

Matériaux

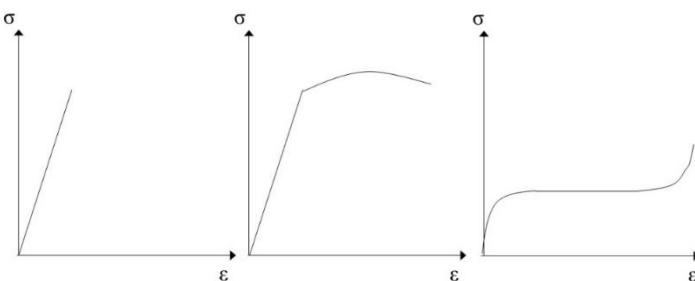
-

Propriétés mécaniques, thermiques, électriques

Propriétés de surface

Choix des matériaux

Cours et exercices corrigés



Frédéric Menan

<https://lesdocsduprof.com/>

fmenan@cesi.fr

Avril 2024

Table des matières

1 PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX	4
1.1 NOTIONS PRELIMINAIRES	4
1.2 COMPORTEMENT EN TRACTION.....	5
1.3 COMPORTEMENT EN CISAILLEMENT.....	10
1.4 COMPORTEMENT EN COMPRESSION HYDROSTATIQUE.....	10
1.5 ESSAIS MECANIQUES	11
1.6 COMPORTEMENT LORS D'UN CHOC : RESILIENCE.....	16
1.7 CONCENTRATION DE CONTRAINTE.....	18
1.8 COMPORTEMENT EN PRESENCE D'UNE FISSURE : TENACITE	19
1.9 COMPORTEMENT SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE : FATIGUE.....	20
1.10 FLUAGE	21
1.11 COMPORTEMENT AU CONTACT DE DEUX PIECES : USURE.....	21
2 PROPRIETES THERMIQUES.....	22
2.1 RAPPEL : LES MODES DE TRANSFERTS DE LA CHALEUR.....	22
2.2 CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).....	22
2.3 CHALEUR LATENTE (J/mol OU J/kg).....	22
2.4 CONDUCTIVITE THERMIQUE Λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).....	23
2.5 DIFFUSIVITE THERMIQUE A (m^2/s)	23
2.6 EFFUSIVITE THERMIQUE E ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot K^{-1}$)	23
2.7 DILATATION THERMIQUE.....	24
2.8 ANNEXE. MESURE DE TEMPERATURE.....	25
3 PROPRIETES ELECTRIQUES	31
3.1 INTRODUCTION.....	31
3.2 CONDUCTION IONIQUE	31
3.3 CONDUCTION ELECTRONIQUE	31
3.4 RESISTIVITE ET CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	32
3.5 PIEZOELECTRICITE	33
3.6 PROPRIETES DIELECTRIQUES.....	33
3.7 POUR ALLER PLUS LOIN	34
4 PROPRIETES DE SURFACE.....	35
4.1 DEFINITIONS.....	35
4.2 TENSION SUPERFICIELLE	35
4.3 MOUILLABILITE	37
4.4 ADHESION / ADHERENCE.....	39
4.5 PROPRIETES DE SURFACE ET EMBALLAGES	40
5 CHOIX DES MATERIAUX	42
1 INTRODUCTION.....	42
2 INDICE DE PERFORMANCE	42
6 EXERCICES.....	45
6.1 QCM	45
6.2 PROPRIETES MECANIQUES DES MATERIAUX.....	46

6.3	PROPRIETES THERMIQUES	52
6.4	CORROSION	60
6.5	CHOIX DES MATERIAUX.....	65
7	REFERENCES	71

Remarque : certains chapitres de ce texte ont été rédigés il y a longtemps et démarrés sur des Powerpoint dont les crédits photos se sont parfois perdus en route. J'essaie de citer l'ensemble de mes sources dans les références en fin de document. Si j'ai oublié de vous citer vous pouvez m'envoyer un mail fmenan@cesi.fr et je corrigeraï le document.

1 Propriétés Mécaniques des Matériaux

1.1 Notions préliminaires

Matériau homogène / hétérogène et Matériau isotrope / anisotrope

Un matériau homogène est un matériau qui a les mêmes propriétés en tout point.

Un matériau isotrope a les mêmes propriétés dans toutes les directions de l'espace.

Contrainte

Soit une section de surface S soumise à un effort \vec{F} . On peut décomposer cet effort en une partie normale à la section et une partie tangentielle à la section. La composante normale sera l'effort normal F_n . La composante tangentielle sera l'effort tangentiel F_t .

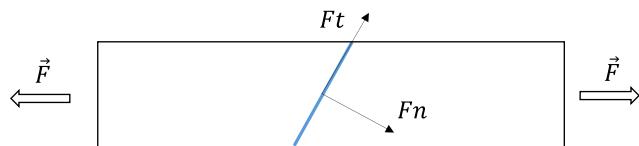


Figure 1. Effort normal (ou effort de traction) et tangentiel (ou effort de cisaillement) au sein d'une section S

La contrainte normale σ sera donnée par :

$$\sigma = \frac{F_n}{S}$$

La contrainte tangentielle τ sera donnée par :

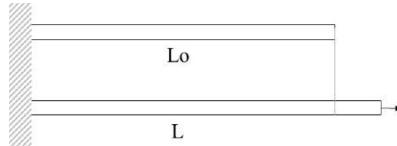
$$\tau = \frac{F_t}{S}$$

Une contrainte est une force par unité de surface. Elle est homogène à une pression. L'unité SI d'une contrainte est donc le Pascal mais l'unité usuelle en matériaux est le MégaPascal MPa (N/mm²).

Déformation

Soit une pièce de longueur initiale L_0 . Sous l'action d'un effort ou d'un déplacement, la pièce prend une longueur L .

L'allongement ΔL (mm) de la pièce est



$$\Delta L = L - L_0$$

La déformation conventionnelle ε de la pièce est

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Une déformation est dite « élastique » si elle est réversible. Lorsque l'effort/déplacement n'est plus appliqué, la pièce reprend ses dimensions initiales.

Une déformation irréversible est dite plastique. Lorsque l'effort/déplacement n'est plus appliqué, la pièce ne reprend pas ses dimensions initiales.

1.2 Comportement en traction

Comportements typiques de traction

On peut décrire le comportement en traction de la plupart des matériaux à l'aide d'un des trois comportements donnés ci-dessous.

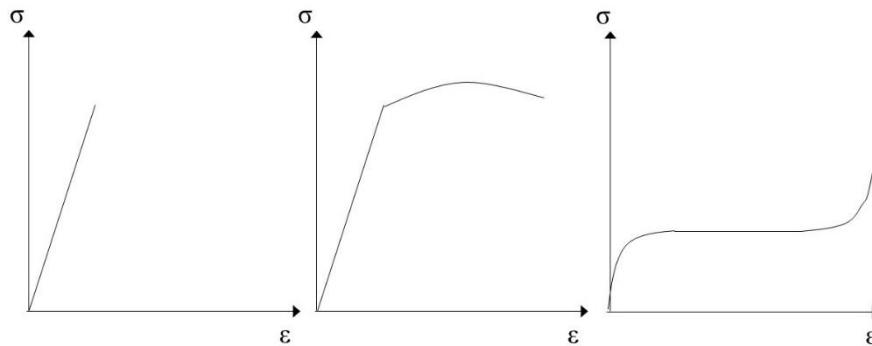


Figure 2. Gauche : linéaire élastique fragile. Milieu : linéaire élastique ductile. Droite : élastique non linéaire

Linéaire élastique fragile

En début de traction, la déformation est élastique : réversible. Il y a relation linéaire entre la contrainte et la déformation. On parle de comportement linéaire élastique.

La rupture intervient ensuite sans déformation plastique notable : on parle de comportement fragile.

Ces matériaux sont sensibles au phénomène de concentration de contraintes, donc ils sont très sensibles à la présence de défauts (porosités, fissures internes).

Linéaire élastique ductile

Le comportement est linéaire élastique en début de traction.

Il y a ensuite apparition d'une déformation plastique notable avant rupture (partie non linéaire de la courbe). On parle de comportement ductile.

Elastique non linéaire

Sur une grande gamme de déformation, la déformation est élastique mais il n'y a pas relation linéaire entre la contrainte et la déformation.

La courbe de traction

Soit une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur initiale L_0 .

La courbe de traction conventionnelle trace la contrainte conventionnelle (aussi appelée nominale)

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0}$$

en fonction de la déformation conventionnelle (aussi appelée nominale)

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta L}{L_0}$$

On trouve sur cette courbe :

- Le module d'Young E , pente de la partie linéaire élastique.
- La limite d'élasticité R_e du matériau, contrainte au-delà de laquelle la déformation devient plastique

La résistance à la rupture $R_m = F_{max}/S_0$, contrainte qui correspond à l'effort maximal mesuré lors de l'essai (donc en début de striction)

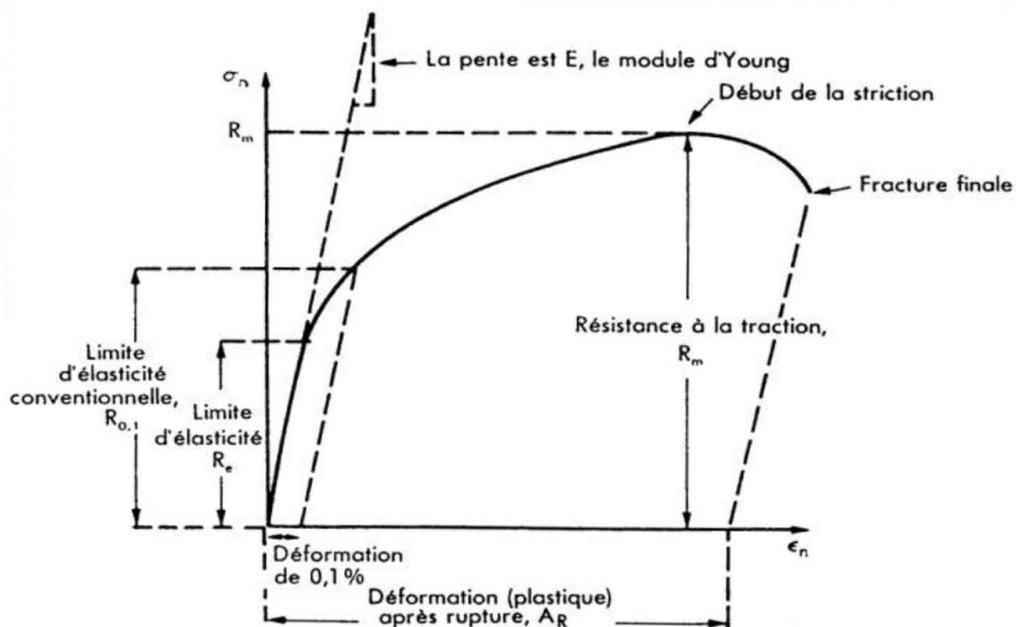


Figure 3. Courbe de traction pour un matériau linéaire élastique ductile

1.2.1.1 Domaine élastique linéaire

La relation entre contrainte et déformation est décrite par la loi de Hooke en traction uniaxiale :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

E (en MPa) : module d'Young du matériau.

E dépend notamment de la nature des liaisons dans le solide :

Covalente	$\sim 10^6$ MPa
Métallique	30-200 000 MPa
Ionique	30-70 000 MPa
Pont hydrogène	8 000 MPa
Van der Waals	2 000 MPa

Effet Poisson

Pour une traction suivant l'axe longitudinal L , il se produit une contraction dans l'axe transversal t (conservation du volume). On parle d'effet Poisson. On définit alors le coefficient de Poisson ν tel que :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}$$

Remarque : $0 \leq \nu \leq 0.5$

Loi de Hooke généralisée (loi de comportement du solide élastique linéaire)

Elle généralise la loi de Hooke au cas multiaxial. Car l'effet Poisson induit un couplage entre contraintes et déformations dans toutes les directions.

Une contrainte σ_i entraîne les déformations :	ε_1	ε_2	ε_3
σ_1	$\frac{\sigma_1}{E}$	$-\nu \cdot \frac{\sigma_1}{E}$	$-\nu \cdot \frac{\sigma_1}{E}$
σ_2	$-\nu \cdot \frac{\sigma_2}{E}$	$\frac{\sigma_2}{E}$	$-\nu \cdot \frac{\sigma_2}{E}$
σ_3	$-\nu \cdot \frac{\sigma_3}{E}$	$-\nu \cdot \frac{\sigma_3}{E}$	$\frac{\sigma_3}{E}$

Finalement, la loi de Hooke généralisée énonce

$$\varepsilon_1 = \frac{1 + \vartheta}{E} \sigma_1 - \frac{\vartheta}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1 + \vartheta}{E} \sigma_2 - \frac{\vartheta}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1 + \vartheta}{E} \sigma_3 - \frac{\vartheta}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Limite d'élasticité Re

Pour une contrainte seuil, appelée limite d'élasticité Re , la déformation cesse d'être élastique : une déformation plastique, donc irréversible, apparaît.

La transition élastique – plastique est parfois difficile à situer sur la courbe de traction. On définit donc souvent la limite d'élasticité par convention (Figure 4).

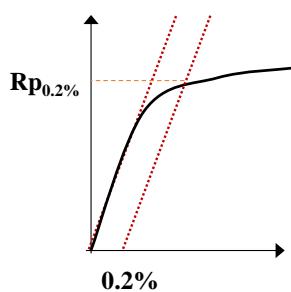


Figure 4. Limite d'élasticité $Rp_{0.2\%}$

Domaine plastique

Ecrouissage

Lorsque la contrainte appliquée dépasse Re , on entre dans le domaine plastique. La première partie de ce domaine est la zone d'écrouissage. La courbe de traction dans ce domaine peut se traduire par :

$$\sigma = \sigma_e + k\varepsilon^n$$

n : coefficient d'écrouissage ; k : facteur de résistance

Dans ce domaine, le matériau « durcit » : si l'on relâche le matériau, la nouvelle contrainte à appliquer pour continuer à déformer plastiquement le matériau est augmentée.

Résistance en traction Rm

Au pic de la courbe (correspondant à F_{max} : effort max mesuré ou imposé pendant l'essai), on définit la contrainte Rm. Si So est la section initiale de l'éprouvette (avant chargement), alors

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}$$

Striction

A partir de Rm, la déformation, qui était auparavant uniforme sur l'ensemble du matériau, se localise en une zone. L'allongement n'est plus réparti sur toute l'éprouvette, il se localise dans une zone dont la section diminue fortement. On parle de striction.

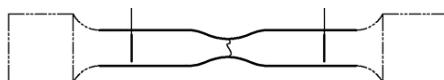


Figure 5. Phénomène de striction puis rupture dans la section qui a subi la striction

Rupture

En fin de courbe, il y a rupture du matériau dans la section qui a subit la striction.

La déformation élastique initiale se relaxe, c'est le retour élastique. L'allongement résiduel de l'éprouvette (donc après rupture) dû à la déformation plastique, est l'allongement à rupture A% ou Ar.

$$A\% = \frac{L_{finale} - L_0}{L_0} \times 100$$

On peut aussi estimer la variation entre le diamètre initial d_0 et le diamètre final d dans la zone qui a subi la striction. On définit alors le coefficient de striction Z% tel que :

$$Z\% = \frac{S_0 - S_{finale}}{S_0} \times 100$$

Le caractère fragile ou ductile de la rupture est aisément identifié après essai (Figure 6).

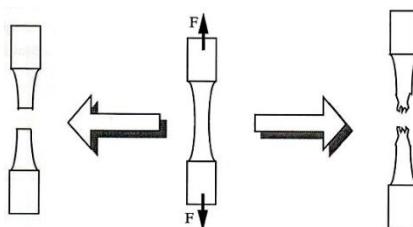


Figure 6. Rupture fragile et ductile d'une éprouvette de traction [1]

Courbe de traction vraie

La contrainte conventionnelle est définie par $\sigma_n = \frac{F}{S_0}$.

Mais lors de la traction, par effet Poisson puis par striction, la section varie dans l'éprouvette.

On devrait donc calculer la contrainte dite « vraie » dans le matériau (on dit aussi rationnelle)

$$\sigma_v = \frac{F}{S}$$

Avec S section de l'éprouvette sous l'action de la force F.

On montre aussi, en supposant la conservation du volume au sein de l'éprouvette, que :

$$\sigma_v = \sigma_n \cdot (1 + \varepsilon_n)$$

De même, on définit la déformation vraie (ou rationnelle)

$$\varepsilon_v = \int_{l_0}^l \frac{dl'}{l'} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{l - l_0 + l_0}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

Aux faibles déformations, la courbe de traction vraie et la courbe de traction conventionnelle sont presque confondues. Aux fortes déformations, où la section varie notablement, les deux courbes s'éloignent sensiblement.

Influence de la température

L'influence de la température active des mécanismes très différents pour un polymère, une céramique, ou un matériau métallique. Cependant, les tendances restent les mêmes :

	E	Re	A%	Rm
Si T°C augmente, alors	diminue	diminue	augmente	diminue

Tableau 1. Influence de la température sur la courbe de traction

Energie de rupture

L'aire sous la courbe de traction est l'énergie de rupture (Figure 7). C'est l'énergie qu'il faut apporter au matériau pour le rompre. On voit qu'une haute limite d'élasticité ne suffit pas, et qu'un fort allongement A% ne suffit pas. L'énergie de rupture est donc un paramètre matériau découlant de plusieurs paramètres de la courbe de traction.

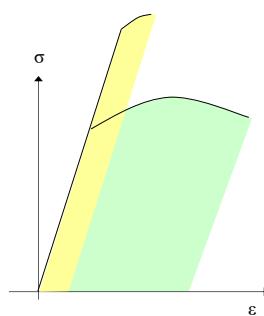


Figure 7. Energie de rupture

On verra dans la suite du cours que l'on distingue deux types d'énergie de rupture : la résilience (résistance au choc), la ténacité (résistance à la propagation d'une fissure).

1.3 Comportement en cisaillement

Soit une pièce subissant un effort de cisaillement (on parle aussi d'effort tranchant).

