magnésium avant moulage. Elles sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises, dont elles gardent les mêmes propriétés.

Utilisation : Etriers de freins, culbuteur, vilebrequin, tuyauteries soumises à hautes pressions

Désignation : La désignation commence par le préfixe :

EN-GJ + S (sphéroïdale) ou MB ou MW (malléable).

Les nombres qui suivent indiquent la valeur en méga pascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture.

Exemple : EN-GJS-400-18 Fonte à graphite sphéroïdale
 Résistance à la rupture par traction de 400 MPa
 18 % d'allongement résiduel après rupture.

9.2. Alliages non ferreux

a) Alliages d'aluminium

L'aluminium est un métal gris clair généralement obtenu à partir du minerai de bauxite. Bon conducteur électrique et thermique, ductile et très malléable, l'aluminium est le métal possédant la plus faible masse volumique. A l'air, l'aluminium s'oxyde en surface, il se forme une couche d'alumine qui protège le métal contre de nouvelles oxydations.

Pur, l'aluminium qui présente une bonne tenue à l'air et aux corrosions courantes est utilisé notamment dans l'industrie de l'emballage.

En alliage avec le cuivre (duralumin), il peut subir des traitements thermiques améliorant ses propriétés mécaniques, ce qui permet de l'utiliser dans l'industrie aéronautique. Allié au silicium, il est moulé pour la production notamment de blocs-moteurs et pistons d'automobiles.

L'aluminium est obtenu à partir d'un minerai appelé bauxite. Il est léger (densité = 2,7), bon conducteur d'électricité et de chaleur. Sa résistance mécanique est faible, il est ductile et facilement usinable. Il est très résistant à la corrosion.

Utilisation : aéronautique du fait de leur légèreté.

Désignation : La désignation utilise un code numérique. Il peut éventuellement être suivi par une désignation utilisant les symboles chimiques.

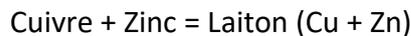
Exemple : EN-AW-2017A ou exceptionnellement EN-AW-2017A [Al Cu 4 Mg Si]

b) Les cuivre et ses alliages

Le cuivre est un métal de couleur rouge orangé possédant une haute conductibilité thermique et électrique ainsi qu'une bonne tenue aux corrosions courantes. Ce sont ses propriétés qui en font un métal employé pur ou faiblement allié dans la construction électrique, le transport d'électricité et le bâtiment.

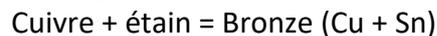
En revanche, en mécanique, le cuivre pur n'est pas ou peu employé. Ce sont des alliages de cuivre qui sont utilisés tels que par exemple :

- Les laitons, alliages de cuivre et de zinc, qui se forment et s'usinent aisément. Ces alliages de couleur jaune sont parfois improprement appelés cuivre jaune.



Les laitons sont faciles à usiner et ont une bonne résistance à la corrosion. Ils peuvent être moulés ou forgés. Ils sont utilisés pour les pièces décolletées, tubes,...

- Les bronzes, alliage de cuivre et d'étain qui présentent de bonne qualité de fonderie ainsi que d'intéressantes qualités mécaniques et de frottement.



Ils ont une bonne résistance à la corrosion, un faible coefficient de frottement et sont faciles à mouler. Ils sont utilisés pour réaliser, entre autres, les coussinets et bagues de frottement.

Désignation : La désignation commence par le préfixe : CU

+ élément d'addition 1 + % de l'élément d'addition 1

+ élément d'addition 2 + % de l'élément d'addition 2

+...

Exemple : CU Zn 36 Pb 3 → 36 % zinc ; 3 % plomb

- Les cupro-nickels qui résistent bien à l'oxydation et à certains agents corrosifs.

Tableau des symboles métallurgiques et facteurs multiplicateur

élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur Multiplicateur
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

10. Les céramiques

Ni métallique, ni polymères, ce sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre et les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme.

Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion mais sont fragiles.

10.1. Les céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments, les plâtres, terres cuites... et les produits à base de silice, verres, cristal.

10.2. Les céramiques techniques

Plus récentes, elles sont soit fonctionnelles, à «usage électrique» (ferrites), soit structurales, à usage mécanique (carbures) ou thermomécanique.

Utilisations : fibre optique (silicium), outils de coupe (carbures), joints d'étanchéité, isolants...

11. Les composites

Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant) renforcé par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau.

En renfort, on utilise la fibre de verre (économique), la fibre de carbone (plus coûteuse) et enfin les fibres organiques (kevlar).

Mais comme exemples familiers de matériaux composites, on peut citer le béton armé (béton + armature en acier), les pneumatiques (élastomère + toile et fils d'acier), ...

12. Les plastiques

Les matières plastiques sont des polymères obtenus par synthèse de composés organiques basés essentiellement sur la chimie du carbone. Ce sont des molécules "géantes" ou macromolécules possédant une structure de chaîne.

Il existe une très grande variété de matières plastiques aux propriétés fortes différentes qui sont obtenues à partir de produits chimiques différents. On classe généralement les matières plastiques en deux catégories :

- Les thermoplastiques (Polyéthylène, Polypropylène, etc.) qui sont des matières plastiques qui une fois chauffées peuvent être déformées sans perdre leurs propriétés.

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et se déforment à la chaleur. Ils peuvent en théorie, être refondus et remis en œuvre un grand nombre de fois (comportement thermique comparable aux métaux).

Exemples : ABS, PMMA (poly méthacrylate de méthyle), PTFE (polytétrafluoroéthylène), PP (polypropylène), PS (polystyrène).

- Les thermodurcissables (Polyuréthane, Silicone, etc.) qui sont des matières qui une fois mises en forme ne peuvent plus être déformés sous l'action de la chaleur.

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créés, il n'est plus possible de les remodeler par chauffage.

Exemples : EP (époxyde), UP (polyester), PUR (polyuréthane).

- Les élastomères : On peut les considérer comme une famille supplémentaire de polymères aux propriétés très particulières. Ils sont caractérisés par une très grande élasticité.

Exemples : NBR (nitrile), EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène butadiène).

Les matières plastiques en raison de leur variété, leur facilité de mise en œuvre, leur coût souvent faible a progressivement envahi tous les domaines de l'industrie. De plus, associés à d'autres matériaux (fibres de verre, fibres de carbone, etc.), leurs propriétés mécaniques sont améliorées, ouvrant à ces matériaux composites de nouveaux champs d'application.

Un plastique est un mélange dont le constituant de base est une résine ou polymère, à laquelle on associe des adjuvants (plastifiants, anti-oxydants...) et des additifs (colorants, ignifugeants).

13. Les matériaux frittés

Le frittage (ou contrefaction) est une technique d'obtention de pièces consistant à comprimer une poudre métallique dans un moule et à chauffer ce comprimé. Les pièces ainsi obtenues sont poreuses. Cette propriété est exploitée pour la fabrication de filtres ou de coussinets auto-lubrifiants généralement réalisés en bronze. Pour les autres applications, on remédie éventuellement à cette porosité par infiltration de métal dans les pores.

Les matériaux frittés peuvent éventuellement être usinés et recevoir des traitements thermiques ou thermochimiques.

D'un coût de revient bas pour de grandes séries, les matériaux frittés sont utilisés notamment pour la réalisation de plaquettes de coupe (matériaux à base de carbure de tungstène) ou pour des plaquettes de frein (matériaux à base de fer graphite ou bronze graphite).

Normes utilisées

ASTM	ASTM standards worldwide	
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)	
DIN	Deutsches Institut für Normung (organisme de normalisation ou de standardisation allemand)	
afnor	French national organization for standardization (Association française de normalisation)	
BSI	Le British Standards Institution (Association Britanique de normalisation)	
UNI	Nazionale Italiano di Unificazione (Association Italienne de normalisation)	
CE	Comité européen de normalisation	

L'utilisation et la connaissance des systèmes de codage des matériaux sont indispensables à l'élaboration de la gamme de traitement, mais il ne faut pas oublier que de nombreux fournisseurs possèdent des systèmes de codage internes qui rendent difficiles les transpositions. Dans tous les cas, il faut exiger l'équivalence dans une norme reconnue de la désignation du matériau.

Par ailleurs de nombreux professionnels utilisent encore des normes obsolètes ou des systèmes de codages qui ne sont plus normalisés. Ces normes correspondent à des aciers dont les propriétés ou les compositions chimiques ne sont plus d'actualité. Il faut donc chercher à les remplacer par les normes actuelles.

Références Bibliographiques

- Des Matériaux, Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot, 3^{ème} édition
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Désignation_des_métaux_et_alliages
- http://ressources6.techno.free.fr/mecanique/materiaux/desi_010.htm
- <http://lyc-plagourgue.ac-reunion.fr/bts-tc/Docpdf/Fiche%20désignation%20normalisée%20des%20matériaux.pdf>

Chapitre : 6

Modifications des propriétés des matériaux

Sommaire

1. La dégradation et la protection
 - 1.1. Types de réactions chimiques
 - 1.2. Les métaux
 - 1.3. Les alliages
2. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone
3. Les traitements thermiques
 - 3.1. La trempe
 - 3.2. Le revenu
 - 3.3. Le recuit
4. Modification de la composition des aciers
5. Éléments d'alliage et impuretés
6. Propriétés mécaniques
7. Propriétés magnétiques

1. La dégradation et la protection

La dégradation des matériaux est un processus qui entraîne la modification de leurs propriétés due aux effets de leur environnement.

Tous les matériaux, qu'ils s'agissent de matières plastiques, de matériaux organiques, de céramiques, de métaux ou de matériaux composites, se dégradent à un rythme plus ou moins rapide. Leur vitesse de dégradation dépend de l'usure causée par les contraintes répétées, mais aussi de l'environnement dans lequel ils se trouvent. Par exemple, l'exposition à certains produits chimiques, le rayonnement ultraviolet ou l'action du gel et du dégel peuvent dégrader certains matériaux. Leurs propriétés initiales sont alors modifiées par les effets du milieu ambiant.

La protection des matériaux consiste à utiliser des procédés et des traitements afin de ralentir ou d'empêcher leur dégradation.

Si rien n'est fait pour contrer les effets néfastes de l'environnement sur un matériau, celui-ci se dégrade plus rapidement que son usure due uniquement aux contraintes et il est ultimement voué à la destruction. Il existe des moyens pour minimiser ou retarder la dégradation des matériaux. En fonction de l'environnement ambiant et du type de matériau considéré, on doit choisir des techniques de protection adaptées.



Figure 1. L'exposition au dioxygène et à l'eau fait rouiller la structure d'un pont.



Figure 2. Les rayons ultraviolets ont causé la dégradation du plastique.

1.1. Types de réactions chimiques

- Les réactions d'oxydation
- Les réactions de précipitation
- Les réactions de décomposition
- Les réactions de synthèse

1.1.1. Les réactions d'oxydation

L'oxydation est une transformation chimique impliquant de l'oxygène ou une substance ayant les mêmes propriétés.

La respiration cellulaire



La rouille qui se forme avec le fer

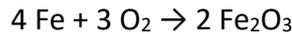


Figure 3. Oxydation d'un anneau en Fer

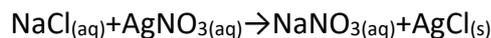


Figure 4. Oxydation des aliments

1.1.2. Les réactions de précipitation

Lorsqu'une réaction donne lieu à la formation d'un précipité (un produit insoluble), il s'agit d'une réaction de précipitation.

Réaction de precipitation



Chlorure de Sodium + Nitrate d'Argent \rightarrow Nitrate de Sodium + Chlorure d'Argent

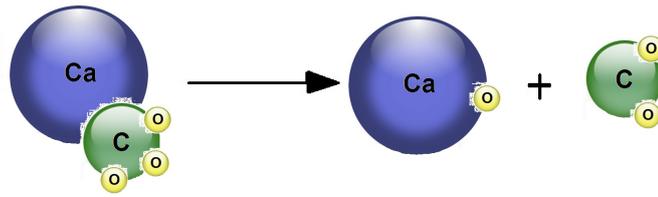
Dans l'exemple ci-dessus, le chlorure d'argent ($\text{AgCl}_{(s)}$) est un précipité blanc formé par la réaction entre le chlorure de sodium ($\text{NaCl}_{(aq)}$) et le nitrate d'argent ($\text{AgNO}_{3(aq)}$).

1.1.3. Les réactions de décomposition

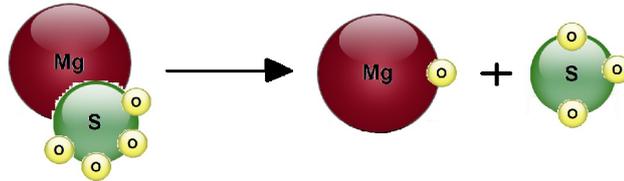
Ce type de réaction implique la décomposition d'une molécule en petits fragments, c'est-à-dire en fragments plus simples.