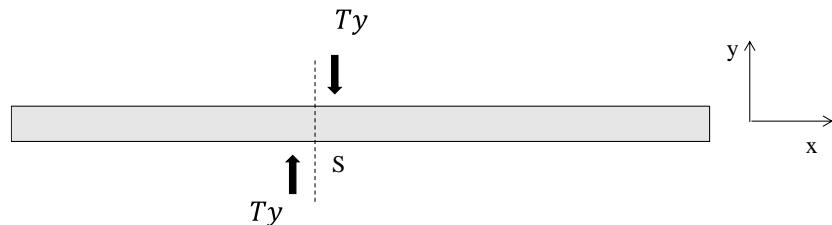


Figure 8. Effort de cisaillement dans une section S

La contrainte de cisaillement τ_{xy} est donnée par :

$$\tau_{xy} = \frac{T_y}{S}$$

Le glissement γ est donné par :

$$\gamma = \frac{dw}{L} = \tan\theta$$

Remarque : pour de faibles déformations, $\tan\theta \approx \theta$ donc $\gamma \approx \theta$

Soit G le module de cisaillement du matériau. On a alors, dans le domaine élastique : $\tau_{xy} = G \cdot \gamma$

Remarque : pour un matériau isotrope, G dépend de E et du coefficient de Poisson : $G = \frac{E}{2.(1+\vartheta)}$

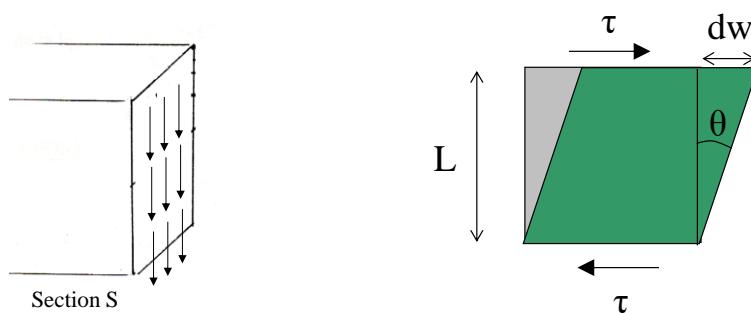


Figure 9. Gauche : contrainte de cisaillement au sein de la section S. Droite : Glissement lors du cisaillement d'une section

1.4 Comportement en compression hydrostatique

Soit un matériau soumis à une compression hydrostatique de pression P (Figure 10).

On définit la dilatation volumique :

$$\frac{V_f - V_o}{V_o}$$

Soit K le module de compressibilité du matériau, alors dans le domaine élastique, on a

$$P = -K \cdot \frac{V_f - V_o}{V_o}$$

Remarque : matériau isotrope, $K = \frac{E}{3.(1-2\vartheta)}$

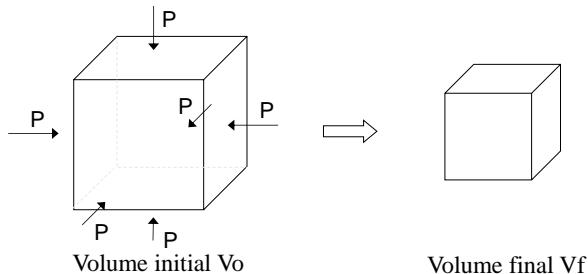


Figure 10. Matériau en compression hydrostatique

1.5 Essais mécaniques

Essai de traction

Dans un essai de traction, on impose un allongement à une éprouvette et on mesure l'effort nécessaire pour appliquer cet allongement (on peut également imposer un effort et mesurer l'allongement).

Paramètres importants d'un essai de traction

Vitesse de mise en charge, Effort imposé / mesure du déplacement ; Déplacement imposé / mesure de l'effort, Géométrie de l'éprouvette, Liaison éprouvette / machine, Conditions environnementales (milieu ambiant, température....)

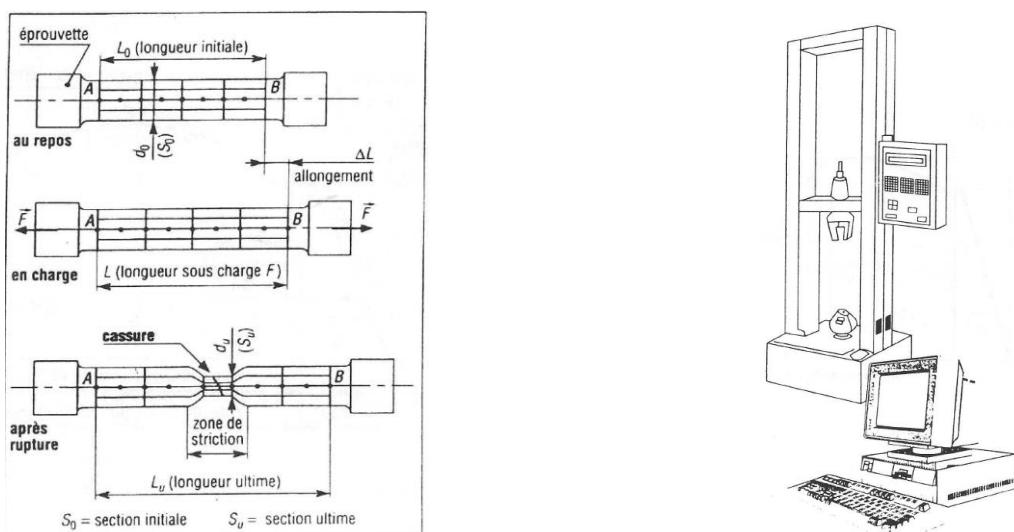


Figure 11. Dispositif de traction et éprouvette

Il existe plusieurs géométries d'éprouvette, mais les formes et dimensions sont normalisées.

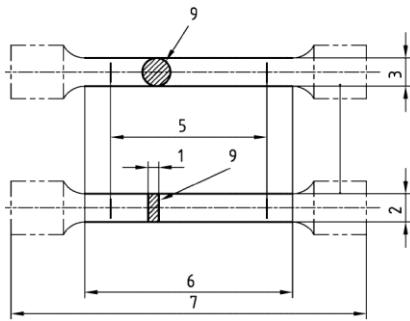


Figure 12. Eprouvette de traction

Machines de traction

On distingue deux types de machines : les machines hydrauliques (effort déplacement exercé par un vérin hydraulique) et les machines électromécaniques (vis sans fin activée par un moteur électrique).

Ces machines sont asservies en déplacement, force, ou en déformation. Elles permettent la génération de signaux complexes (sinus, dents de scie, carré, triangle....). Elles sont le plus souvent équipées de capteurs de forces (cellules de charge), et couplées à des capteurs d'extensométrie reliés à une informatique qui commande l'ensemble de la machine.

Extensométrie

L'extensométrie est la mesure des déformations et des allongements. On distingue de nombreuses méthodes de mesures. On donne ici les plus courantes.

Jauge de déformation

Une jauge de déformation est un fil métallique très fin enrobé dans une matrice polymère.



Figure 13. Jauge de déformation (www.systemx.fr/meca/lm/mmc_general.pdf)

La jauge est collée sur la structure ou l'éprouvette à l'aide du film polymère qui l'enrobe.

Pour un fil de section S, longueur L, matériau résistivité ρ , on a :

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

La déformation du fil fait varier ρ (effet piézorésistif) et fait varier de L et S (loi de Hooke et effet Poisson). Par conséquent, une déformation fait varier la résistance électrique R de la jauge. En mesurant cette variation de résistance électrique, on mesure la déformation :

$$\frac{dR}{R} = K \cdot \frac{dL}{L}$$

Avec K : facteur de jauge

La variation de R est mesurée par un pont de Wheatstone, circuit constitué de quatre résistances disposées en quadrilatère dont l'une de ces résistances est la jauge utilisée. Un ampèremètre formant le pont entre les points

C et D, détecte le courant lorsque A et B sont reliés à une source de tension ou de courant. Le déséquilibre du pont est proportionnel à DR/R .

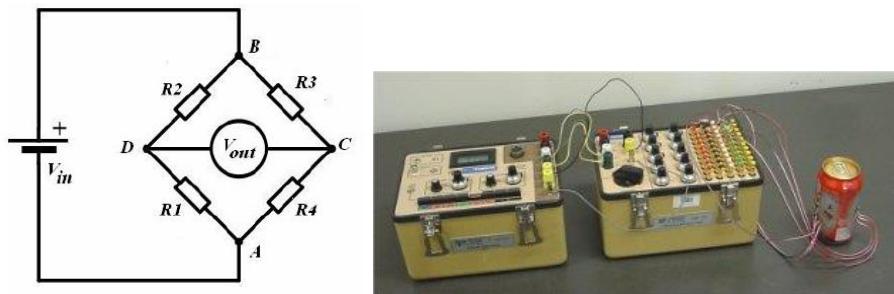


Figure 14. Pont de Wheatstone et instrumentation pour la mesure de déformation (<http://industriel.uqar.ca>)

Extensomètres

Ce type de capteur repose sur la mesure de la défexion d'une barre par des jauge de déformation. Cette barre, située dans le corps de l'extensomètre, fléchit sous le déplacement des couteaux suite à la déformation de l'échantillon.

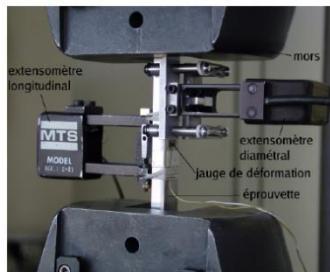


Figure 15. Extensomètre (Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux Marc Blétry 2006-2007. cliché CdM)

LVDT Linear Variable Differential Transformer



Figure 16. LVDT (www.rdppe.com/ex/act.pdf)

Un LVDT est constitué de trois bobines de formes cylindriques et coaxiales : une primaire ; deux secondaires. Un noyau ferromagnétique coulisse dans l'axe du cylindre. Lors de son mouvement, il modifie la distribution des champs à l'intérieur des bobines. L'utilisateur applique une tension sur le primaire et mesure les tensions des secondaires. La réponse est proportionnelle au déplacement du noyau dans le cylindre.

Avantages : excellente fiabilité, résiste à des environnements très sévères (températures extrêmes, vide, hautes pressions), coût relativement faible

Inconvénients : plusieurs capteurs l'un à côté de l'autre peuvent se perturber mutuellement s'ils sont alimentés à la même fréquence, précision « moyenne », fabrication délicate

Corrélation d'images

La corrélation d'images consiste à mesurer, avant et après déformation, la distance entre motifs initialement placés sur l'éprouvette. La variante la plus simple est d'exploiter deux points sur une éprouvette (Figure 17).

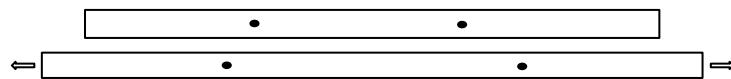
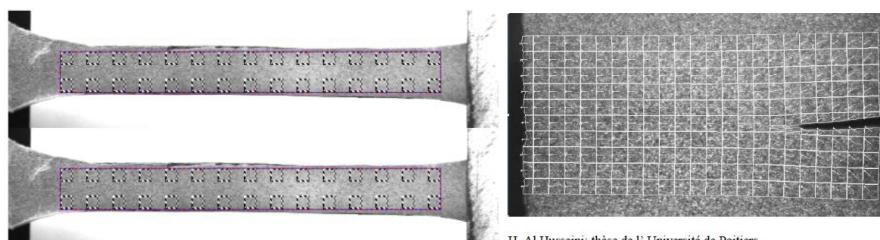


Figure 17. Corrélation d'images

Les méthodes les plus abouties réalisent un mouchetis puis recomposent par des méthodes numériques le champ de déplacement en tout point de l'éprouvette (Figure 18).



H. Al Husseini; thèse de l' Université de Poitiers

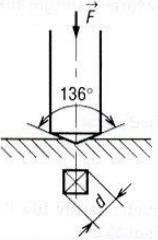
Figure 18. Corrélation d'images ; Gauche : institut PPRIME. Droite [2]

Dureté

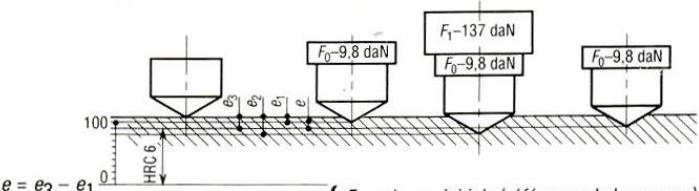
La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration.

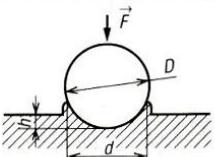
On réalise un essai de dureté quand on veut par exemple caractériser simplement et rapidement un matériau, caractériser/specifier un traitement thermique, avoir une idée grossière de la ductilité d'un matériau, de la limite d'élasticité, de la limite à rupture...

Essais de pénétration (Vickers, Rockwell, Brinell)

PRINCIPE	Il consiste à imprimer dans la pièce un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée. On mesure la diagonale de l'empreinte d .	
MÉTHODES D'ESSAI		<p>La charge normale d'essai $F = 29,4 \text{ daN}$ est appliquée pendant 10 à 15 secondes. On peut également employer l'une des charges suivantes : $4,9 - 9,8 - 19,6 - 49 - 78,4 - 98 \text{ daN}$. Avec des charges inférieures à $4,9 \text{ daN}$ on se trouve dans le domaine des microduretés. Les charges supérieures à 98 daN sont parfois utilisées avec une pyramide en acier trempé sur des matériaux de faible dureté.</p>
NOMBRE REPRÉSENTANT LA DURETÉ VICKERS	$d = \text{diagonale de l'empreinte}$ $HV = \frac{F}{S} \text{ charge d'essai (daN)}$ $S \text{ aire de l'empreinte (mm}^2\text{)}$ $HV/10 \text{ charge cruciale } 9,8 \text{ daN appliquée pendant 10 à 15 secondes.}$	$HV = \frac{2 F \sin 136^\circ}{d \alpha^2}$ $HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$

PRINCIPE	Il consiste à imprimer en deux temps une charge et une surcharge dans la couche superficielle de la pièce à l'aide d'un pénétrateur (cône ou bille). On mesure l'acroissement rémanent e de la profondeur de pénétration. L'unité de mesure est égale à 0,002mm.
-----------------	--

MÉTHODES D'ESSAI	 $e = e_3 - e_1$ $1 \text{ division} = \frac{0.2}{100} = 0,002$ $\text{HRC} = (100 - e) = 100 - \frac{e_3 - e_1}{0,002} \text{ (mm)}$	F_0 = charge initiale (référence de la mesure) F_1 = surcharge F = charge totale e = acroissement rémanent de la profondeur de pénétration									
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Symboles</th> <th style="text-align: center;">Rockwell C HRC</th> <th style="text-align: center;">Rockwell B HRB</th> <th style="text-align: center;">Rockwell E HRE</th> <th style="text-align: center;">Rockwell F HRF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Pénétrateurs</td> <td style="text-align: center;">Cône en diamant</td> <td style="text-align: center;">Bille en acier trempé HV ≥ 850</td> <td style="text-align: center;">D = 1,59 1/16 pouce</td> <td style="text-align: center;">D = 3,175 1/16 pouce</td> </tr> </tbody> </table>	Symboles	Rockwell C HRC	Rockwell B HRB	Rockwell E HRE	Rockwell F HRF	Pénétrateurs	Cône en diamant	Bille en acier trempé HV ≥ 850	D = 1,59 1/16 pouce	D = 3,175 1/16 pouce
Symboles	Rockwell C HRC	Rockwell B HRB	Rockwell E HRE	Rockwell F HRF							
Pénétrateurs	Cône en diamant	Bille en acier trempé HV ≥ 850	D = 1,59 1/16 pouce	D = 3,175 1/16 pouce							

PRINCIPE	L'essai a pour but de déterminer la dureté superficielle des métaux. Il consiste à imprimer dans le métal une bille de diamètre donné (\varnothing 10, 5, 2, 5, et 1), sous une charge déterminée et sans choc.	
NOMBRE REPRÉSENTANT LA DURETÉ BRINELL	<p>L'épaisseur de la pièce doit être au moins égale à huit fois la profondeur de l'empreinte.</p> <p>La dureté HB est donnée par le rapport:</p> $\text{HB} = \frac{F}{S}$ (daN/mm²)	 <p>D = diamètre de la bille (mm) F = charge de l'essai (daN) d = diamètre de l'empreinte (mm) h = profondeur de l'empreinte (mm) S = aire de l'empreinte (mm²) ou de la calotte sphérique.</p> <p>Désignation : HB 5 / 750 / 20</p> <p style="text-align: center;">$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$ $D \quad h \quad$ durée de maintien de la charge (en seconde)</p> <p>Relation : pour les aciers non alliés on admet $Rm = 0,35 \text{ HB}$ Remarque : l'essai est déconseillé pour une dureté de matériau HB > 450 Le tableau de conversion "Dureté - résistance à la traction" présenté page 336 peut fournir quelques valeurs approximatives.</p>

Relations propriétés mécaniques – dureté

Pour les aciers doux jusqu'à 600°C et les alliages d'aluminium, on observe : Dureté Hv \approx 0.15.(Re + Rm)/ On a aussi : Hv \approx 3.Re. Ces corrélations sont à manipuler avec précaution et ne sont utilisées que pour des ordres de grandeur.....

Synthèse (Vickers, Brinell, Rockwell)

- Rockwell : matériaux durs, mesures dispersées (demande plusieurs mesures et faire une moyenne)
- Vickers : tous matériaux. Petite empreinte et l'état de surface est important donc plutôt domaine du laboratoire
- Brinell : empreinte grande et facile à mesurer (en mm), peu d'influence de l'état de surface, donc bien pour l'atelier

Essai Shore

Certains matériaux comme les polymères ne peuvent pas être caractérisés par des essais de pénétration du fait de leurs propriétés mécaniques. On utilise pour ces matériaux un autre type d'essai de dureté : l'essai Shore est un exemple. Dans l'essai Shore, une force est appliquée sur le matériau à l'aide d'un ressort de raideur calibrée. On mesure la profondeur de pénétration sous charge à l'aide d'un micromètre (lecture sur cadran).



Figure 19. Gauche : Duromètre Shore (SAUTER GmbH). Droite : Dureté Leeb

Essais de rebondissement : dureté Leeb

On mesure la hauteur de rebond d'une masse connue tombant d'une hauteur connue sur la surface du matériau. On mesure en fait une capacité de restitution d'énergie, plutôt qu'une dureté.

Microdureté

La microdureté est un essai de dureté à faible échelle. On peut estimer la dureté d'une phase en particulier, d'inclusions, de précipités, de zones d'un matériau...etc.



Figure 20. Banc de microdureté (Marc Blétry 2006-2007)

Nanoindentation

La nanoindentation est un essai de dureté à très faible échelle (profondeur de l'empreinte : quelques dizaines de nm). On peut tracer la courbe donnant la force P de pénétration en fonction du déplacement u. La pente dP/du lors du retour élastique est proportionnel au module d'Young du matériau testé. Ce procédé est utilisé pour caractériser des phases très fines, des traitements de surface...etc.