Un seul réactif intervient dans ce type de réaction, alors que plusieurs produits peuvent être formés.

Parmi les réactions de décomposition, on compte de nombreux oxydes métalliques qui, une fois chauffés, se transforment chimiquement tout en libérant de l'oxygène gazeux.



Carbonate de calcium \rightarrow Oxyde de Calcium + Dioxyde de Carbone

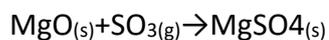
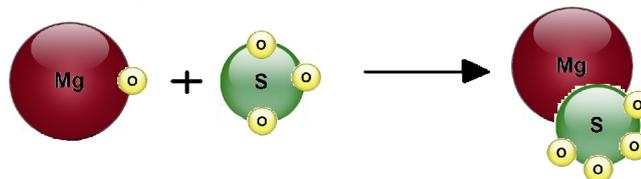
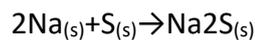
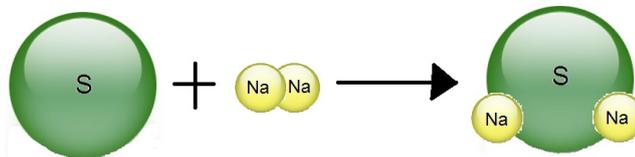


1.1.4. Les réactions de synthèse

Lorsque deux réactifs se sont combinés pour former un seul et nouveau produit, on dira qu'il y a eu une réaction de synthèse.

Dans une réaction de synthèse, les réactifs peuvent être :

- deux éléments ;
- un élément et un composé ;
- deux composés.



Oxyde de Magnésium + trioxyde de Soufre \rightarrow Sulfate de Magnésium

1.2. Les métaux

Un métal est un matériau extrait d'un minerai. C'est une substance généralement brillante, qui conduit bien l'électricité et la chaleur.

Tout comme les bois, les métaux proviennent de la nature. On les extrait dans les mines, à partir de minerais retrouvés dans la croûte terrestre. Il faut donc séparer le métal désiré de l'autre substance retrouvée dans les minerais.

On retrouve les métaux dans la partie gauche du tableau périodique (à l'exception de l'hydrogène). Ce sont généralement des substances brillantes, qui conduisent l'électricité et

la chaleur. Certains métaux résistent à la corrosion, d'autres non, de même que certains sont magnétiques et d'autres non.

Le fer et l'aluminium sont les métaux les plus utilisés. Toutefois, les métaux sont rarement utilisés à l'état pur; on les utilise davantage sous la forme d'alliage.

1.3. Les alliages

Un alliage est un mélange homogène de deux ou plusieurs métaux dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques précises.

Les métaux sont rarement utilisés à l'état pur. Un alliage permet de combiner les propriétés des différents métaux qui sont mélangés. On peut donc créer des matériaux qui possèdent exactement les propriétés adaptées à des besoins très précis. On peut, par exemple, augmenter la dureté d'un métal et ainsi accroître sa résistance à l'usure tout en conservant une bonne malléabilité. On classe généralement les alliages en deux catégories : les alliages ferreux et les alliages non ferreux.

Pour déterminer rapidement si un alliage est ferreux ou non, il suffit d'approcher un aimant de l'alliage en question. Si l'alliage est ferreux, il attirera l'aimant alors qu'il n'y aura pas d'attraction s'il s'agit d'un alliage non ferreux.

1.3.1. Alliages ferreux

Un alliage ferreux est un alliage dont le principal constituant est le fer.

Le fer est un des éléments les plus répandus dans la croûte terrestre. Il s'agit d'un métal ductile (qui peut être étiré), malléable (qui peut être réduit en feuilles) et magnétique. Toutefois, le fer à l'état pur ne résiste pas à la corrosion ni à l'usure. En le combinant avec du carbone, on peut augmenter la résistance mécanique et la dureté du fer. Selon les proportions de fer et de carbone retrouvées dans l'alliage, les propriétés seront modifiées différemment.

1.3.2. Alliages non ferreux

Un alliage non ferreux ne contient pas de fer, mais combine plutôt d'autres métaux.

En plus des alliages à base de fer, il existe dans la nature d'autres minéraux que l'on peut combiner pour former des alliages non ferreux. Ces alliages ne seront pas attirés par un aimant.

2. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C)

Comme vu dans le chapitre 5, le principal élément d'alliage du fer est le carbone. Selon la teneur, on parle de :

- fer : moins de 0,008 % de carbone en masse (limite de solubilité du carbone dans le fer α à température ambiante) ;
- acier : entre 0,008 et 2,11 % de carbone ;
- fonte : teneur supérieure à 2,11 %.

Ces valeurs peuvent varier selon les auteurs. En particulier, certains placent la frontière entre acier et fonte à 1,75 %C, en se basant sur les phases formées à forte vitesse de refroidissement. Avec la multiplication des aciers alliés, on a pu ramener ces valeurs à 2.11 % de Carbone. C'est la limite supérieure actuelle pour obtenir de l'acier par le processus de "trempe martensitique". Mais dans la table des aciers, on peut trouver certains aciers avec

des concentrations de carbone bien supérieures, ces alliages ne sont pas obtenu par trempé mais par frittage.

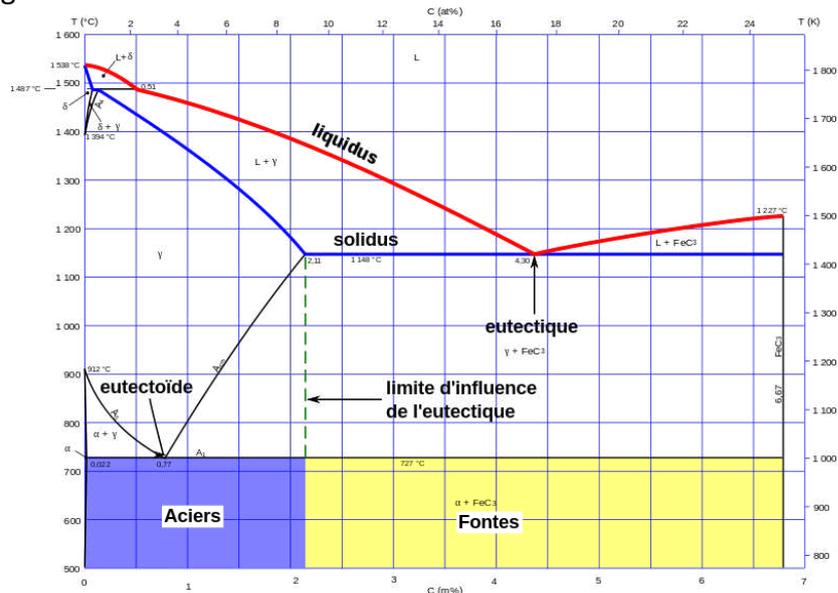


Figure 5 : Diagramme d'équilibre fer-carbone (Température (°C) ; teneur en C(%))

Théoriquement, les aciers contiennent moins de 2.06% de C et les fontes de 2.06 à 6.67% de C. On admet que ces alliages sont binaires, les impuretés jouant un rôle négligeable dans les diagrammes d'équilibres.