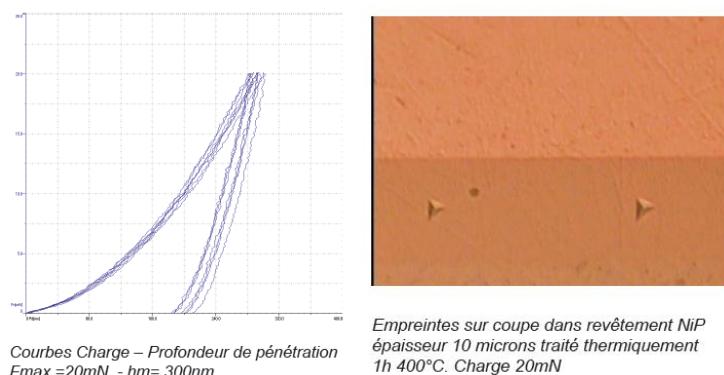


Figure 21. Essai de nanoindentation (<http://www.laboratoiredubois.ch>)

1.6 Comportement lors d'un choc : résilience

La résilience quantifie la résistance au choc d'un matériau. C'est l'énergie absorbée par le matériau lors de sa rupture sous l'effet d'un choc. Elle est exprimée en J/m^2 .

On distingue deux types d'essais pour mesurer la résilience : l'essai Charpy et l'essai Izod.

L'essai Izod est utilisé pour les polymères, l'essai Charpy pour les métaux.

Essai Charpy

On mesure l'énergie absorbée par l'éprouvette lors d'un choc.

Juste avant le choc, le couteau possède une énergie $E_i = M.g.H$. Après le choc, le couteau possède une énergie : $E_f = M.g.h$. L'énergie absorbée est $E = E_f - E_i = Mg.(H-h)$

La résilience KCU, en J/cm^2 , est donnée par $KCU (J/cm^2) : Mg.(H-h) / \text{Section rompue (cm}^2\text{)}$

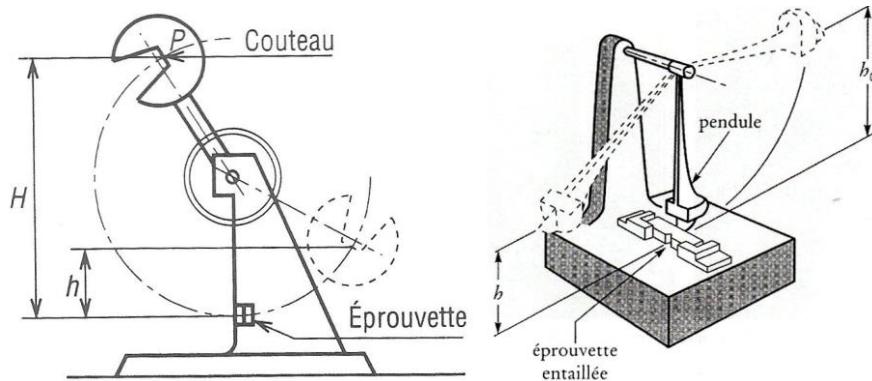


Figure 22. Essai Charpy

Influence du mode de rupture

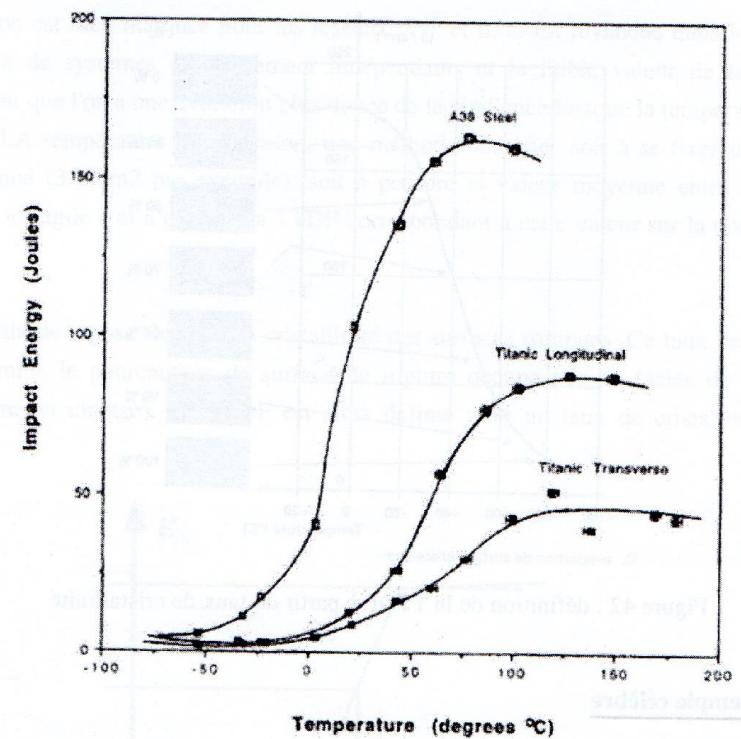
Un matériau ductile montre une grande déformation plastique avant de rompre. Il absorbe ainsi beaucoup d'énergie (l'aire sous la courbe de traction est grande car $A\%$ est grand) : résilience élevée.

Un matériau fragile se déforme peu avant de rompre. Il absorbe peu d'énergie (autrement dit, l'aire sous la courbe de traction est petite car $A\%$ est petit) : résilience faible.

Normes

- ISO 148 1983 Acier. Essai de résilience Charpy (entaille en V)
- NF EN 10045-2 12.92 Matériaux métalliques. Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy
- ASTM E 23 – 06 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials

Influence de la température : notion de transition ductile – fragile



1.7 Concentration de contraintes

Au droit d'un accident de forme (trou, entaille, variation brusque de section), des concentrations de contrainte apparaissent : il y a augmentation de la contrainte dans une zone autour de l'accident de forme (Figure 23).

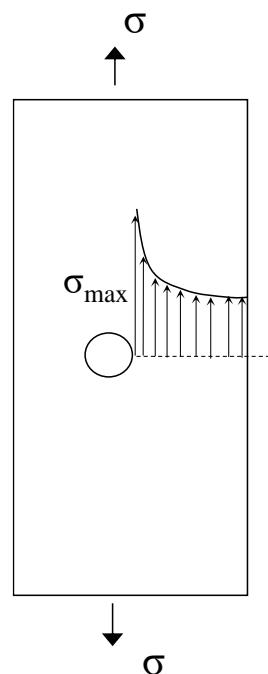


Figure 23. Concentration de contrainte au droit d'un trou

On définit le coefficient de concentration de contrainte K_t tel que :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$

1.8 Comportement en présence d'une fissure : ténacité

Concentration de contraintes : limites du modèle

Dans une pièce comportant une entaille de rayon de courbure ρ , on peut montrer que

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

Avec $\rho = b^2/a$ rayon de courbure en fond d'entaille. Quand $a \gg b$, on a donc $\rho \rightarrow 0$ et $K_t \rightarrow \infty$

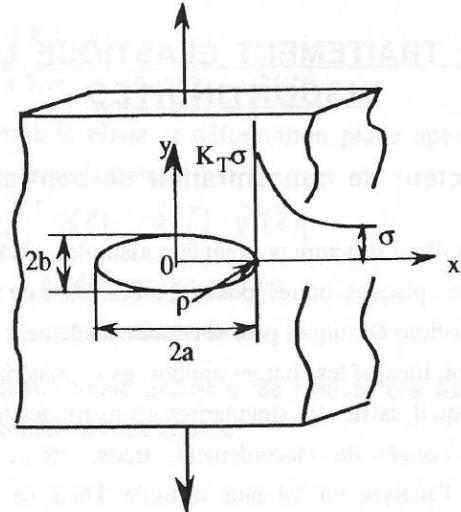


Figure 24. Plaque contenant un trou elliptique

Une fissure pouvant être modélisée comme une entaille de rayon de courbure $\rho \rightarrow 0$, l'approche avec facteur de concentration de contrainte prédit ainsi une contrainte σ_{max} qui tend vers l'infini en pointe de fissure. Ceci est physiquement incohérent. Par conséquent l'approche mathématique utilisant le facteur de concentration de contrainte pour quantifier un niveau de sollicitation en pointe d'une fissure n'est plus adaptée.

Nouvelle approche : le facteur d'intensité de contrainte

On utilise une nouvelle approche de l'élasticité, permettant de traiter le comportement des pièces fissurées.

Une nouvelle discipline de la mécanique des matériaux a ainsi vu le jour au XXe siècle : la mécanique de la rupture, qui étudie le comportement de pièces fissurées.

On définit le facteur d'intensité de contrainte K tel que

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

- K : facteur d'intensité de contrainte (MPa/m ou ksi/in pour les anglosaxons)
- Y : facteur de forme sans unité (dépend de la géométrie de la structure et de la fissure)
- a : longueur de fissure (en m)
- σ : contrainte « loin » de la fissure estimée par résistance des matériaux ($\sigma = F/S$ par exemple en traction)

Il existe une valeur limite de ce facteur d'intensité de contrainte K , spécifique à chaque matériau, au-delà de laquelle il y a propagation de la fissure. Cette valeur limite, propriété matériau, est appelée ténacité du matériau. On la note K_c .

Une fissure pour se propager suivant plusieurs modes d'ouverture (Figure 25).

Le mode I est le plus critique. On comparera donc le facteur d'intensité de contrainte pour ce mode avec la ténacité pour ce mode de chargement. On notera alors la ténacité K_{Ic} .

La ténacité quantifie donc la résistance du matériau à la propagation d'une fissure préexistante.

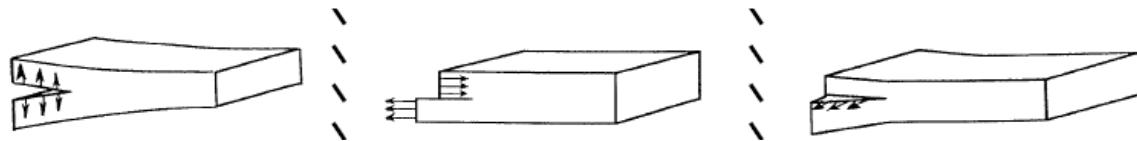


Figure 25. Les 3 modes de chargement d'une fissure. Gauche : mode I (le plus critique). Milieu : mode II. Droite : mode III

1.9 Comportement sous chargement cyclique : fatigue

La fatigue est la modification des propriétés d'un matériau sous l'action de contraintes et/ou de déformations cycliques.

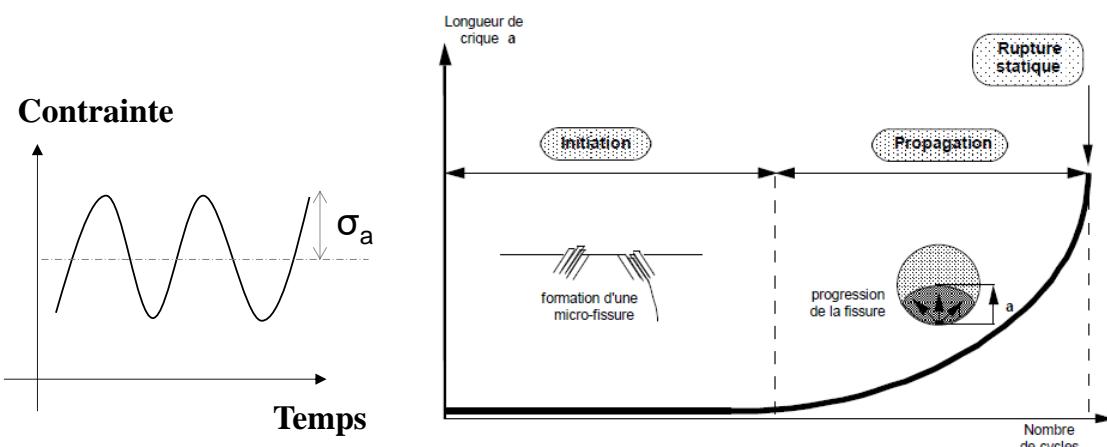


Figure 26. Gauche : cycle de fatigue. σ_a : contrainte alternée. Droite : apparition et propagation d'une fissure jusqu'à rupture

Pour des niveaux de contraintes même inférieurs à la limite d'élasticité, une rupture peut apparaître dans le cas de chargements répétés, dits cycliques.

Fin XIX^e siècle, Wöhler, ingénieur allemand travaillant dans le ferroviaire, montre par des essais que le nombre de cycles à rupture dépend de la contrainte alternée.

La fatigue est aujourd'hui la cause principale de rupture en service et reste un sujet de recherche actif.

De nombreux paramètres ont une influence sur la résistance d'un matériau en fatigue. Parmi ces paramètres, on distingue l'environnement (humidité, température, espèces chimiques en solution,), le chargement mécanique (contrainte alternée, contrainte moyenne, forme des cycles, fréquence...), le matériau (grains, phases, état de précipitation, structure cristalline,...etc.), procédé (écrouissage, contraintes résiduelles, état de surface....).

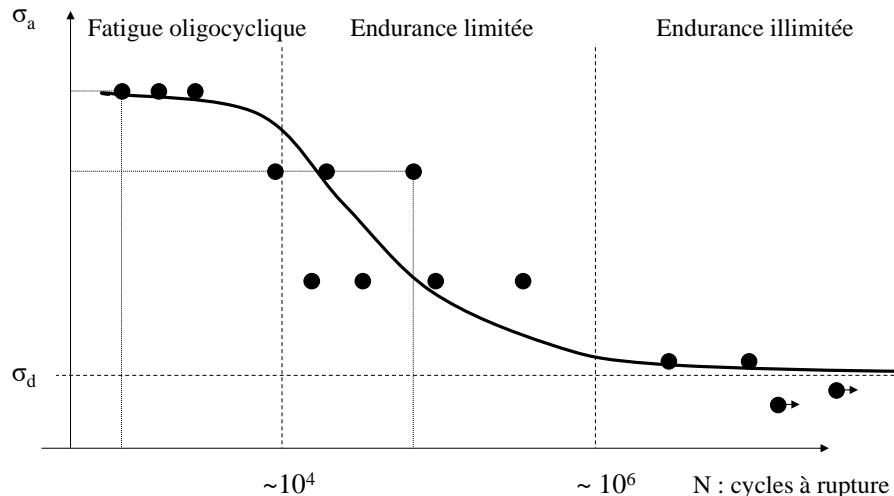


Figure 27. Courbe de Wöhler (ou courbe S-N pour Stress et Number of cycles)

1.10 Fluage

Le phénomène de fluage est la déformation progressive d'un matériau dans le temps. Elle est due à une action combinée d'une haute température et d'une contrainte constante (ou déformation constante). Le fluage peut mener à la rupture de la structure ou du composant mécanique.

Pour les matériaux métalliques, le fluage peut apparaître lorsque la température dépasse 30% de la température de fusion.

Pour les polymères, le fluage peut apparaître quand la température atteint la température de transition vitreuse.

Le terme utilisé (fluage) pour les polymères et les métaux est le même mais les mécanismes microstructuraux sont totalement différents.

1.11 Comportement au contact de deux pièces : usure

L'usure est l'endommagement de la surface d'une pièce par enlèvement ou déplacement de matière, dû au frottement avec d'autres pièces.

2 Propriétés thermiques

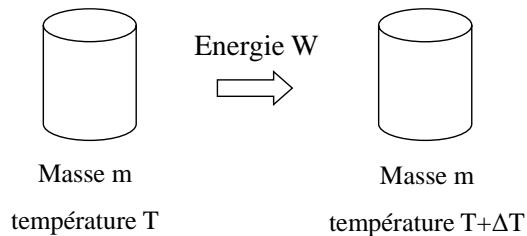
2.1 Rappel : les modes de transferts de la chaleur

Conduction : mode de transfert de chaleur sans déplacement de matière. Les atomes ou molécules se transmettent de proche en proche leur agitation thermique.

Convection : mode de transfert de chaleur par transfert de chaleur par déplacement de matière.

Rayonnement : mode de transfert de chaleur sous forme d'onde électromagnétique.

2.2 Capacité thermique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)



Si le corps ne change pas d'état, la capacité thermique c représente l'énergie à apporter pour éléver de 1K la température de 1kg de matériau : $W = m.c.\Delta T$.

2.3 Chaleur latente (J/mol ou J/kg)

Si l'énergie échangée avec un corps sert à faire changer ce corps d'état, alors la propriété qui intervient est la chaleur latente de changement d'état.

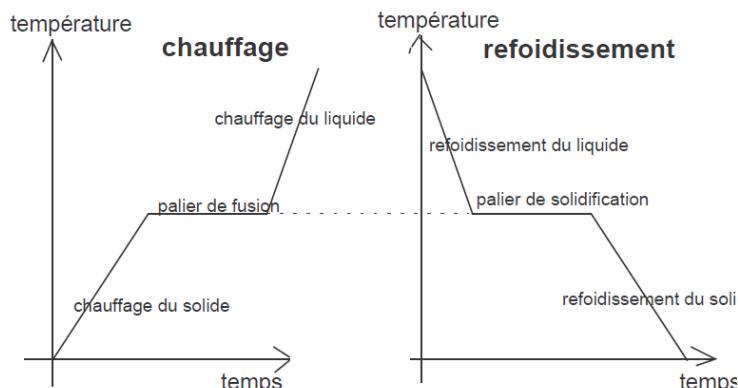


Figure 28. Courbes d'analyse thermique lors du changement d'état d'un corps à pression constante (P.Severin)

Si W est la quantité de chaleur (J) nécessaire au changement d'état, alors $W = m.L$.

m : masse du corps (kg) ; L : chaleur latente de changement d'état (quantité de chaleur nécessaire pour faire changer d'état 1kg du corps considéré).

2.4 Conductivité thermique λ (W.m⁻¹.K⁻¹)

La conductibilité thermique est la capacité d'un matériau à conduire la chaleur.

La loi de Fourier 1D rappelle que

$$J = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

J : flux thermique (W/m²) ; dT/dx : gradient de température (K/m)

Remarque : en notation vectorielle :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T$$

λ représente donc la chaleur en watt [W/m.°C] qui traverse le matériau sur 1 mètre d'épaisseur pour une surface de 1m² et une différence de température de 1°C entre les 2 faces de la paroi.

La conductibilité est due à l'agitation électronique au sein du matériau. Elle varie avec le libre parcours moyen des électrons. Elle est donc plus élevée pour les métaux que pour les autres matériaux.

Métaux : 10-400 W.m⁻¹.K⁻¹ ; Céramiques : 2-50 W.m⁻¹.K⁻¹ ; Polymères : 0.3 W.m⁻¹.K⁻¹ ; Air : 0.026 W.m⁻¹.K⁻¹

2.5 Diffusivité thermique a (m²/s)

On peut faire une analogie entre la loi de Fourier et la loi de Fick (diffusion de particules).

Du fait de cette analogie, on parle aussi de loi de diffusivité thermique.