On n'étudiera que le diagramme d'équilibre métastable fer-cémentite. La cémentite étant une combinaison chimique : Fe₃C à 6,67% de C, qui est instable mais présente les apparences de la stabilité pour une importante plage de températures.

Le diagramme est quelque peu simplifié en ce sens que l'on n'a pas représenté ce qui concerne le fer : Toute petite région au-dessus de 1400°C avec une concentration en carbone < 0,07%.

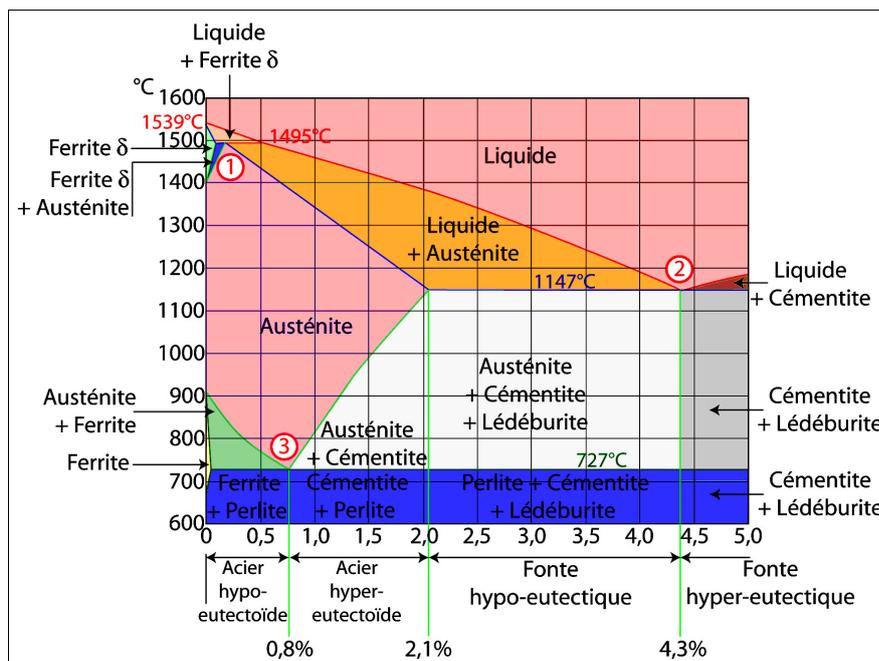
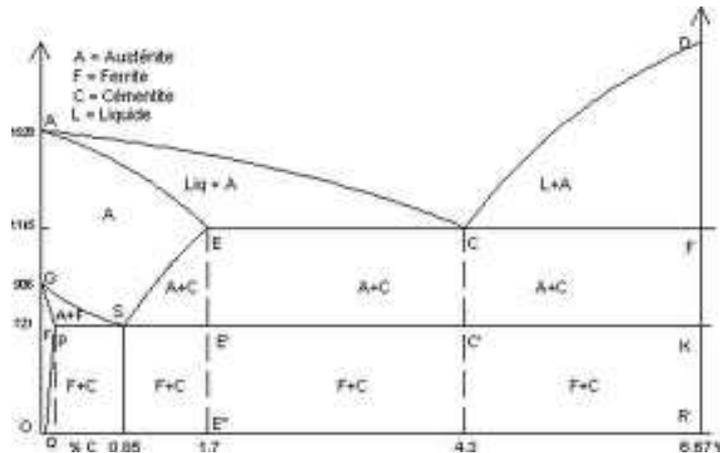


Figure 6 : Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone (en concentration massique) avec point péritectique



Description du diagramme :

Les lignes :

- Liquidus : AC et CD
- Solidus : AE, ECF et FD
- Les lignes de transformation : GS, ES, GP, QP et PSK.

Les phases :

- Austénite : Solution solide de carbone dans le fer. Elle occupe à elle seule le domaine AESG.
- Ferrite : Solution solide de carbone dans le fer. Seule occupante du domaine GPQ, elle coexiste avec l'austénite dans GPS et avec la cémentite dans OPKR.
- Cémentite : Carbure de fer (Fe_3C) à 6,67% de C. Elle coexiste avec l'austénite dans EFKS et avec la ferrite dans QPKR.

Points particuliers :

- Eutectique C : (4,3% de C) à 1145°C. Cet alliage est formé de cémentite et de sol.sol. de fer à 1,7% de C. L'eutectique C est appelé Lédéburite (52% de Fe_3C et 48% d'austénite).
- Eutectoïde S : (0,85% de C) à 721°C. C'est un agrégat de ferrite et de cémentite. Cet eutectoïde est appelé Perlite (87,3% de ferrite et 12,7% de cémentite).

Diagramme fer-carbone restreint aux aciers

Dans la partie étudiée, entre 0 et 6,67 % en masse de carbone, le diagramme binaire fer-carbone présente un eutectoïde appelé perlite à 0,77 %C et un eutectique appelé lédéburite à 4,30 %C. On ne s'intéresse pas aux transformations en phase δ à haute température (zone en haut à gauche). Au vu de ce diagramme :

- les aciers sont les alliages ne contenant pas d'eutectique ;
- les fontes contiennent de l'eutectique, et par rapport aux aciers, elles ont une température de fusion plus basse.

Dans la partie des aciers (moins de 2,11 % de carbone), à haute température, le fer a une structure appelée austénite ou fer γ ; c'est une maille cubique à faces centrées. En refroidissant, l'austénite se transforme en ferrite, également appelée fer α , de structure cubique centrée. Comme nous l'avons vu précédemment, les sites interstitiels de l'austénite sont plus grands que ceux de la ferrite. Le fer γ peut donc « stocker » plus de carbone que le fer α . Ainsi, lors du refroidissement, la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ chasse le carbone. Celui-ci se concentre dans l'austénite qui ne s'est par encore transformée, et vient former des carbures

de fer Fe_3C appelés « cémentite ». On obtient donc à température ambiante une structure biphasée ferrite + cémentite. Mise à part pour les faibles teneurs en carbone, une partie de la cémentite forme des lamelles avec la ferrite dans une structure appelée perlite (eutectoïde).