Ce qui mène à introduire la notion de diffusivité thermique a en m²/s :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

Le paramètre a quantifie la vitesse de propagation de la chaleur dans un matériau

2.6 Effusivité thermique E (J.m⁻².s^{-1/2}.K⁻¹)

Ce paramètre n'est pas une donnée intrinsèque au matériau mais il permet de quantifier l'impression de froid ou de chaud quand on touche un matériau. L'effusivité de deux phénomènes : l'énergie est absorbée localement en fonction de la capacité thermique, l'énergie est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique.

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p}$$

λ : conductivité thermique ; ρ : masse volumique ; C_p = capacité thermique massique

L'effusivité quantifie l'aptitude d'un matériau à changer de température (plus ou moins vite) quand il reçoit un apport d'énergie thermique appliqué localement.

2.7 Dilatation thermique

Phénomène physique

Sous l'effet d'une augmentation de température, il y a augmentation du volume occupé par les atomes car l'amplitude de leurs vibrations augmente. Le volume du matériau augmente.

Coefficient de dilatation thermique linéaire α (K^{-1})

Soit une poutre libre de se déformer, de longueur L_0 à la température T_0 . Sous l'effet d'une variation de température $\Delta T = T - T_0$, la déformation de la poutre est telle que :

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

α est le coefficient de dilatation thermique linéaire du matériau.

Ordres de grandeur : Métaux : $5 - 30 \cdot 10^{-6} / K$; Céramiques : $5 - 15 \cdot 10^{-6} / K$; Polymères : $50 - 400 \cdot 10^{-6} / K$

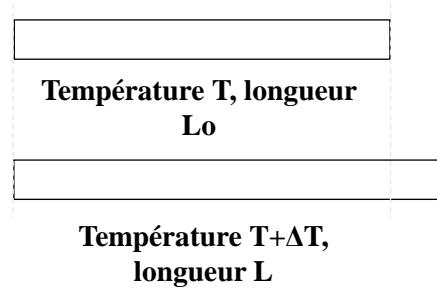
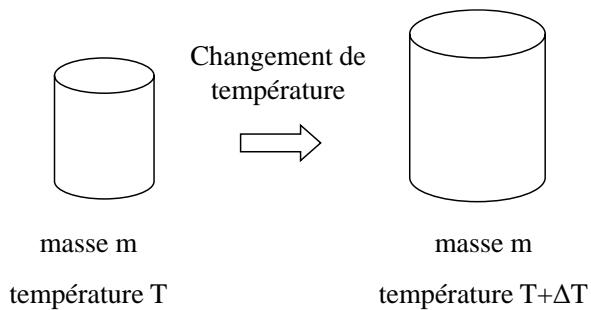


Figure 29: allongement d'une barre sous l'effet d'une augmentation de température

2.7.1.1 Coefficient de dilatation thermique volumique (K^{-1})



$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha_v \cdot \Delta T$$

2.7.2 Matériaux réfractaires

Réfractaire = résistant aux hautes températures. Cela nécessite un point de fusion élevé, une bonne inertie chimique aux hautes températures, une faible modification des propriétés physiques et chimiques, une bonne résistance au fluage.

2.8 Annexe. Mesure de température

2.8.1 Introduction

La température est une mesure du degré d'agitation des atomes / molécules.

Principales échelles de température : Kelvin (K), Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Centigrade, Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), Rankine, Delisle, Newton, Réaumur, Rømer.....

L'unité SI de température est le Kelvin. Il est défini à partir du point triple de l'eau : un kelvin est égal à 1/273,16 fois la température du point triple de l'eau. Le 0 Kelvin correspondrait à une absence totale d'agitation microscopique.

<https://www.youtube.com/watch?v=JKuoQ5FV2c8>

2.8.2 Aperçu général des techniques de mesure

2 approches sont possibles :

- Mesure d'une variation / différence de température entre 2 corps
- Mesure chiffrée de la température dans une échelle de température donnée

Les principaux phénomènes physiques liés à une variation de température sont :

- Variation de la température d'un liquide → variation de son volume
- Variation de la température d'un gaz, à volume constant → variation de sa pression
- Variation de la température d'un métal → variation de sa longueur, de sa résistance électrique ou de sa force électromotrice
- Variation de température de tout corps solide ou liquide → variation de son rayonnement électromagnétique
- Changement d'état d'un corps

En découlent les principales méthodes de mesure d'une température :

- Mesure de la dilatation d'un corps (volume de liquide, pression d'un gaz à V constant)
- Variation de température traduite en variation de courant électrique (la variation de la température d'un métal s'accompagne d'une variation de sa luminance, de sa longueur, de sa résistance électrique ou de sa force électromotrice)
- Mesure du rayonnement infrarouge
- Détection de changement d'état

En découlent les principales « technologies » pour la mesure d'une température :

- Les thermomètres à dilatation
- Les sondes de température (thermomètres électriques)
- Les thermomètres et caméras infrarouges
- Les thermomètres « chimiques »

2.8.3 Les thermomètres à dilatation

Ils reposent sur le phénomène de dilatation des corps lorsque la température augmente. La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures.

2.8.3.1 Thermomètre à dilatation de liquide

Principe

$$V = V_0(1 + \alpha \cdot T)$$

V_0 : volume de liquide à 0°C ; V : volume de liquide à la température T ; α : Coefficient de dilatation du liquide en °C-1

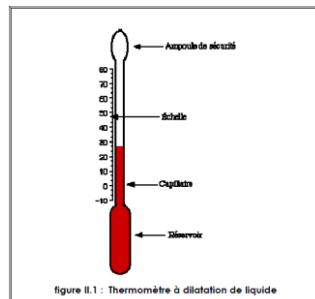


Figure 30. Thermomètre à dilatation de liquide

Une variante est le thermomètre à minima et maxima :

→ Indication des températures maximale et minimale atteintes dans un intervalle de temps donné (<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/minimaxi.html>).

2.8.3.2 Thermomètre à dilatation de gaz

Un thermomètre à gaz est composée d'une sonde dite bulbe en alliage de cuivre ou en acier inoxydable, formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique à haute pression. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de faible section à un tube de Bourdon, appelé spirale de mesure.

Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz varie et la spire se déforme entraînant le déplacement de l'aiguille sur le cadran portant des graduations thermométriques.

Ces instruments peuvent être munis d'un contact électrique pour réguler par exemple un four ou un autoclave ou signaler une alarme ou un défaut de fonctionnement. Ces contacts ferment ou ouvre des circuits électriques de puissance ou d'alarme en fonction de la position de l'aiguille par rapport à un index de contact réglé sur un point de consigne choisi sur le cadran.

Le principe est décrit par l'équation du gaz parfait :

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$$

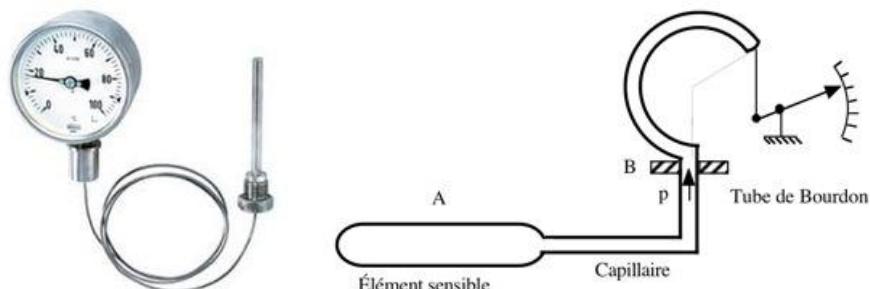


Figure 31. Thermomètre à dilatation de gaz. Gauche : img.directindustry.fr/images_di/photo-m/thermometre-cadran-dilatation-gaz-capillaire-14048-2372035.jpg. Droite : <http://btscira.perso.sfr.fr/images/temps/bourdon.jpg>

2.8.3.3 Thermomètre à dilatation de solide

Principe physique : la variation de ($L - L_0$) est proportionnelle à la température de la tige de métal.

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)$$

Un exemple courant est la bilame (Figure 32). Il s'agit de deux bandes d'alliages ayant des coefficients de dilatation différents, soudées sur toute leur surface et dont une extrémité est fixe. Les dilatations différentes des deux bandes provoquent un déplacement de l'extrémité libre qui fait bouger une aiguille indicatrice de la température.

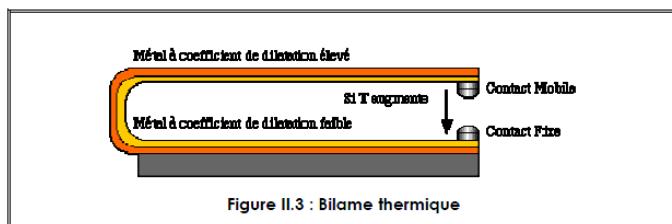


Figure 32. Bilame (<http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/Chapitre-3/Section-3-2-3.html>)

2.8.4 Les sondes de température (thermomètres électriques)

Un thermomètre électrique est un système permettant de repérer et d'indiquer la température. Il est constitué d'un capteur électronique (élément sensible) et d'un circuit électronique permettant de mesurer la caractéristique variable avec la température.

2.8.4.1 Thermomètre à résistance

La résistance électrique d'un conducteur métallique croît avec la température.

$$R = R_0(1 + a \cdot T + b \cdot T^2)$$

T : température en °C ; R₀ : résistance à 0 °C (en Ω) ; R : résistance à t °C (en Ω) ; a, b : coefficients positifs spécifiques au métal.

En mesurant la résistance électrique, on mesure la température.

Exemple : la sonde à résistance de platine

Capteur de haute précision, il constitue souvent une référence pour l'étalonnage d'autres capteurs. Il s'agit d'un fil de platine bobiné sur un support isolant placé dans une gaine, calibré à R₀=100Ω à 0°C (calibration des paramètres a et b).

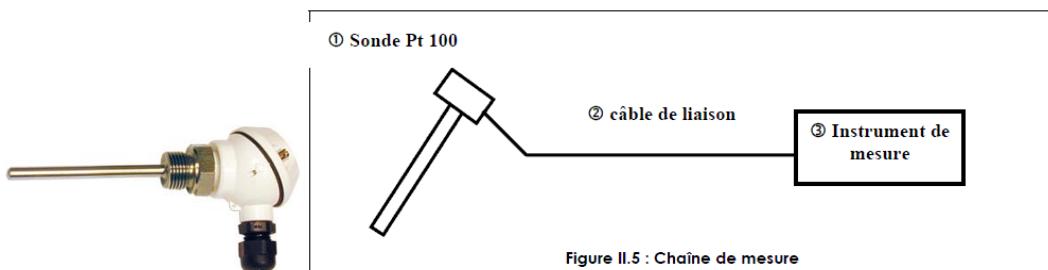


Figure II.5 : Chaîne de mesure

Figure 33. Sonde Pt100 et chaîne de mesure (gauche : degre5.com, droite : <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/Chapitre-3/Section-3-3-1-2.html>)

2.8.4.2 Thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés (rendus compacts par une haute pression exercée à température élevée).

Principe physique : la résistance électrique d'une thermistance varie avec la température.

Cas d'une CTN (coefficient de température négatif) :

$$R = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

T : Température absolue ; T₀ : Température de référence 298 K ; B : Indice de sensibilité thermique propre au matériau de la thermistance en K ; R₀ : Résistance à la température de référence



Figure 34. Thermistance (<http://www.conrad.fr/ce/fr/overview/0241510/Thermistances>)

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electro/ctn.html>

2.8.4.3 Thermocouples (couples thermoélectriques)

Un thermocouple est constitué par la liaison de deux matériaux différents, par l'intermédiaire de deux jonctions.

Lorsque les deux jonctions, dites respectivement chaude et froide, sont à des températures différentes, il apparaît dans le circuit une FEM E dépendant uniquement de la nature des 2 fils et de l'écart de température θ₁-θ₂ (c'est l'effet Seebeck : une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température.). On étalonne E en fonction de θ₁-θ₂. En maintenant θ₂ à une température connue θ_{ref}, la mesure de E donne θ₁.

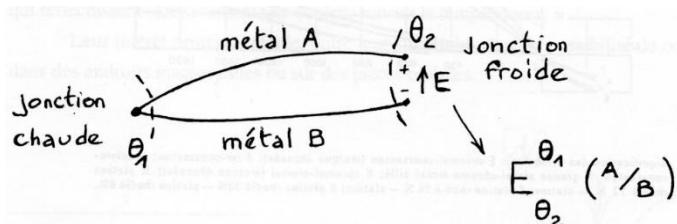


Figure 35. Effet Seebeck dans un thermocouple

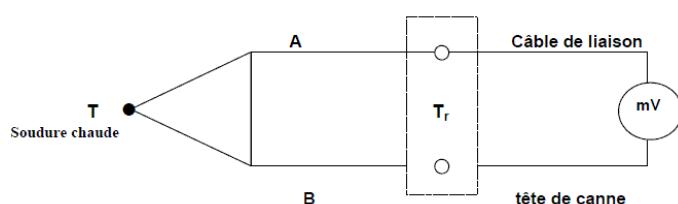


Figure 36. Schéma d'un thermocouple (<http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/Chapitre-3/Section-3-3-3.html>)

Voir aussi <https://www.youtube.com/watch?v=19aGHGMOx1w>

2.8.4.4 Thermomètres et caméras infrarouges

Tout corps à une température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement constitué d'un ensemble de radiations dont les longueurs d'onde appartiennent au domaine infrarouge ou visible du spectre électromagnétique. Ce rayonnement dépend de la nature, de l'état de surface et de la température du corps. La pyrométrie optique consiste à déterminer la température en mesurant le rayonnement émis.



Figure 37. Thermomètre infrarouge et caméra infrarouge (www.degre5.com)

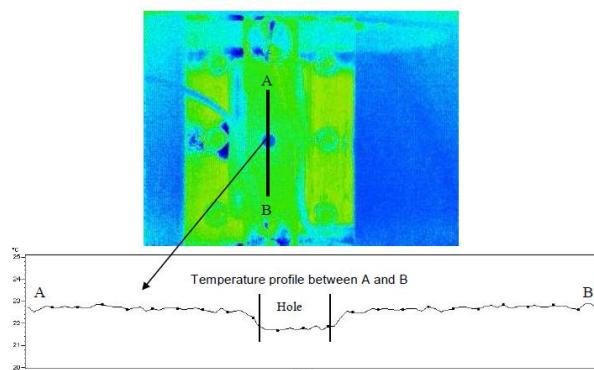


Figure 38. Mesure de la température d'un composite carbone/époxy par caméra infrarouge (Menan)

2.8.4.5 Thermomètres "chimiques"

Rubans thermométriques : rubans faits de pastilles qui changent de couleur ou d'aspect lors du dépassement d'une température donnée. Ne donne pas la température, seulement la température maximale atteinte autour du ruban.

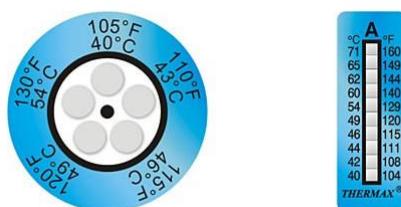


Figure 39. Thermoètre chimique (www.ruban-thermometre.com)

2.8.4.6 Choix d'une technique de mesure de température

Le type de mesure définira le type du capteur. Le choix du capteur adéquat dépend de différents critères : l'application, l'étendue de mesure, la précision, la fidélité, le temps de réponse, prix, durée de vie (la robustesse), la forme de la pièce à mesurer.

3 Propriétés électriques

3.1 Introduction

La conduction dans un milieu est due à un transport de charges électriques de deux natures : ionique ou électronique.

3.2 Conduction ionique

La conductivité ionique d'un milieu est due à un transport d'ions se déplaçant par diffusion. L'air, les plasmas, certains solides, les solutions ioniques conduisent l'électricité par ce mécanisme.

3.3 Conduction électronique

Certains matériaux (métaux, semi-conducteurs) possèdent des électrons libres susceptibles de se déplacer sous l'action d'un champ électrique. Ainsi un métal est constitué d'un réseau d'ions positifs baignant dans un gaz d'électrons quasi libres. En l'absence de champ appliqué, chaque électron se déplace au hasard.... Ce déplacement désordonné ne produit pas de courant. Mais si un champ électrique est appliqué dans une direction, les électrons ayant suffisamment d'énergie se déplacent suivant une trajectoire orientée dans le sens du champ électrique avant d'entrer en collision avec les éléments du matériau (autres électrons, noyaux, imperfections du réseau).

La conduction électrique d'un matériau dépend donc de la mobilité des électrons qu'il contient. Cette mobilité dépend de la structure électronique des atomes du matériau.

En effet, dans un solide, les niveaux d'énergie possibles des électrons sont des bandes d'énergies permises, séparées par des bandes interdites.

Deux bandes d'énergie jouent un rôle particulier. La dernière bande entièrement remplie est la « bande de valence ». La bande d'énergie permise qui la suit est appelée « bande de conduction ». Elle peut être vide ou partiellement remplie. L'énergie qui sépare la bande de valence de la bande de conduction est appelée le « gap ».

Les électrons de la bande de conduction participent à la conduction électronique. Les propriétés électroniques du solide dépendent donc essentiellement de la répartition des électrons dans ces deux bandes, ainsi que de la valeur du gap : dans le cas des isolants, les deux bandes sont séparées par un gap important. Pour les conducteurs, le gap n'existe pas et la bande de conduction se superpose à une partie de la bande de valence. Les semi-conducteurs possèdent un gap suffisamment faible pour que des électrons aient une probabilité non négligeable de le franchir par simple excitation thermique lorsque la température augmente.