Pour certaines fontes, le carbone peut précipiter sous forme de graphite. On a alors un diagramme de phases différent, et l'eutectique fer/graphite ne porte pas de nom particulier (le terme lédéburite désigne l'eutectique fer/cémentite).

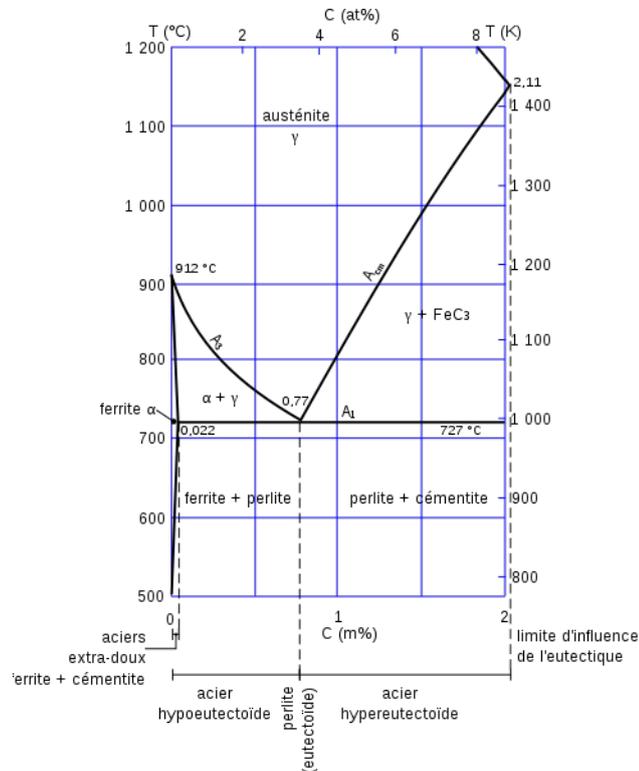


Figure 7 : Diagramme fer-carbone restreint aux aciers

3. Les traitements thermiques

Le traitement thermique des alliages est un procédé qui modifie les propriétés mécaniques de l'alliage en le soumettant à des épisodes de chauffage.

Les traitements thermiques, bien que pouvant être effectués sur le bois et sur le verre, sont généralement effectués sur les alliages. Ces traitements nécessitent un chauffage à haute température. Le but des traitements thermiques est de ré agencer les molécules d'un alliage en le chauffant afin d'en modifier les propriétés mécaniques. En effet, la nouvelle disposition des molécules obtenues permet de retrouver les propriétés mécaniques de l'alliage dans le cas d'une réparation ou d'en obtenir de nouvelles dans le cas d'une modification.

Les opérations de traitement thermique sont destinées à modifier les caractéristiques des matériaux métalliques.

Elles agissent principalement sur :

- la dureté
- la résistance à la rupture
- la résilience ou la ductilité

Elles ont aussi un effet sur :

- les propriétés tribologiques (frottement)
- la résistance à la corrosion
- les propriétés magnétiques
- la stabilité dimensionnelle

Une opération de traitement thermique consiste à faire subir au matériau un cycle thermique comprenant un chauffage selon une allure imposée, un maintien à une ou plusieurs températures, un refroidissement à une vitesse déterminée.

Les traitements thermiques se répartissent en deux grandes catégories :

- **Les traitements de durcissement**
- **Les traitements d'adoucissement**

Ils se classent également selon qu'ils ont :

- Pour effet de modifier en profondeur les propriétés du matériau dans toute la section ou toute la masse du produit traité : **TRAITEMENT DANS LA MASSE**
- Pour effet de modifier superficiellement les propriétés du matériau sur une profondeur limitée : **TRAITEMENTS SUPERFICIELS** ou **TRAITEMENTS THERMIQUES DE SURFACE**.

La science des traitements thermiques repose sur l'existence et sur la possibilité de provoquer des transformations métallurgiques dans la structure cristalline des matériaux par application de cycles thermiques.

Le traitement thermique est un moyen de fabriquer des caractéristiques mécaniques. Il optimise l'emploi d'un matériau et est une solution de renforcement des pièces mécaniques. Il est la valeur ajoutée à la mécanique.

Les trois principaux traitements thermiques des alliages sont la trempe, le revenu et le recuit.

3.1. La trempe

La trempe permet d'améliorer la dureté des pièces mécaniques, en les rendant toutefois un peu plus fragiles. Ce traitement comprend deux étapes. L'alliage doit d'abord être chauffé à très haute température afin que les atomes puissent se réorganiser. L'alliage est ensuite refroidi très rapidement, en le trempant dans un fluide froid. Ce trempage interrompt le déplacement des atomes et procure de nouvelles propriétés à l'alliage.

La trempe est une opération qui consiste à chauffer uniformément un acier à une température puis à le refroidir de façon rapide et continue. Le maintien en température doit être suffisamment prolongé pour que tous les carbures passent en solution, sans produire d'accroissement du grain de l'austénite. La vitesse de refroidissement doit être supérieure à un seuil appelé vitesse critique de trempe, marquant une discontinuité dans la loi d'abaissement du point de transformation au refroidissement, et au-delà de laquelle on obtient la suppression des structures d'équilibre de ferrite et de cémentite à basse température. Cette vitesse étant dépassée, on assiste à un rejet de ces deux constituants vers 350°C et à l'apparition de la martensite, avec un accroissement très important de la dureté.

Pour provoquer ce refroidissement rapide on utilise des fluides, dits fluides de trempe qui sont : les saumures, l'eau, les émulsions d'huiles solubles, les gaz, l'air, les sels fondus. En

général, pendant le refroidissement, le fluide de trempe est agité pour obtenir un effet de refroidissement uniforme.

Mais, pour la plupart des utilisations, la martensite est trop dure, trop fragile, et soumise à des tensions internes. Par conséquent. Les aciers utilisés directement après trempe peuvent faire apparaître des déformations et comporter des tapures. Pour éliminer ces tensions, on procède à l'opération de revenu, qui permet de contrôler exactement les propriétés mécaniques de l'acier en réduisant dans une certaine mesure sa dureté et sa résistance à la traction, mais en augmentant sa ductilité, c'est-à-dire son coefficient d'allongement et sa résilience.

Les différents procédés de trempe

Les divers procédés de trempe permettent d'obtenir des résultats différents, en faisant varier la vitesse de refroidissement et la rapidité de la transition au point de transformation.

3.1.1. La trempe normale

C'est le procédé le plus couramment employé pour la trempe des aciers et de leurs alliages. Les pièces sont immergées complètement dans le fluide de trempe et sont retirées après refroidissement, à une température voisine de celle du bain. Le fluide est soumis à une agitation permanente pour assurer une trempe uniforme dans toutes les parties des pièces. Les pièces peuvent également être agitées, selon la disposition de l'installation,

3.1.2. La trempe partielle

Consiste à chauffer seulement la partie de la pièce qui doit subir la trempe, et immerger ensuite la totalité de cette pièce dans le bain de trempe. On peut chauffer aussi entièrement la pièce et ne tremper que la partie à durcir ; dans ce cas il convient de communiquer à la pièce un mouvement vertical, de manière à obtenir un refroidissement progressif au-dessus de la limite de la partie à tremper.

3.1.3. L'hypertrempe

Les aciers austénitiques dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 à 800 °C. Il est donc effectué en général à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel. Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir - ou remettre- en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.

3.1.4. La trempe en deux phases : peut se pratiquer suivant deux méthodes distinctes.

Méthode 1 :

L'installation comporte à la partie inférieure du bac de trempe une charge d'eau et à la partie supérieure, une nappe d'huile minérale, d'une épaisseur déterminée. Les pièces sont d'abord immergées dans l'huile, où elles peuvent être maintenues pendant un temps plus ou moins long, et subissent ainsi un premier refroidissement. Puis, dans un deuxième temps, les pièces sont immergées plus profondément pour passer au contact de l'eau. Ce procédé

permet d'obtenir une trempe adoucie sur des aciers sensibles aux déformations et aux tapures, mais qui accuseraient une dureté insuffisante en subissant seulement une trempe à l'huile.

Méthode 2 :

L'installation comporte à la partie inférieure du bac une charge d'huile spéciale, de densité supérieure à celle de l'eau et à la partie supérieure, une nappe d'eau. Ce procédé est appliqué lorsque l'obtention de très grandes duretés exige une courte période de refroidissement énergétique et immédiat suivie d'une phase de détente dans l'huile.

3.1.5. La trempe au jet

Ce procédé convient particulièrement à la trempe de pièces compliquées, de sections très différentes. Pendant l'opération, le jet est dirigé sous pression sur les masses les plus importantes de la pièce, au centre des surfaces, pour obtenir un équilibre rapide entre les différentes parties de celle-ci: arêtes, faibles et fortes épaisseurs, afin d'éviter les déformations et les tapures. On utilise souvent ce procédé pour la trempe à l'huile de cylindres creux de petit diamètre, l'huile sous pression étant projetée énergiquement à l'intérieur de l'alésage, ce qui permet d'obtenir des surfaces extrêmement dures.

3.2. Le revenu

La revenue permet de rendre un alliage un peu plus ductile, tout en lui permettant de conserver une certaine dureté. Ce traitement se fait sur un alliage ayant déjà été trempé. Il consiste à chauffer un alliage trempé à une température précise, inférieure à celle de la trempe afin que l'alliage ne perde pas les propriétés acquises lors de cette étape. Plus la température de revenu est élevée, moins l'alliage sera dur et plus il sera ductile.

Le revenu consiste à réchauffer une pièce trempée, à une température inférieure pendant un temps déterminé. La martensite se dissocie en un complexe de cémentite dispersée dans du fer alpha, pour former des globules microscopiques agglomérés. On obtient une structure sorbitique ou troostitique suivant les températures choisies. Si l'on prolonge le chauffage jusqu'à une température suffisante, on obtiendra finalement l'équilibre perlitique semblable à celui obtenu après le recuit d'adoucissement.

Les facteurs influençant les résultats du revenu sont la température et le temps. Au-delà d'une heure, les transformations sont très lentes. La vitesse de refroidissement n'a, en principe, pas d'importance, à l'exception d'un refroidissement trop brutal qui pourrait provoquer des tensions internes.

Ce sont les fours à recyclage d'air qui permettent d'obtenir le chauffage le plus rationnel pour les opérations de revenu, mais on utilise également les bains d'huile et de sels.

Les différents procédés de revenu

Dans la plupart des procédés de revenu, on place la pièce froide dans un four, ou on l'immerge dans un bain qui est déjà porté à la température requise. Pour certains aciers, le changement brusque peut créer des contraintes internes, d'une part à cause du gradient de température de la surface au noyau, d'autre part par suite de la contraction de la martensite chauffée. Le changement peut être brutal, aussi les techniques de chauffage varient suivant les cas.

Dans certains cas délicats, le bain et l'acier sont froids au départ et on les chauffe ensemble ; on peut utiliser un four à air chaud à circulation forcée, dans lequel la chaleur émise par les résistances électriques est absorbée lentement et progressivement par l'acier, même si la température de revenu est très élevée.

Si l'on choisit le procédé d'immersion dans un bain. Le choix du fluide est dicté par la température de revenu. Pour des températures inférieures à 280 °C environ, on utilise les huiles minérales. Pour des températures supérieures à 280 °C et s'échelonnant jusqu'à 6500 C. on utilise les sels fondus, le plomb fondu, ou un four électrique à circulation d'air. Les bains de sels doivent toujours être employés à une température un peu supérieure à celle de leur point de fusion, car, lors de l'immersion de la pièce dans le liquide, il se produit un abaissement de température qui provoque un dépôt de sel cristallin sur la pièce, ce dépôt disparaissant dès que la pièce a pris la température du bain.

3.3. Le recuit

Le recuit permet de restaurer les propriétés de l'alliage après sa déformation. Pour ce faire, on doit chauffer suffisamment l'alliage puis le laisser refroidir lentement par la suite. On peut alors effacer les traces laissées par les contraintes engendrées lors de la fabrication, par exemple des traces de soudure, ou encore obtenir des alliages moins durs et plus facile à usiner.