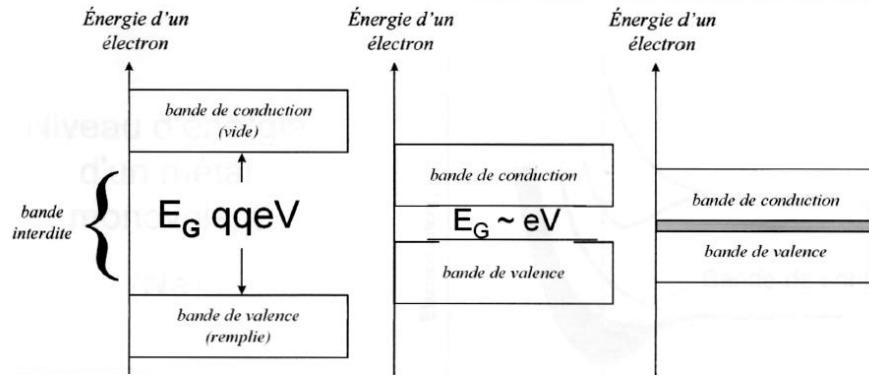


Figure 40. Matériaux conducteurs et structure électronique de l'atome

3.4 Résistivité et Conductivité électrique

La résistivité électrique ρ d'un matériau, ou son inverse la conductibilité électrique σ , traduit la mobilité des électrons de conduction créant une densité de courant J dans un champ électrique E .

$$E = \rho \cdot J = \frac{J}{\sigma}$$

E : champ électrique (V/m) ; J : densité de courant (A/m^2)

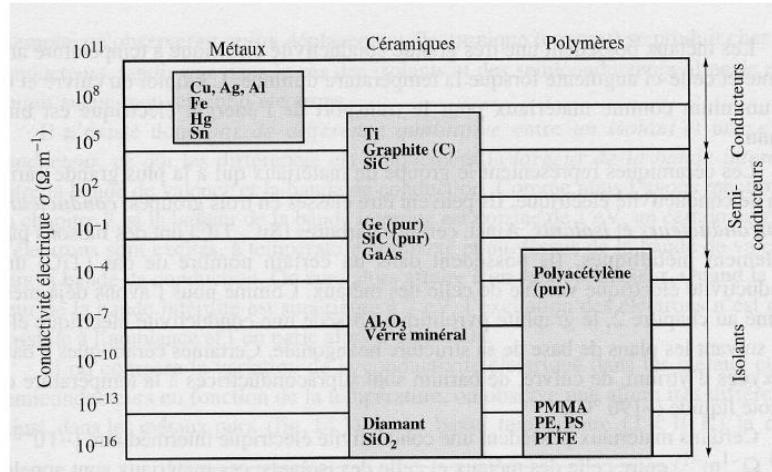


Figure 41. (Jean-Yves Dauphin, voir http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteA/co/A_4_C_2.html)

La résistance électrique R (en Ω) d'un fil de longueur L (m), section S (m^2), de résistivité électrique ρ ($\Omega \cdot m$) est donnée par :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Remarque : quand la température diminue, la résistivité tend vers une limite finie non nulle SAUF pour certains matériaux dont la résistivité tend vers 0 au-dessous d'une certaine température. On parle de matériaux supraconducteurs.

3.5 Piézoélectricité

Pour certains matériaux, une déformation élastique de la maille cristalline provoque une polarisation électrique (décalage des barycentres des charges + et -). A l'inverse, ces matériaux, lorsqu'ils soumis à un champ électrique, subissent une polarisation électrique, ce qui déforme le cristal.

3.6 Propriétés diélectriques

Polarisation, susceptibilité électrique

Un matériau qui ne contient pas de charges électriques pouvant se déplacer à longue distance sous l'action d'un champ électrique est dit isolant (voir §3.1). On parle aussi de matériau diélectrique.

Mais les matériaux diélectriques ne sont pas pour autant neutres électriquement. En effet tout matériau contient des charges électriques localisées susceptibles de se déplacer à courte distance sous l'effet d'un champ électrique extérieur \vec{E} . Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation \vec{P} , liée au niveau microscopique au champ électrique par la polarisabilité, et au niveau macroscopique, par la susceptibilité électrique χ .

Les électrons présents dans un matériau diélectrique ne peuvent pas se déplacer sur de grandes distances, mais sous l'action d'un champ électrique, le nuage électronique peut être déformé et créer un dipôle électrostatique (on parle de polarisation électronique).

Il en va de même pour le déplacement global des atomes au sein du matériau (on parle de polarisation atomique).

Par ailleurs, si des dipôles existent déjà (molécules polaires), elles peuvent s'aligner dans le sens du champ électrique (polarisation d'orientation).

Pour un diélectrique linéaire, la polarisation \vec{P} est proportionnelle au champ électrique \vec{E} qui l'a créée:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E}$$

ϵ_0 : permittivité du vide. $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$; χ : susceptibilité électrique du matériau (sans dimension)

Permittivité

La permittivité ϵ (F/m) d'un milieu peut aussi être exprimée par une quantité adimensionnelle : la permittivité relative ou « constante diélectrique », normalisée par rapport à un milieu de référence :

avec :

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

ϵ la permittivité ; ϵ_0 la permittivité du vide ; ϵ_r la permittivité relative ou constante diélectrique

Pour un diélectrique linéaire, homogène, isotrope, la permittivité est liée à la susceptibilité électrique du matériau par :

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot (1 + \chi)$$

Facteur de perte

En cas de champ électrique alternatif, la permittivité varie avec la fréquence d'oscillation par dissipation d'énergie sous forme thermique lors du déplacement des charges à chaque cycle. Cette proportion d'énergie dissipée est caractérisée par un facteur de perte.

Tension de claquage

Valeur en V/m à partir de laquelle un arc électrique peut être généré dans un matériau diélectrique sous l'action d'une différence de potentiel électrique.

3.7 Pour aller plus loin

[Conductive Polymers \(6min\)](#)

[L'électron libre. La théorie des bandes \(5min\)](#)

http://www.canal-u.tv/video/tele2sciences/eteindre_une_bougie_sans_souffler.8911

4 Propriétés de surface

4.1 Définitions

Surface : frontière entre une phase condensée (solide ou liquide) et une phase gazeuse ou du vide

Interface : frontière entre deux phases condensées physiquement ou chimiquement différentes (phases condensées: corps solides ou liquides)

Interphase : quand la frontière entre deux corps est non pas une surface mais un volume, on parle d'interphase. Ce volume possède un mélange des propriétés de chaque corps.

4.2 Tension superficielle

La tension superficielle d'un fluide peut être mise en évidence par des observations simples (Figure 42).

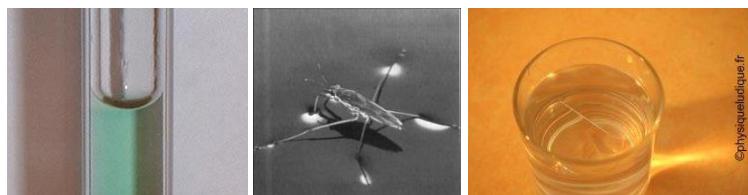


Figure 42. Gauche : perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf. Milieu : ethologie.unige.ch/

Dans l'expérience ci-dessous, un fil de coton est fixé sur un anneau. On plonge l'anneau dans de l'eau savonneuse (Figure 43). Lorsque le film de savon couvre tout l'anneau, le fil est libre. Lorsque le film de savon couvre une seule partie de l'anneau, le fil est tendu par la tension superficielle du savon, tension qui se traduit par une force F normale en tout point du fil de coton.

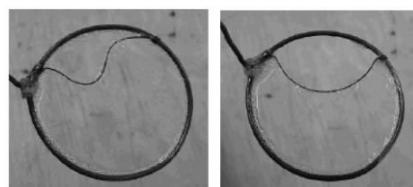
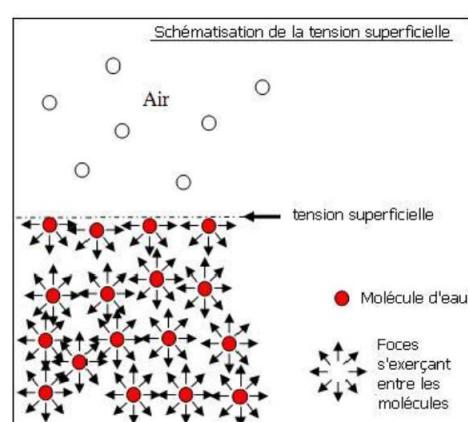


Figure 43. Mise en évidence de la tension superficielle (N. Vandewalle et al., Université de Liège)

Chaque molécule située au sein du volume de liquide est soumise à l'attraction des molécules voisines. La résultante de ces forces, dirigées dans toutes les directions, est nulle (Figure 44).

Figure 44. Explication physique de la tension superficielle

A la surface de séparation entre le liquide et le gaz, les forces de cohésion ne présentent plus cette symétrie : chaque molécule subit de la part des molécules placées à l'intérieur du liquide des forces d'attraction dont la résultante, normale à la surface et dirigée vers l'intérieur du fluide, n'est compensée par aucune autre force.



Ces molécules de surface se comportent donc comme une membrane tendue sur les autres molécules, comme pour les retenir, membrane qui comprime le liquide dans certains cas. D'où le terme de *tension superficielle*.

L'épaisseur de cette couche superficielle de molécules varie entre 1 et 100nm.

Remarque : en surface, les molécules sont attirées tangentiellement à la surface et vers l'intérieur du volume. Ces molécules ne pouvant pas toutes pénétrer dans le volume, l'équilibre sera atteint quand le liquide aura pris une forme sphérique. Ainsi se forment les gouttes et les bulles.

Calcul de la tension superficielle

Soit un cadre métallique comportant un côté mobile (Figure 45).

Plongé dans de l'eau savonneuse, ce cadre se remplit d'une lame mince liquide.

Pour éviter que la lame de savon se rétracte, il faut exercer une force F sur le côté mobile. Cette force F , nécessaire au maintien de l'équilibre, équilibre une force appelée la force de tension superficielle

On définit alors γ telle que $F = 2 \cdot \gamma \cdot L$. Le coefficient γ est la tension superficielle (N/m).

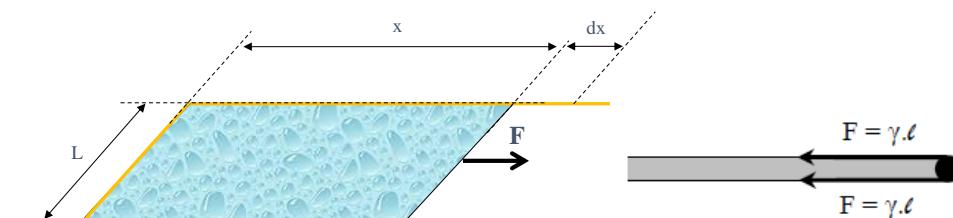


Figure 45. Tension superficielle

Energie de surface

L'énergie dE à fournir pour créer la surface dS sera : $dE = \sigma \cdot dS$

Avec σ : énergie de surface (J/m²)

Or

$$\frac{dE}{dS} = \frac{F \cdot dx}{2 \cdot dx \cdot l} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot l}{2l} = \gamma$$

Donc $\sigma = \gamma$. On trouvera donc dans la littérature, la tension superficielle exprimée en N/m ou en J/m²

Matériau	Symbole	Tension de surface γ_{s-g} (mJ/m ²)
Alumine (à 1500 °C)	Al_2O_3	1050
Silice (à 23°C)	SiO_2	259
Aluminium (à 660 °C)	Al	873
Polystyrène	PS	41
Polyisoprène (cis)	NR	31
Polychlorure de vinyle	PVC	41

Tableau 2. Tension de surface de divers matériaux (Réf : Pr. J. Lecomte-Beckers)

Conclusion

La notion de tension de surface est importante pour l'impression, le collage, l'élaboration de matériaux composites par des techniques d'infiltration de liquide dans une préforme constituée du matériau de renfort, la brasure, le soudage, la galvanisation des aciers, les peintures, vernis, revêtements.....

En effet la tension de surface va déterminer la mouillabilité d'un solide par un liquide et l'adhésion physique entre deux solides. Ces deux notions vont maintenant être abordées.

4.3 Mouillabilité

Mouillage sur une surface lisse et homogène

Le mouillage décrit les phénomènes physiques lorsque trois phases, dont au moins une est liquide, sont en contact.

Angle de contact θ

Soit un liquide appliqué sur une surface solide plane et horizontale. On notera θ l'angle entre la goutte et le solide (Figure 46).

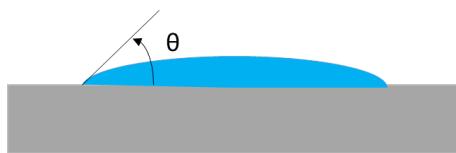
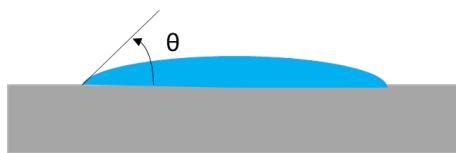


Figure 46. Notion d'angle de contact θ

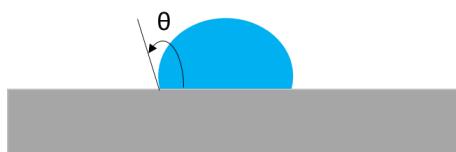
1/ Mouillage total : $\theta = 0$. On parlera de liquide mouillant.



2/ Mouillage partiel : $0 < \theta \leq 90^\circ$



3/ Pas de mouillage : $\theta > 90^\circ$



Loi de Young

La loi de Young régit les propriétés de mouillage des surfaces par les liquides. Elle indique que l'angle de contact dépend des propriétés superficielles du liquide, du solide et du gaz environnant.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}$$

où γ_{sv} représente l'énergie de surface du solide ; γ_{sl} représente la tension interfaciale entre le solide et le liquide ; γ_{lv} représente la tension de surface du liquide ; θ représente l'angle de contact entre le liquide et le solide.

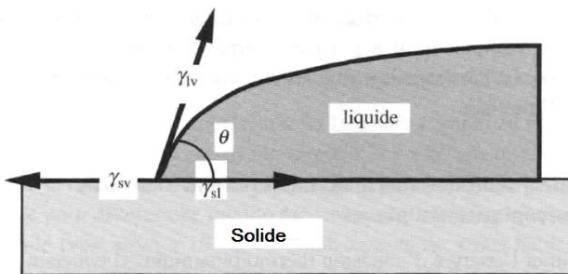


Fig 12.1 Equilibre thermodynamique d'une goutte sur un substrat solide.

Figure 47. Equilibre d'une goutte sur un substrat solide [3]

Mouillage sur une surface réelle

Une surface réelle sera rugueuse et/ou contiendra des hétérogénéités chimiques.

L'angle de contact est alors différent du cas théorique. Il varie entre 2 valeurs appelées angle d'avancée θ_a et angle de reculée θ_r .

Expérimentalement, si on ajoute du liquide à une goutte, l'angle augmente sans que la ligne de contact ne bouge (Figure 48). L'angle d'avancée θ_a correspond à l'angle mesuré au moment où la ligne triple commence à avancer. Si du liquide est enlevé de la goutte, l'angle de reculée correspond à l'angle mesuré au moment où la ligne triple commence à reculer. On parle alors d'hystérosis de l'angle de contact :

$$\Delta\theta = \theta_a - \theta_r.$$

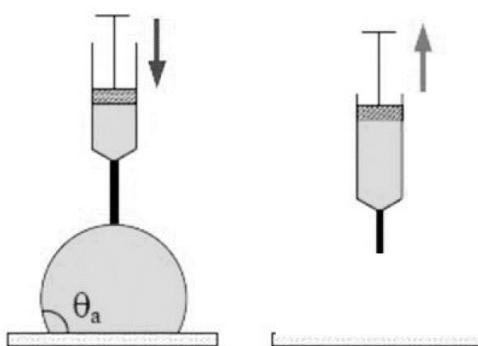


Figure 48. Angle d'avancée, angle de reculée [4]

Surface rugueuse et chimiquement homogène : modèle de Wenzel

Soit r la rugosité de la surface telle que :

$$r = \frac{\text{aire de la surface}}{\text{aire de la surface projetée}}$$

Modèle de Wenzel :

$$\cos \theta^* = r \cdot \cos \theta$$

θ^* : angle mesuré sur la surface étudiée ; θ : angle mesuré sur la surface non rugueuse (lisse) du même matériau (Figure 49).

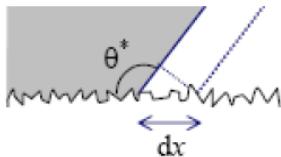


Figure 49. Surface rugueuse et chimiquement homogène [4]

Surface lisse et chimiquement hétérogène : modèle de Cassie-Baxter

Soit une surface hétérogène faite de deux matériaux 1 et 2. Le liquide fait l'angle de contact θ_i avec le matériau i (Figure 50).

Modèle de Cassie-Baxter :

$$\cos \theta^* = f_1 \cdot \cos \theta_1 + f_2 \cdot \cos \theta_2$$

f_1 et f_2 : fractions surfaciques des matériaux 1 et 2

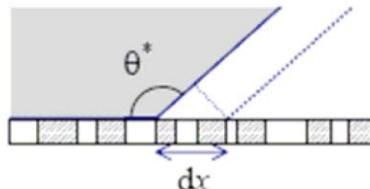


Figure 50. Surface lisse et chimiquement hétérogène [4]

4.4 Adhésion / adhérence

Adhésion : ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produisent lorsque l'on met en contact intime deux matériaux.

Adhérence : force nécessaire à la décohésion de l'assemblage (échelle macroscopique). L'adhérence dépend du mode de sollicitation de l'interface (cisaillement, traction...) et des paramètres extérieurs (vitesse de déformation, humidité, température....).

Théories de l'adhésion

Plusieurs théories sont aujourd'hui disponibles pour expliquer les phénomènes d'adhésion.

Ancrage mécanique

Dans cette théorie, on postule que l'adhésion vient d'un ancrage physique d'un des matériaux dans les aspérités de l'autre (notion d'accrochage mécanique entre les deux surfaces). Ce mécanisme suppose donc un bon mouillage entre les deux surfaces afin que l'un des matériaux puisse « se glisser » dans les aspérités de surface de l'autre. Cette théorie n'explique pas l'adhésion sur des surfaces peu rugueuses.

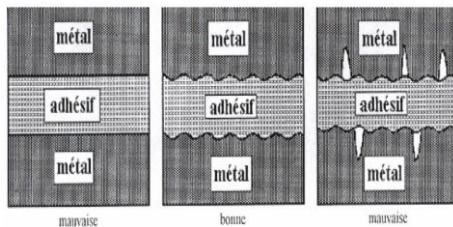


Figure 51. Ancrements mécaniques [5]

Diffusion

L'adhésion résulte de la diffusion des molécules ou des atomes d'un des matériaux dans l'autre. Il se crée une interphase, dont les propriétés physico-chimiques varient des propriétés du premier matériau à celles du second.

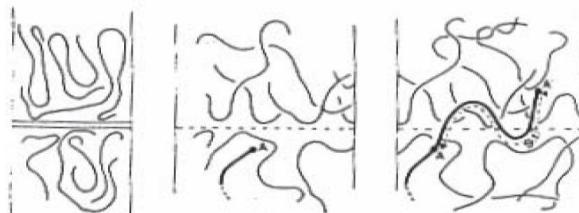


Figure 52. Adhésion par diffusion [5]

Théorie thermodynamique

L'adhésion se produit grâce à des attractions entre molécules (type Van der Waals,) existant à l'interface. Ces liaisons, faibles et non dirigées, ne sont significatives que sur une courte distance donc un bon mouillage est nécessaire. On définit l'énergie d'adhésion de Dupré telle que :

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

γ_A et γ_B sont les énergies de surface de A et B. γ_{AB} est l'énergie libre de l'interface formée.

Théorie chimique

Des liaisons chimiques peuvent se créer entre les deux matériaux, donnant une adhésion importante, de par la nature des liaisons créées.

4.5 Propriétés de surface et emballages

Contexte : Impression, peinture, vernis, étiquetage...., assemblage de polymères

Problématiques sur les polymères : faible tension de surface, faible rugosité, inertie chimique, dégazage, composants migrants. Il peut être plus difficile d'obtenir une bonne adhésion sur des plastiques à faible tension de surface tels que le polyéthylène ou le polypropylène, aussi nommés polyoléfines.

Problématiques sur le carton : carton traité (contre l'humidité, graisse...).

5 Choix des Matériaux

1 Introduction

Il est rarement possible de fixer un seul critère pour le choix d'un matériau.

En particulier, dans un contexte concurrentiel, le choix n'est pas purement technique, mais technico-économique. Autre exemple : aujourd'hui le gain de masse est recherché dans de nombreux secteurs d'activité, tout en respectant les impératifs de résistance mécanique, résistance à la corrosion..... Enfin, la prise de conscience environnementale et sanitaire ajoute de nouveaux critères concernant le respect de l'environnement et la santé des personnes.

Par ailleurs, se focaliser sur un seul critère n'apporte que rarement une solution optimale. Sur le critère de poids, le bois serait le matériau idéal pour un avion, si l'on avait le choix entre le bois, les aciers et les alliages d'aluminium. Sur le critère de résistance, les aciers seraient net vainqueurs. Et pourtant, ce sont bien les alliages d'aluminium qui sont massivement utilisés depuis un siècle, bien que concurrencés maintenant par les matériaux composites. Pourquoi ? Ils sont légers (même si pas autant que le bois) et résistants (même si pas autant que l'acier). Ils s'en sortent plutôt bien sur ces deux critères, sans jamais être le premier choix sur chacun de ces critères.

Un choix matériau sera donc bien souvent un compromis imposé par plusieurs critères. Comment prendre en compte plusieurs critères ?

On introduira la notion d'indice de performance pour répondre à ce problème.

2 Indice de performance

2.1 Mise en évidence

Soit un poutre de longueur L (L imposée par le cahier des charges), section circulaire rayon r soumise à une traction d'effort F (F imposé par le cahier des charges). On cherche à minimiser la masse de cette poutre tout en respectant le critère de limite d'élasticité. A la limite du critère de limite d'élasticité :

$$Re = \frac{F}{\pi \cdot r^2}$$

De plus :

$$m = \pi \cdot r^2 \cdot L \cdot \rho$$

Finalement :

$$m = F \cdot L \cdot \frac{\rho}{Re}$$

F et L sont fixées. La masse ne dépend plus que de deux paramètres matériaux : ρ et Re .

Minimiser ρ / Re permettra de minimiser la masse m tout en respectant le critère de résistance élastique

→ On cherchera une valeur maximale de l'indice de performance $I = Re / \rho$.

Grâce à la notion d'indice de performance, les paramètres dépendant des sollicitations ou de la géométrie sont éliminés afin de ne conserver que les grandeurs caractéristiques du matériau.

2.2 Sélection graphique par indice de performance, cartes des propriétés (diagrammes d'Ashby)

On peut tracer, dans l'exemple précédent, Re en fonction de ρ pour l'ensemble des matériaux usuels. Soit $I = Re/\rho$.

$$\log(I) = \log(Re) - \log(\rho)$$

Donc

$$\log(Re) = \log(I) + \log(\rho)$$

En échelle log-log, sur un axe gradué en Re et ρ , on obtient un réseau de droites parallèles avec une droite pour une même valeur de I ($\log I$ est l'ordonnée à l'origine). Tous les matériaux sur cette droite ont le même indice de performance. Ci-dessous, les matériaux 1 et 2 ont même indice de performance. Le matériau 2 est plus résistant mais plus lourd ! Le matériau 1 est moins lourd, malheureusement il est moins résistant. Le matériau 3 a un meilleur I , il n'est pas le plus résistant et pas le plus léger mais il a sur une courbe d'indice de performance plus élevé. C'est le cas de notre aluminium de tout à l'heure. 1 serait le bois, 2 serait l'acier.

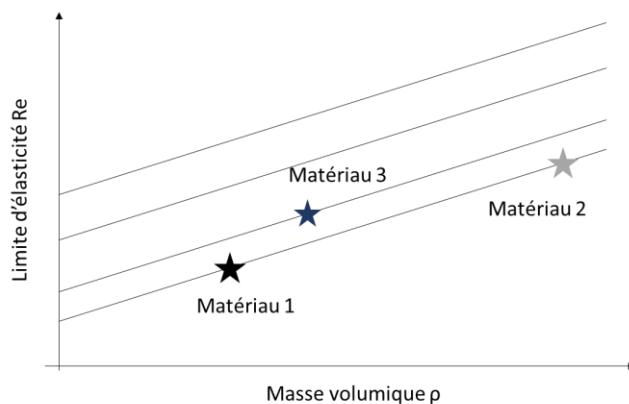


Figure 53. Diagramme d'Ashby. Exemple

Ci-dessous un autre exemple tiré de la littérature.

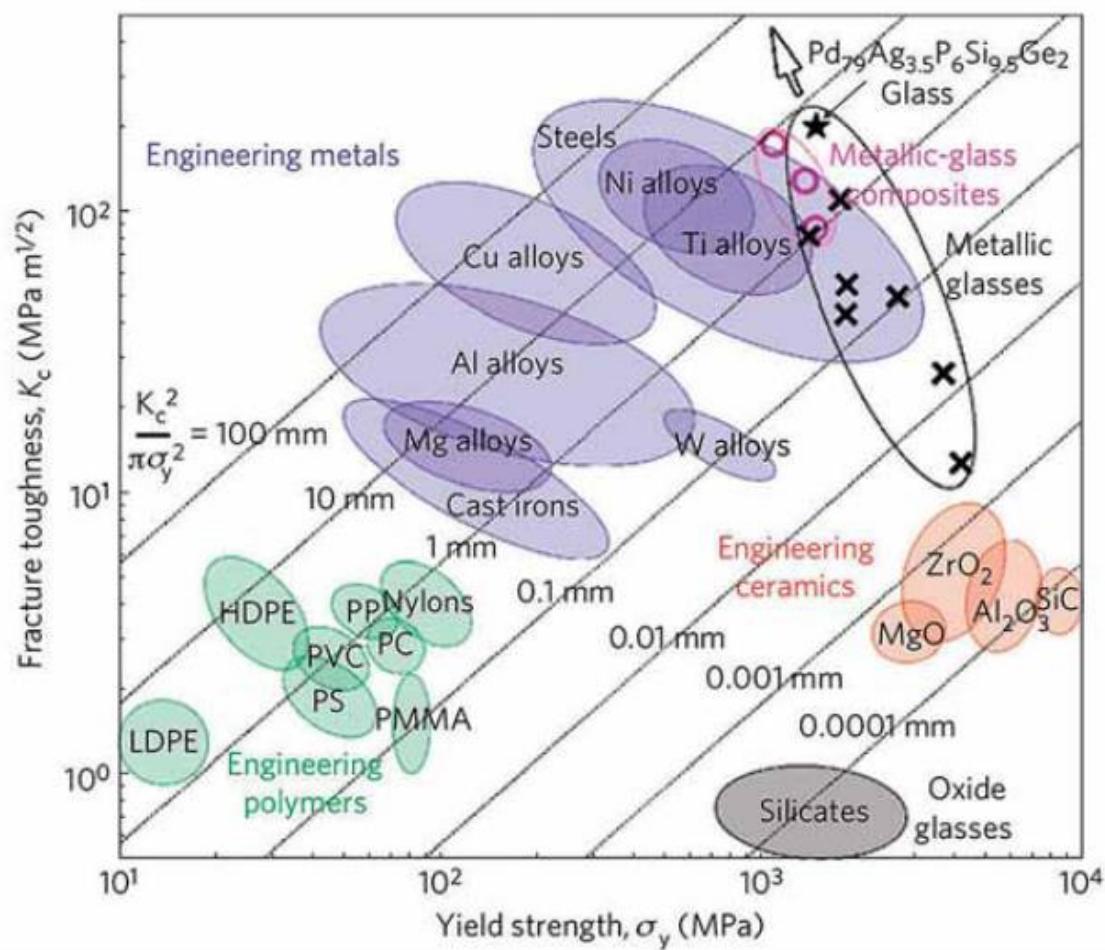


Figure 54. Mechanical behavior of emerging materials Challapalli Suryanarayana Materials Today NOVEMBER 2012

6 Exercices

6.1 QCM

Dans un matériau au comportement ductile, quand la contrainte conventionnelle atteint la résistance en traction R_m alors il y a l'apparition de

-
- a) la plasticité
 - b) la striction
 - c) la rupture
 - d) l'écrouissage
-

Dans un matériau au comportement fragile, quand la contrainte conventionnelle atteint la résistance en traction R_m alors il y a l'apparition de

-
- a) la plasticité
 - b) la striction
 - c) la rupture
 - d) l'écrouissage
-

L'allongement à rupture $A\%$ est une mesure courante de

-
- a) la résilience du matériau
 - b) la dureté du matériau
 - c) la ductilité du matériau
-

Le facteur d'intensité de contrainte maximale admissible par un matériau, en mode I, est

-
- a) la résilience K_{cu}
 - b) la ténacité K_{Ic}
 - c) la dureté H_v
-

Dans une plaque de dimensions « infinies », un trou circulaire peut causer la concentration de contrainte

-
- a) $K_t=2$
 - b) $K_t=3$
 - c) $K_t=4$
-

Quelle unité proposée est une unité possible pour la ténacité ?

-
- a) $MPa\sqrt{m}$
 - b) MPa
 - c) $N.m$
 - d) J/m
-

6.2 Propriétés mécaniques des matériaux

Exercice : sollicitation et contrainte

Pour chaque type de sollicitation ci-dessous, indiquer si le type de contrainte induite est normale et/ou tangentielle.

Sollicitation	Contraintes normales	Contraintes tangentielles
Traction		
Compression		
Cisaillement		
Flexion pure		
Flexion simple		
Torsion		

Exercice : essai mécanique sur 3 matériaux

Vous souhaitez comparer la résistance de 3 matériaux. Votre fournisseur vous envoie 1 éprouvette de traction prismatique (voir schéma) pour chaque matériau.

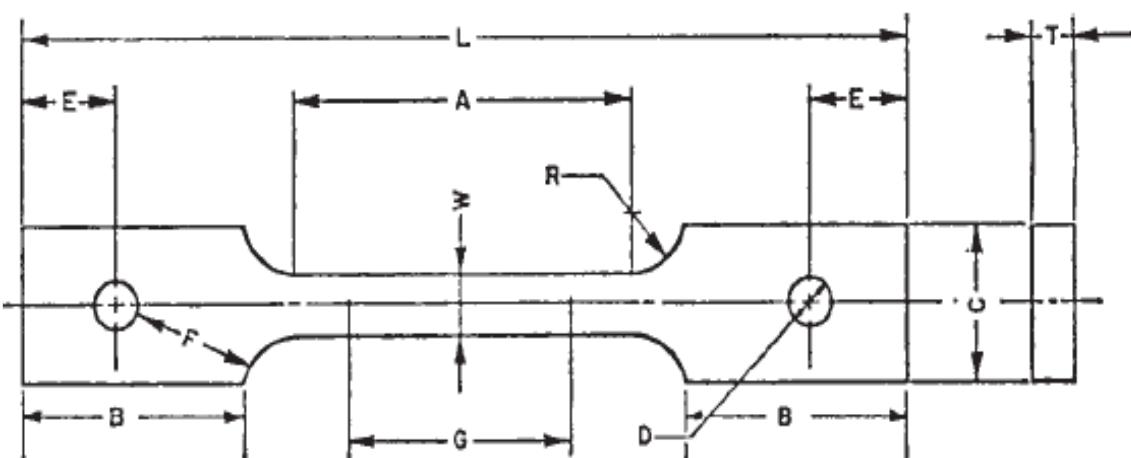
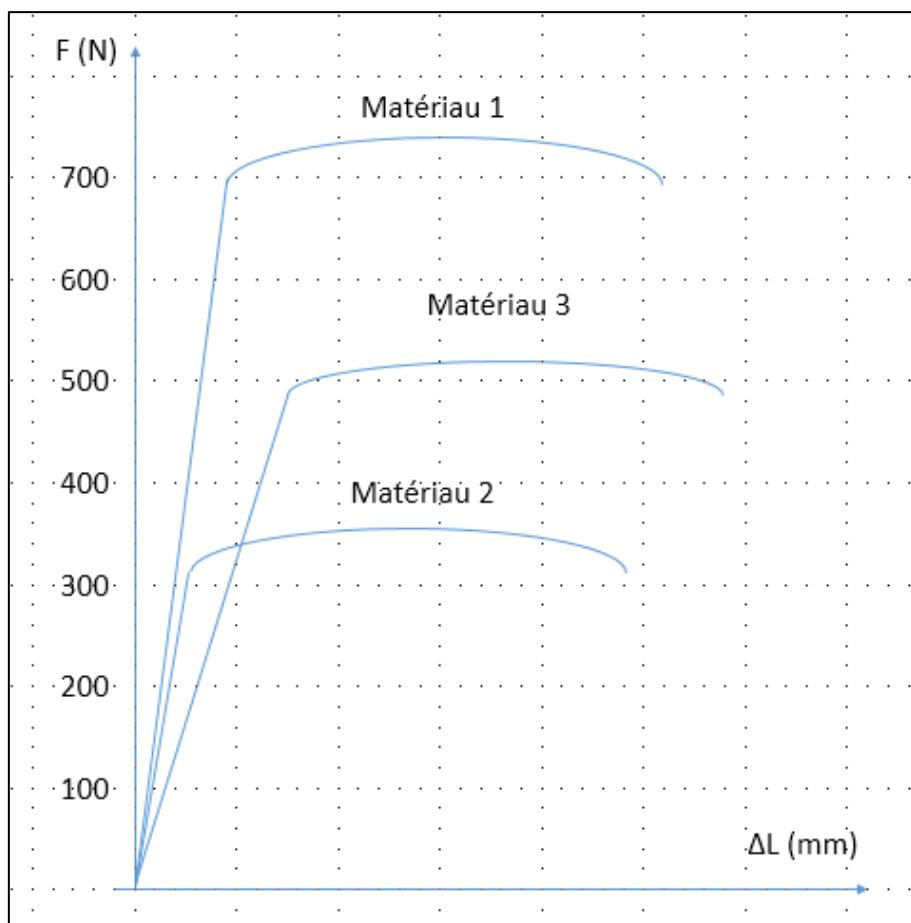


Figure 55. Référence [9]

On donne ci-dessous leurs dimensions et les résultats des essais de traction réalisés.

Votre emballage devra résister à des efforts mécaniques de traction très importants. Quel est le matériau le plus résistant ? Justifier votre réponse

	Largeur éprouvette W (mm)	Epaisseur éprouvette T (mm)
Matériaux 1	19.51	4.03
Matériaux 2	9.32	1.96
Matériaux 3	11.07	2.01



Correction

	Largeur W (mm)	Epaisseur T (mm)	Section (mm²)	Fmax (N)	Rm (MPa)
Matériaux 1	19.51	4.03	78,6	740	9,41
Matériaux 2	9.32	1.96	18,3	350	19,2
Matériaux 3	11.07	2.01	22,3	520	23,3

Le matériau 3 est le plus résistant (Rm le plus élevé)

Exercice : courbe de traction et aciers pour l'emballage

Sur la Figure ci-dessous, on donne la limite d'élasticité et l'allongement à rupture pour les aciers de la gamme ARCELOR. Esquisser la courbe de traction du CRESTEEL et du DR en indiquant les valeurs connues (prendre les valeurs moyennes de la figure).