Les pièces coulées, forgées, présentent de nombreux défauts dus à une série d'opérations exécutées à des températures plus ou moins basses et à des inégalités de température existant dans le cœur du métal. Les pièces façonnées par déformation à froid subissent un écrouissage qui entraîne l'altération de leurs propriétés d'allongement de résilience et de malléabilité. Le recuit permet de détruire l'effet de ces irrégularités. Il consiste, en général à chauffer une pièce, et à la laisser refroidir à une vitesse relativement lente. La température de recuit, ainsi que les conditions de chauffage et de refroidissement, dépendent du type d'acier, de la dimension des pièces et de l'objet du traitement. On obtient ainsi, en éliminant les variations de structure et les tensions internes, un état d'équilibre et une amélioration des caractéristiques : homogénéité du métal, allongement et malléabilité, propriétés requises pour un usinage ultérieur ou pour une utilisation immédiate de pièces finies.

Il existe plusieurs types de recuits qui, pratiquement, sont comparables sur le plan technique, mais qui sont effectués dans des buts différents.

Les différents procédés de recuit

3.3.1. Le recuit d'adoucissement

Ce procédé est utilisé sur les pièces trempées pour atténuer les effets de la trempe et détruire les constituants durs formant obstacle à un usinage ultérieur. On chauffe le métal entre 850° et 900°C environ. Le refroidissement doit être très lent pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, et rapide pour les aciers austénitiques.

Une méthode particulière d'adoucissement consiste à utiliser un cycle thermique permettant de « sphéroïdiser » ou « globulariser » la perlite, en chauffant l'acier et en le laissant refroidir tout juste au-dessous et autour duquel on fait intervenir de faibles variations de température pour faciliter la formation de petites sphérules de carbure de fer, dans une matrice perlitique. Ce procédé applicable aux aciers au carbone et aux aciers alliés - mais non aux aciers austénitiques - est parfois utilisé avant une opération d'usinage ou avant des travaux difficiles de déformation à froid.

3.3.2. Le recuit de régénération

Il est appliqué à un acier qui a été surchauffé, au cours du forgeage ou du laminage par exemple. Un acier surchauffé est caractérisé par un grain grossier, cristallisé, et présente une malléabilité médiocre. Ce procédé a pour but d'affiner le grain et rendre l'acier plus apte à

l'usinage. Il comporte également le chauffage et le maintien de l'acier, pendant un temps très court, à une température. Les grains se multiplient lors de la transformation de la perlite en austénite. Le refroidissement à l'air doit être suffisamment lent pour éviter une granulation ferritique de dimension trop importante. Le recuit de régénération est donc très voisin du recuit d'adoucissement, ils ne diffèrent que par le but à atteindre ; l'acier conservant cependant, dans le premier cas, une plus grande résistance à la traction que dans le second cas.

La granulation est un élément très important qui dépend de la température et du temps de maintien à cette température. La présence d'éléments d'addition : chrome, vanadium, tungstène, etc... forme un obstacle au grossissement du grain.

3.3.3. Le recuit de stabilisation

Le procédé est utilisé pour éliminer les effets d'un travail mécanique à chaud trop intense, (forgeage) et terminé à une température trop basse. Pour détruire ces effets qui ont provoqué une rupture de l'équilibre moléculaire des constituants, il est nécessaire de chauffer l'acier à une température bien supérieure. Dans ces conditions, le métal rendu plus malléable peut ainsi se détendre et reprendre une certaine régularité de texture. Les tensions internes disparaissent et par conséquent les causes de déformations lors d'une trempe ultérieure. Mais ce chauffage à température élevée provoque une cristallisation grossière qui diminue la résilience du métal. Un deuxième recuit, qui permettra d'obtenir une cristallisation plus fine, est donc souvent nécessaire.

3.3.4. Le recuit de recristallisation

C'est un recuit de régénération destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit de stabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure : (emboutissage par exemple), les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante.

4. Modification de la composition des Aciers

Ces traitements modifient, sous une épaisseur plus ou moins importante, la composition initiale des aciers en y incorporant un élément complémentaire. La modification a lieu sous une température élevée pour assurer l'inter diffusion de l'élément suivant des lois bien déterminées et suivant les conditions particulières à chaque élément. Les éléments le plus couramment incorporés par diffusion sont le carbone et l'azote ; mais les diffusions de soufre sont également utilisées.

4.1. La cémentation

Dans la cémentation, les couches extérieures d'une pièce deviennent très dures tandis que le noyau reste ductile. Le procédé comporte, tout d'abord, une opération dans laquelle la surface est enrichie en carbone, ou en carbone et en azote, par un chauffage de longue durée dans un milieu de carburation qui peut être un solide en granulé, un liquide ou un gaz. Dans le traitement le plus simple et le plus courant, la pièce est refroidie directement après l'opération de carburation. Dans les traitements plus élaborés, on effectue ensuite

deux traitements thermiques ; l'un pour affiner et renforcer le noyau, l'autre pour durcir la surface.

4.2. La cémentation en vase clos

Dans ce procédé qui n'exige pas d'installation spéciale, les pièces sont placées en caisses métalliques au contact de substances carbonées solides, telles que des os broyés, du charbon, en même temps que d'un activant comme le carbonate de baryum, lequel facilite la circulation des gaz à travers les caisses. Celles-ci sont scellées, puis chauffées et maintenues à une température supérieure. Dans ces conditions, le carbone est absorbé par les couches superficielles et l'on obtient une teneur en carbone d'environ 1,0 %. En huit heures environ on obtient une profondeur de cémentation qui peut atteindre 1,6 mm. Le milieu de carburation est de l'oxyde de carbone.

4.3. La cémentation gazeuse

C'est un procédé de cémentation plus rapide, plus direct et plus facile à contrôler que le procédé de cémentation en caisse. Il est basé sur les propriétés carburantes d'un mélange de gaz (carbures d'hydrogène et oxyde de carbone) qui circule dans un four, au contact des pièces à cémenter. Ces gaz: l'oxyde de carbone et le méthane, qui pyrolysent à la température de carburation, fournissent le carbone superficiel. Une méthode courante consiste à introduire le milieu de carburation dans une cornue chauffée et fermée dans laquelle on fait culbuter mécaniquement la pièce. On utilise généralement des gazogènes dans lesquels l'atmosphère de carburation est produite de façon endothermique à partir de gaz contenant du carbone, enrichis d'hydrocarbures. La cémentation gazeuse permet de contrôler très exactement la profondeur de cémentation et elle est plus rapide que la cémentation en caisse, car le temps nécessaire pour chauffer le matériel se trouve économisé. Autre avantage, la cémentation peut être suivie par un cycle de diffusion au cours duquel il n'y a pas admission de gaz, ce qui fait baisser la teneur du carbone en surface et permet d'obtenir une meilleure graduation de la couche de cémentation. Ce procédé nécessite toutefois des investissements importants et son emploi ne peut donc être envisagé que pour des traitements de grandes séries de pièces.

4.4. La carbonituration

La carbonituration est une méthode gazeuse de cémentation dans laquelle on introduit de l'azote ainsi que du carbone dans la surface de l'acier. Ce procédé est largement utilisé et il présente l'avantage d'une mise en œuvre à relativement basse température, habituellement entre 815 et 875 °C. De même qu'avec la cémentation gazeuse, on peut utiliser un gazogène endothermique; en fait on peut utiliser le même gaz porteur dans les deux procédés. La seule différence est qu'on ajoute, en carbonituration, un troisième gaz : de l'ammoniac anhydre qui pyrolyse pour produire de l'azote et de l'hydrogène naissant.

La carbonituration a largement remplacé le traitement en bain de cyanure à cause des risques que présentait la mise en œuvre de celui-ci. Dans ce procédé, les pièces d'acier sont immergées dans un bain de sel de cyanure fondu et sont maintenues à une température d'environ 870°C; cette opération permet d'obtenir un mélange de carbures et de nitrures dans la couche superficielle.

4.5. La nitruration

Le procédé de nitruration consiste à soumettre les aciers spéciaux trempés et « revenus » à l'action du gaz ammoniac, sous des températures qui varient habituellement entre 500 et 550° C, Il se produit différentes combinaisons fer-azote, en particulier du nitrure de fer, ainsi qu'une solution solide à faible teneur en azote. Les éléments d'addition: chrome, tungstène, etc... se combinent également à l'azote pour former également des nitrures. Le durcissement superficiel est considérable et l'action de l'azote est progressive, de sorte que la couche durcie est solidement liée au noyau. La température de l'opération, relativement basse, permet d'éviter, en grande partie, les déformations qui peuvent se produire lors du durcissement par d'autres procédés, en particulier par la cémentation. On constate cependant un très léger «gonflement », dont il convient de tenir compte. L'épaisseur de la couche durcie dépend de la durée de l'opération et peut varier de quelques centièmes de millimètres à un millimètre environ. Aucune trempe n'est nécessaire après l'opération de nitruration.

5. Éléments d'alliage et impuretés

Les aciers contiennent d'autres éléments que le fer et le carbone. Lorsqu'il s'agit d'éléments résiduels non voulus mais provenant du procédé de fabrication (par exemple contenus dans le minerai ou les objets de recyclage), on parle d'impuretés. Lorsqu'il s'agit d'éléments ajoutés volontairement pour donner des propriétés particulières à l'acier, on parle d'éléments d'alliage.

6. Propriétés mécaniques

Les aciers ont quasiment tous le même module de Young : $E \approx 200$ GPa.

L'austénite a un module de Young plus faible que la ferrite :

$E_{\text{ferrite}} = 207$ GPa ;

$E_{\text{austénite}} = 193$ GPa.

La ferrite a une masse volumique ρ de 7 874 kg/m³, celle de l'austénite vaut 8 679 kg/m³.

On utilise en général des aciers hypoeutectoïdes (moins de 0,77 % de carbone). De manière globale :

- les aciers austénitiques sont très ductiles mais ont une limite élastique très basse, en effet, leur structure cubique à face centrée permet de nombreux glissements faciles entre les plans cristallins ; ils sont facilement formables à température ambiante ;
- les aciers martensitiques ou bainitiques (aciers trempés) ont une haute limite élastique mais une faible ductilité (voir ci-dessus) ;
- les aciers ferritiques sont entre les deux.

Voici à titre indicatif des valeurs typiques.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques typiques d'aciers hypoeutectoïdes

Acier	Limite élastique R_e (MPa)	Allongement à la rupture $A\%$
Acier extra-doux (ferritique très bas carbone)	150	35
Acier austénitique (hypertrempe)	200	25-50
Acier ferritique	200-400	20-25
Acier martensitique (trempe)	400-1 000	10-20

7. Propriétés magnétiques

La ferrite et la martensite sont ferromagnétiques ; l'austénite est paramagnétique. Un aimant adhère donc moins bien à l'austénite qu'à la ferrite ou à la martensite ; on utilise souvent le « test de l'aimant » pour reconnaître un acier austénitique. L'austénite est souvent qualifiée à tort « d'amagnétique » (ce terme n'a pas de sens physique). Au-delà de 770 °C (point de Curie), la ferrite devient paramagnétique, elle perd son aimantation

On augmente les propriétés magnétiques (perméabilité magnétique) des aciers ferritiques par addition de silicium à moins de 4 % : de trop fortes teneurs fragilisent l'acier. On utilise naturellement des aciers bas carbonés (< 0,01 %), celui-ci étant gamma gène.

8. Ce qu'il faut retenir

La structure de l'acier conditionne ses propriétés mécaniques et physiques en général. Elle dépend :

- de la teneur en carbone, la structure à l'équilibre est donnée par le diagramme fer-carbone ;
- de la vitesse de refroidissement et des traitements thermomécaniques :
 - recuit : permet de maîtriser la structure de l'acier (taille des grains, isotropie, annulation de l'érouissage),
 - présence d'éléments gammagène et hypertrempe → acier austénitique,
 - teneur suffisante en carbone, éventuels ajouts d'éléments gammagène (en particulier le nickel) et carburigènes (en particulier le molybdène), et trempe → acier martensitique ; - le revenu permet d'adoucir la trempe et de rendre l'acier moins fragile.

Le chrome à haute teneur (supérieure à 10 %m) confère une résistance à la corrosion en formant une couche protectrice d'oxyde, dite couche passive, ce qui permet de faire des aciers dits « inoxydables ».

Le carbone peut former des carbures qui précipitent aux joints de grain avec divers éléments d'alliage et ainsi fragiliser l'acier ou bien réduire sa résistance à la corrosion (piégeage du chrome). Les aciers fortement alliés sont pour cela en général à basse teneur en carbone.

Références Bibliographiques

- <http://bv.alloprof.qc.ca>
- http://www.soloswiss.eu/traitement_thermique_solo/la-trempe-et-le-revenu/index.html
- <http://www.youtube.com/watch?v=UqiptwWzB94>
- <http://www.youtube.com/watch?v=w4Nf2Sp51ik>
- <http://www.youtube.com/watch?v=GDZBfkbQcG8&feature=endscreen>