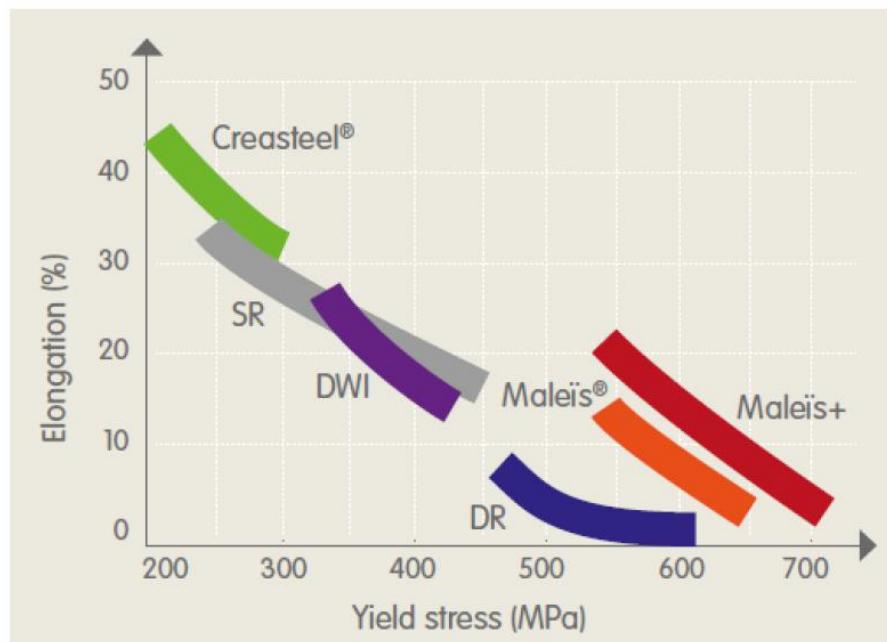
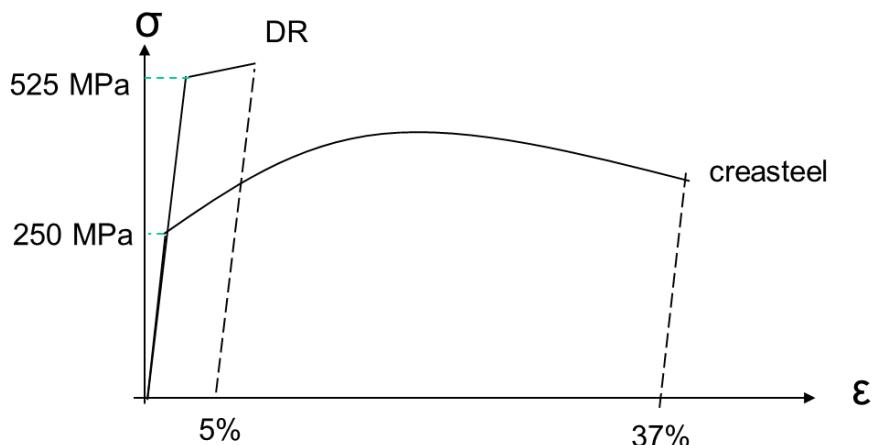


Figure 56. Catalogue ARCELOR aciers pour l'emballage [10]

Correction



Exercice : propriétés mécaniques, vocabulaire

A quelle caractéristique mécanique quantifiable (symboles normalisés donnés dans la seconde colonne), correspondent les propriétés fonctionnelles qualitatives de la première colonne :

1. raideur, rigidité	a) Rm
----------------------	-------

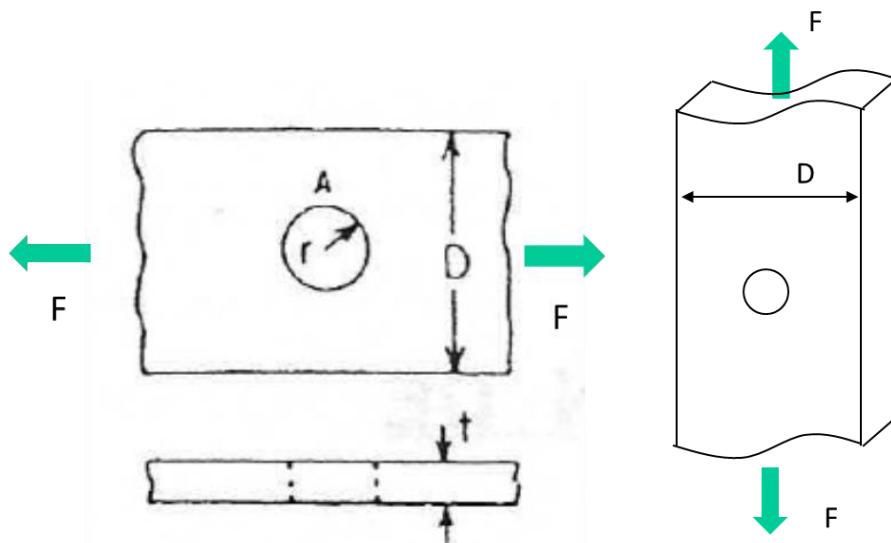
- | | |
|---------------------------|----------------|
| 2. ductilité | b) A% |
| 3. résilience | c) HV, HB, HRC |
| 4. résistance en traction | d) KCU, KCV |
| 5. ténacité | e) E |
| 6. dureté | f) K_{IC} |
| 7. malléabilité | g) R_e |

Exercice : concentration de contraintes

Partie 1

Une plaque plane, épaisseur t , largeur D , comporte un trou circulaire en son centre.

Une force F est appliquée aux deux extrémités de la plaque.



➤ Exprimer la contrainte nominale σ_{nominale} « loin du trou » en fonction de F , t et D .

Le facteur de concentration de contrainte K_t est donné par :

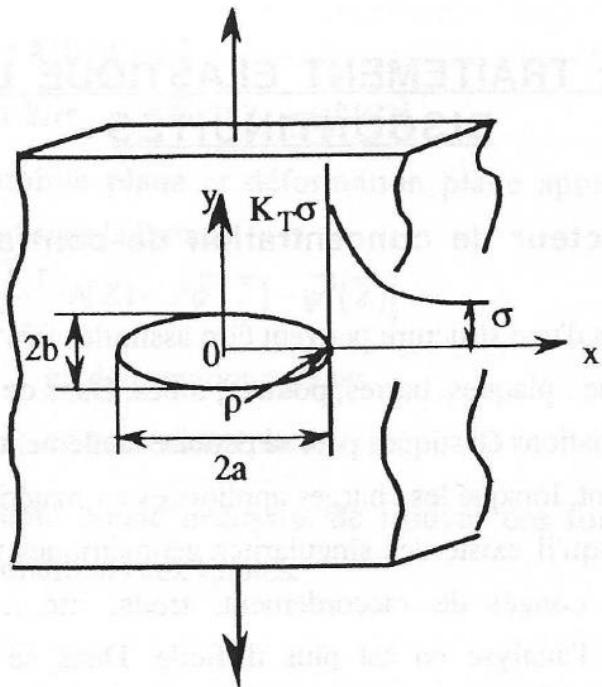
$$K_t = 3,00 - 3,13 \left(\frac{2r}{D} \right) + 3,66 \left(\frac{2r}{D} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{2r}{D} \right)^3$$

➤ Estimer K_t dans le cas où D est très grand devant r

➤ En déduire la contrainte maximale σ_{max} , due à la concentration de contrainte, en fonction de σ_{nominale}

Partie 2

Une plaque plane de section S « infinie » comporte un trou elliptique. Un effort F induit une contrainte σ_{nominale} « loin du trou ».



Le facteur de concentration de contraintes est donné par :

$$K_t = 1 + \frac{2a}{b} = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

Avec ρ rayon de courbure en pointe d'entaille :

$$\rho = \frac{b^2}{a}$$

1. Si $a=b$ (trou circulaire), que vaut K_t ?

Cette plaque contient maintenant une fissure, assimilable à une entaille elliptique aigûe telle que $a \gg b$.

2. Que vaut alors le rayon de courbure ρ ?

3. Vers quoi tend K_t ?

4. En déduire la contrainte maximale due à la concentration de contrainte. Le résultat obtenu vous paraît-il cohérent ?

Correction

Exprimer la contrainte nominale σ_{nominale} « loin du trou » en fonction de F , t et D .

$$\sigma_{\text{nominale}} = F/S = F/D \cdot t$$

Le facteur de concentration de contrainte K_t est donné par :

$$K_t = 3,00 - 3,13 \left(\frac{2r}{D} \right) + 3,66 \left(\frac{2r}{D} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{2r}{D} \right)^3$$

Estimer K_t dans le cas où D est très grand devant r **K_t tend vers 3**

En déduire la contrainte maximale σ_{max} , due à la concentration de contrainte, en fonction de $\sigma_{nominale}$

$$\sigma_{max} \approx 3 \cdot \sigma_{nominale}$$

Si $a=b$ (trou circulaire), que vaut K_t ? **On retrouve $K_t=3$ comme pour la partie 1**

Cette plaque contient maintenant une fissure, assimilable à une entaille elliptique aiguë telle que $a>>b$.

Que vaut alors le rayon de courbure p ? **Il tend vers 0**

Vers quoi tend K_t au bord du trou? **K_t tend vers l'infini**

En déduire la contrainte maximale due à la concentration de contrainte. Le résultat obtenu vous paraît-il cohérent?

Si K_t tend vers l'infini alors la contrainte maximale due à la concentration de contrainte tend vers l'infini. Le modèle prédit une contrainte infinie alors que l'on n'a pas rupture (une pièce fissurée peut résister à certains niveaux de contraintes). Le modèle en K_t n'est plus adapté pour une entaille de type fissure. Il donne des résultats aberrants. Une nouvelle approche mathématique : la mécanique de la rupture, discipline qui étudie la résistance des pièces fissurées. L'outil utilisé est la Facteur d'Intensité de Contrainte K .

Exercice : modes d'endommagement des matériaux et des structures

A quels modes d'endommagement sont dues les ruptures observées ou à quels modes d'endommagement sont soumises les pièces suivantes ?



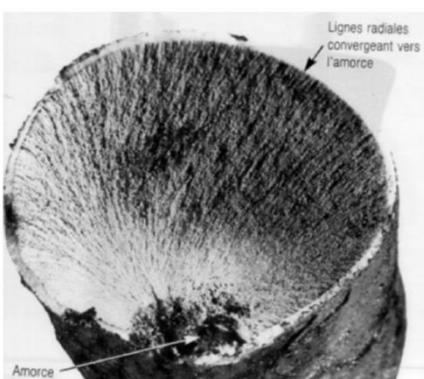
b : filament d'une ampoule



rails « fléchis »



emballage en polymère suspendu



axe fissuré après un fonctionnement répété en flexion rotative



paliers lisses



câble de grue

Q2/ Quel mode d'endommagement risque-t-on de faire apparaître dans une structure soumise à l'action combinée d'une température supérieure à 30% de la température de fusion du matériau et d'une déformation constante?

Correction

Q1/

- Filament : fluage
- Rails fléchis : flambage sous l'action d'une forte dilatation thermique
- Emballage : fluage
- Axe fissuré : fatigue
- Paliers lisses : fatigue de contact, usure de surface
- Câble de grue : fatigue

Q2/ Fluage

6.3 Propriétés thermiques

Exercice : le Concorde

Le fuselage du Concorde était principalement constitué d'alliage d'aluminium. En croisière à Mach 2, la température pouvait dépasser les 100°C. On prendra une température à la surface du fuselage de 127°C.

Données : Longueur du Concorde : environ 61.6m

Estimer l'allongement du Concorde pendant le vol

Tableau 4 – Dilatation thermique de l'aluminium

Température		Dilatation linéaire $\Delta L/L_0$
(K)	(°C)	(%)
25	- 248	- 0,416
50	- 223	- 0,412
75	- 198	- 0,397
100	- 173	- 0,372
150	- 123	- 0,298
200	- 73	- 0,204
250	- 23	- 0,098
293	20	0,000
350	77	0,134
400	127	0,256
500	227	0,515
600	327	0,789
700	427	1,089
800	527	1,411
900	627	1,765

Réf : TI-M443

Correction

$$\Delta L = \frac{0.256}{100} * 61.6 \approx 0.158 \text{ m}$$

15,8cm (ordre de grandeur seulement)

Exercice : joint de dilatation pour un pont

Un joint de dilatation est un espace entre deux portions d'une structure dont le but est de permettre à chacune des parties des déplacements relatifs indépendamment l'une de l'autre. Il permet notamment à la structure de se dilater en fonction de la température. On veut dimensionner un joint pour un pont en béton longueur $L=40\text{m}$. On place un joint de chaque côté du pont.

Déterminer le jeu J (ou "souffle") minimal des 2 joints

Données : Coefficient de dilatation du béton = $10^{-5} / \text{K}$; Température mini et maxi considérées par défaut en France : $-40^\circ\text{C} / 30^\circ\text{C}$

On voit sur le web : Une méthode rapide (mais exacte) pour calculer les souffles est la suivante (pour la France métropolitaine, donc avec les valeurs moyennes de température citées ci-dessus) : vous multipliez la demi longueur de l'ouvrage (en mètres) par 0,7 pour les ponts en béton ou précontraints ou par 1 pour les ponts métalliques; exemple : un pont de 40 m de long en béton : $40/2=20$ donc $20*0.7=14$ mm de souffle par joint. Cela permet de déterminer rapidement quel est la gamme de joint dont on aura besoin.

Retrouver le coefficient 0,7 introduit

Juger de la pertinence de ce type de facteur



http://fr.wikipedia.org/wiki/Joint_de_chauss%C3%A9e

Etude de cas : l'A380

Dans l'A380, les câblages électriques sont en aluminium plutôt qu'en cuivre. La longueur totale de câble dans l'A380 est d'environ 500km. On prendra un diamètre pour le fil de cuivre de 1mm.

Estimer le gain de masse obtenu en prenant en compte toutes les contraintes liées à ces câbles électriques.

Données

- Résistivité du cuivre : $1.7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$.
- Résistivité de l'aluminium : $2.7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$.
- Masse volumique cuivre : 8700 kg/m^3
- Masse volumique alu : 2700 kg/m^3

Correction

On détermine le diamètre d'un fil d'alu ayant même résistance (en ohm) et on calcule la masse des 2 fils (cuivre et alu)

La résistance d'un fil électrique (en Ω) fait dans un matériau de résistivité ρ , de longueur L et de section S est :

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}$$

Problème : si on met de l'alu à la place du cuivre sans changer de diamètre de fil, la résistance électrique des 500km de fil va augmenter car résistivité alu > cuivre (donc soucis de chauffe par effet Joule, transmission de puissance modifiée....etc)

Il faut donc dans un premier temps estimer le diamètre d'aluminium (environ 1,26mm) qui donnerait la même résistance électrique que le fil de cuivre, sur une même longueur. On connaît alors les dimensions du fil d'alu, on peut estimer les masses de 500km de fil de cuivre et d'alu et calculer le gain de masse.

Réponse : 1.7 Tonnes

Calcul tout à fait approximatif car la structure des fils est plus complexe mais il semble que le gain de masse soit effectivement en tonnes d'après différentes sources

Exercice : soudage par résistance

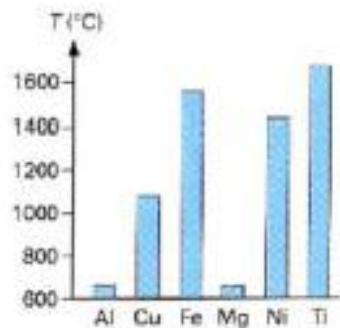
Le soudage par résistance met en oeuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre. La chaleur produite Q est donnée par :

$$Q = \int_0^T R \cdot I^2 \cdot dt$$

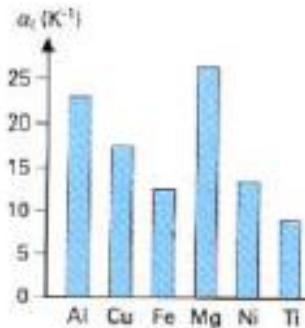
Avec R résistance électrique rencontrée par le courant, I intensité du courant, T durée du phénomène, t variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la fusion des deux pièces à assembler.

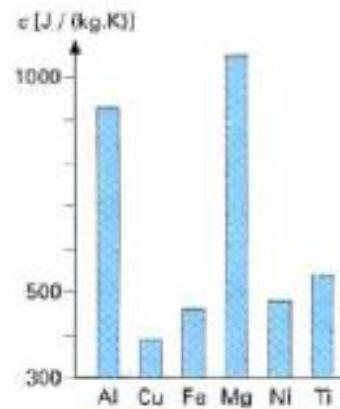
A l'aide des données matériaux fournis ci-dessous, déterminer quels matériaux pourront facilement se souder par soudage par résistance, et quels matériaux seront difficiles à souder à l'aide de ce procédé. Justifier votre choix



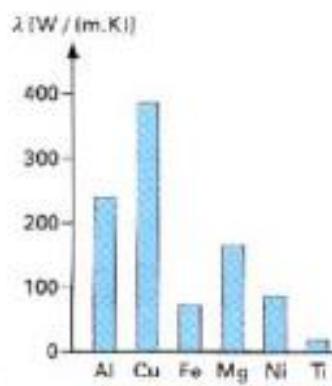
a) température de fusion



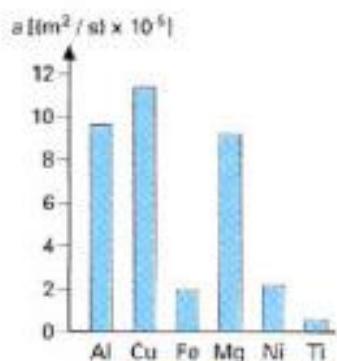
b) coefficient de dilatation linéique entre 0 et 100 °C



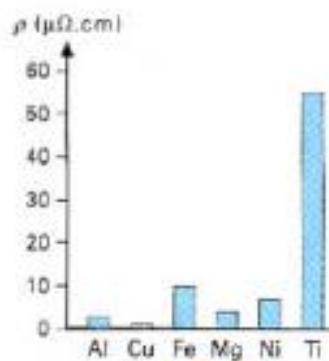
c) capacité thermique massique entre 0 et 100 °C



d) conductivité thermique



e) diffusivité thermique



f) résistivité

Réf Techniques de l'ingénieur

Correction

On souhaite une quantité de chaleur apportée Q aussi élevée que possible.

Si le matériau a une trop faible résistivité, la résistance électrique R rencontrée par le courant sera faible. Il faudra donc imposer un courant I important pendant le soudage pour atteindre une quantité de chaleur apportée Q suffisante.

Aluminium : sa faible résistivité électrique impose, lors du soudage par résistance, la mise en oeuvre de grandes densités de courant. Sa conductivité thermique élevée impose la mise en oeuvre de sources de chaleur à grande

densité d'énergie afin de permettre une réduction de la durée des cycles thermiques de soudage et cela malgré la basse température de fusion du métal de base

Sa dilatabilité linéique élevée exige que soient prises des précautions pour limiter les risques de bridage mais le bas point de fusion du métal de base fait que les déformations sont réduites puisqu'elles ne se développent que sur un intervalle de température limité.

Cuivre : sa très faible résistivité électrique rend le soudage par résistance **très difficile** (il exigerait la mise en oeuvre de grandes densités de courant). Sa conductivité thermique très élevée impose la mise en oeuvre de sources de chaleur à grande densité d'énergie afin de permettre une réduction de la durée des cycles thermiques de soudage. Sa dilatabilité linéique relativement élevée exige que soient prises des précautions pour limiter les risques de bridage.

TITANE

- Sa conductivité thermique faible permet de limiter les apports d'énergie.
- Sa dilatabilité linéique modérée réduit l'ampleur des déformations.
- Sa forte résistivité facilite le soudage par résistance.

Exercice : soudage à la mollette des emballages métalliques

De nombreux emballages métalliques montrent une opération de soudage. Le corps des boîtes 3 pièces est par exemple assemblé en soudage par résistance.

Ce procédé met en oeuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre. La chaleur produite Q est donnée par :

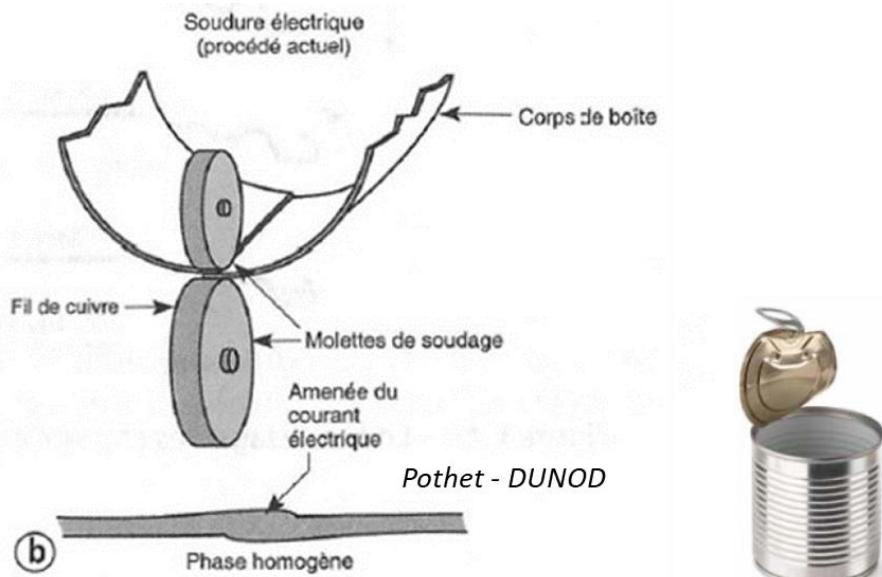
$$Q = \int_0^T R \cdot I^2 \cdot dt$$

avec R résistance électrique rencontrée par le courant, I intensité du courant, T durée du phénomène, t variable temps.

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses, la chaleur produite conduit à la fusion des deux pièces à assembler. On veut donc un assemblage ayant la résistance R la plus élevée possible afin d'avoir une quantité de chaleur créée aussi élevée que possible, pour une même intensité de courant I.

Partie 1. Soudabilité

1. *Les emballages métalliques sont en aluminium ou en acier. Lequel des deux matériaux est plus facile à assembler en soudage par point ? Justifier votre réponse à l'aide des propriétés matériau données ci-dessous.*



Partie 2. Soudage des aciers pour emballage

1. *On souhaite réaliser un emballage par soudage à la mollette. Doit-on plutôt choisir un fer blanc ou un fer chromé ?*

Partie 3. Vitesse de soudage et cadence

La longueur de point de soudure est définie comme étant l'intervalle entre chaque point de soudure.

Les impulsions de courant électrique sont générées par un courant sinusoïdal de fréquence 50Hz.

A chaque cycle, deux points de soudure sont créés.

1. *Déterminer le temps écoulé entre chaque impulsion de soudage.*
2. *En déduire la longueur de point de soudure en fonction de la vitesse V_s de déplacement des boîtes.*
3. *Déterminer la cadence (boîtes/min) en fonction de V_s , de la hauteur h des boîtes et de l'espacement e entre chaque boîte.*
4. *On souhaite une longueur de fil de soudure de 1mm; pour des boîtes de hauteur 99,2mm. L'espacement entre chaque boîte sera de 0,8mm. En déduire la vitesse V_s nécessaire ainsi que la cadence de production des boîtes.*

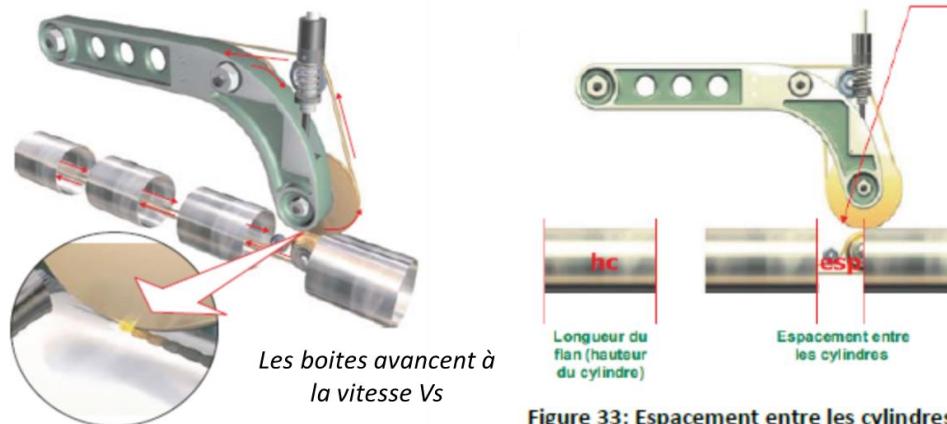


Figure 33: Espacement entre les cylindres

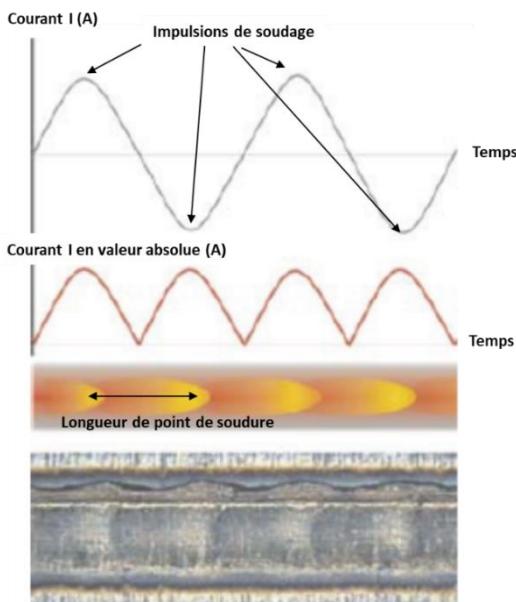


Figure 31: Relation entre le courant et l'aspect de la soudure

Cordier 2015

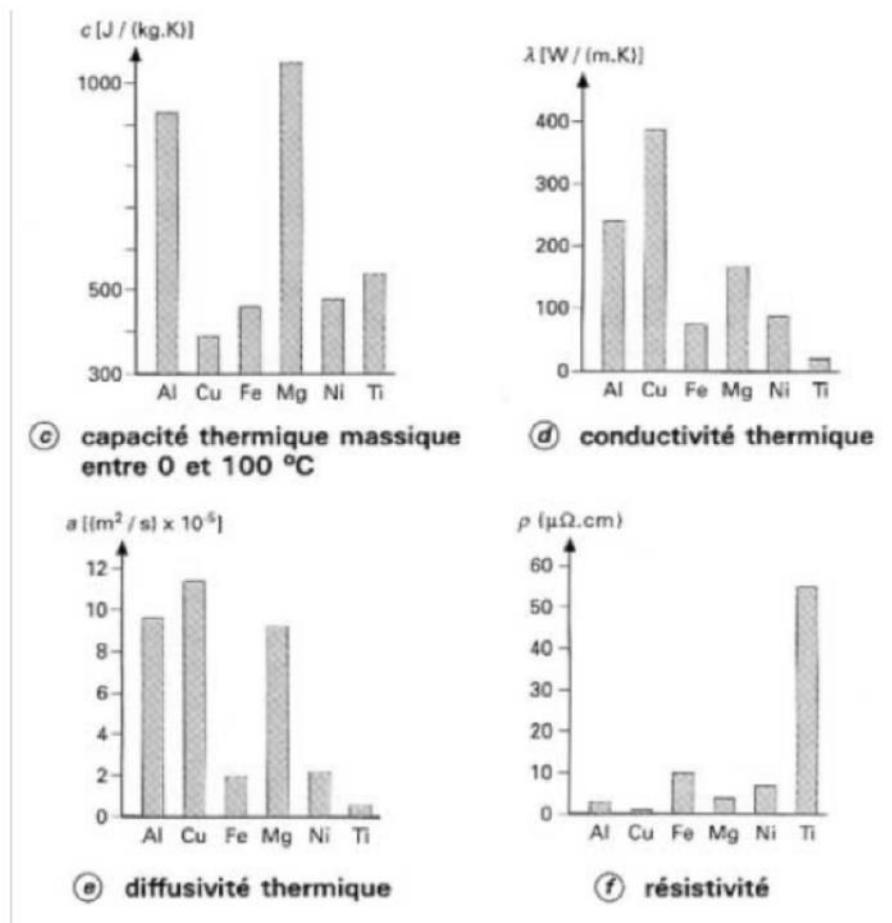


Figure 5. Propriétés de matériaux métalliques usuels

Figure 57. Techniques de l'ingénieur

Réponse

Alliages d'aluminium

Sa conductivité thermique élevée impose la mise en oeuvre de sources de chaleur à grande densité d'énergie afin de permettre une réduction de la durée des cycles thermiques de soudage et cela malgré la basse température de fusion du métal de base (il peut être nécessaire de procéder à un préchauffage pour limiter la quantité d'énergie à mettre en oeuvre). Le niveau de cette conductivité a une contrepartie favorable en ce sens qu'il induit une diminution des gradients thermiques et, de ce fait, conduit à des déformations moins localisées.

Sa faible résistivité électrique impose, lors du soudage par résistance, la mise en oeuvre de grandes densités de courant.

Partie 2

On souhaite réaliser un emballage par soudure à la mollette. Doit-on plutôt choisir un fer blanc ou un fer chromé ?

Le soudage électrique permet d'employer du métal très mince (0,15 mm) ainsi que des taux d'étamage réduits (1 voire 0,5 g/m²). **En revanche, le fer chromé n'est pas compatible avec ce procédé.**

Partie 3.

1. Temps passé entre deux impulsions : $t = 1 / 2.f$ (en s) avec f en Hz
2. Longueur L du fil = distance parcourue pendant ce temps, à la vitesse Vs : $L = Vs \cdot t$ donc

$$L = \frac{Vs}{2.f}$$

avec L en m, f en Hz, Vs en m/s

3. Cadence

$$n = \frac{Vs}{h + e}$$

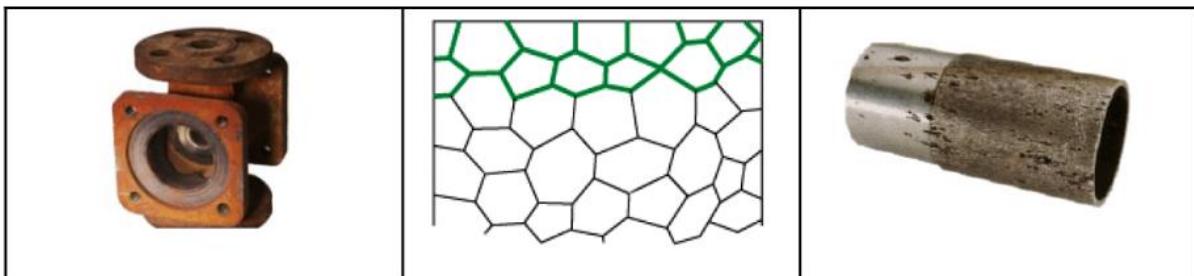
avec n en boites/min, Vs en m/min, h et e en m/boite

4. On veut L = 0,001m donc il faut Vs = 6m/min. Cela implique n = 60 boites/min

6.4 Corrosion

Exercice : les formes de corrosion

Quels types de corrosion peut-on reconnaître sur les images ci-dessous ?



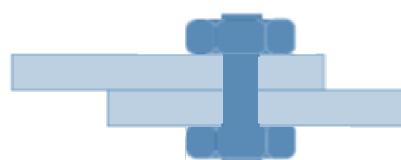
Crédit images : CEFRACOR

Correction

Uniforme / intergranulaire / par piqûres

Exercice : corrosion d'un assemblage

Deux plaques en aluminium ont été assemblées à l'aide de vis en titane. L'environnement dans lequel l'assemblage a évolué est très humide et des points de corrosion sont apparus.



- Quel type de corrosion peut-on suspecter ?
- Sur quelle partie de l'assemblage (plaqué en aluminium ou vis en titane) pouvait-on anticiper un début de corrosion ?
- On ne peut pas changer de matériau. Quelle solution proposez-vous pour éviter cette corrosion à l'avenir ?

Correction

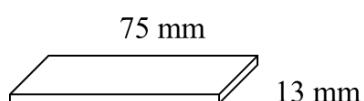
Contact électrique + électrolyte (humidité) + 2 matériaux aux potentiels différents = corrosion galvanique

Le métal le moins noble (au potentiel d'électrode le plus faible) sera corrodé

On doit éviter tout contact électrique (joint polymère entre le titane et l'alu, vernir les matériaux) ou éviter l'humidité

Exercice : dissolution anodique d'une plaque d'aluminium

Soit la plaque en alliage d'aluminium 3004-H14 ci-dessous.



épaisseur 1,6 mm

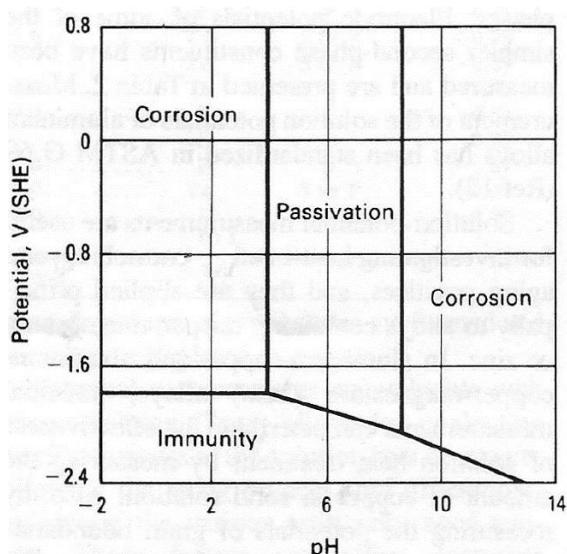


Fig. 1 Pourbaix diagram for aluminum with an $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ film at 25 °C (75 °F). Potential values are for the standard hydrogen electrode (SHE) scale. Source: Ref 3

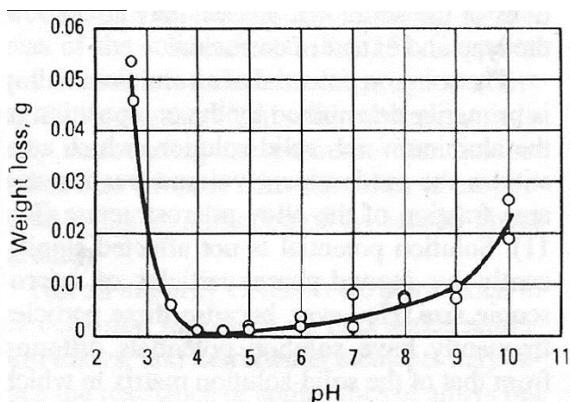


Fig. 2 Weight loss of alloy 3004-H14 exposed 1 week in distilled water and in solutions of various pH values. Specimens were 1.6 × 13 × 75 mm (0.06 × 0.5 × 3 in.). The pH values of solutions were adjusted with HCl and NaOH. Test temperature was 60 °C (140 °F).

Figure 58. ASM Handbook [11]

Données

- On suppose que le potentiel standard d'électrode de l'alliage 3004-H14 a pour valeur -800 mV_{SHE}

- Masse volumique de l'aluminium : 2700 kg/m^3

Questions

1. A l'aide du diagramme de Pourbaix de l'aluminium (Fig 1) expliquer la courbe de la Fig 2.
2. La plaque est utilisée comme éprouvette pour les essais de corrosion de la Fig 2. Pour un $\text{pH} = 2,6$, estimer la perte d'épaisseur après 1 an (on supposera une dissolution uniforme sur l'ensemble de l'éprouvette)
3. Même question pour $\text{pH} = 9$.

Correction

Perte d'épaisseur

Création échantillon proportionnel $t_0=1,6$

- $e = 1,6\text{mm} = 1 \times t_0$
- $l = 13\text{mm} = 8,125 \times t_0$
- $L = 75\text{mm} = 46,875 \times t_0$

Donc

$$V_0 = t_0 \cdot 8,125 \cdot t_0 \cdot 46,875 \cdot t_0 = 8,125 \times 46,875 \times t_0^3$$

Donc le volume final aura pour expression

$$V_f = 8,125 \times 46,875 \times t_f^3$$

Raisonnement : Masse perdue > volume perdu > volume final > t_f > épaisseur finale = t_f

	pH=2,6	pH=9
Masse perdue sur 1 semaine (g) (lecture graphe)	0,05	0,009
Masse perdue sur 52 semaines (g)	2,6	0,468
Masse volumique alu (kg/m3)	2700	2700
Masse volumique alu (g/mm3)	0,0027	0,0027
Volume perdu (mm3)	962,96	173,33
épaisseur initiale e0 (mm)	1,6	1,6
largeur l0 (mm)	13	13
longueur initiale L0 (mm)	75	75
l/e	8,125	8,125
L/e	46,875	46,875
V initial échantillon V0 (mm3)	1560	1560
Masse initiale (g)	4,212	4,212
Volume final (mm3) : V0 - Volume perdu	597,04	1386,67
Epaisseur finale ef (mm)	1,16	1,54
Largeur finale lf (mm)	9,44	12,50
Longueur finale lf (mm)	54,45	72,11

The conditions for thermodynamic stability of the oxide film are expressed by the Pourbaix (potential versus pH) diagram shown in Fig. 1. As shown by this diagram, aluminum is passive (protected by its oxide film) in the pH range of about 4 to 8.5. The limits of this range, however, vary somewhat with temperature, with the specific form of oxide film present, and with the presence of substances that can form soluble complexes or insoluble salts with aluminum. The relative inertness in the passive range is further illustrated in Fig. 2, which gives the results of weight-loss measurements for alloy 3004-H14 specimens exposed in water and in salt solutions at various pH values.

Beyond the limits of its passive range, aluminum corrodes in aqueous solutions because its oxides are soluble in many acids and bases, yielding Al^{3+} ions in the former and AlO_2^- (aluminate) ions in the latter. There are, however, instances when corrosion does not occur outside the passive range—for example, when the oxide film is not soluble or when the film is maintained by the oxidizing nature of the solution (Ref 4).

Figure 59. Référence [11]

Corrosion du fer blanc, revêtement, protection

Compléter les mots manquants dans le texte ci-dessous (texte issu de [12]).

« Au cours de son utilisation, le fer-blanc subit diverses agressions qui se traduisent souvent par des rayures qui mettent l'acier à nu. A l'intérieur de la boîte, l'..... et le fer sont alors en contact par l'intermédiaire du contenu de l'emballage qui est souvent, au moins en partie, sous forme de solution.

On a ainsi une formée par les deux dans un

Les normaux en solution aqueuse des couples mis en jeu sont les suivants :

$$Eo (Sn^{2+}/Sn) = -0,14 \text{ V} \quad Eo (Fe^{2+}/Fe) = -0,44 \text{ V}$$

D'après ces valeurs, le serait oxydé préférentiellement à

Ces valeurs sont données dans des conditions bien définies au niveau du pH et de la nature de l'électrolyte.

Dans le cas des aliments conservés dans des emballages en fer-blanc, la valeur acide du pH, l'absence d'oxygène, la complexation des ions de font que, en général, c'est qui perdra plus facilement ses électrons et qui donc s'oxydera et ainsi protégera le de la corrosion en jouant le rôle d'une au moins tant qu'il reste de »

Correction

« Au cours de son utilisation, le fer-blanc subit diverses agressions qui se traduisent souvent par des rayures qui mettent l'acier à nu. Il faut distinguer l'oxydation de l'extérieur de la boîte de celle de l'intérieur.

A l'extérieur de la boîte, le revêtement d'étain permet d'éviter l'oxydation, à l'air, de l'acier. Si la présence de rayures met l'acier à nu, il se forme de la rouille. Cette oxydation n'est, en général, pas trop gênante pour la conservation des aliments car les vitesses de corrosion sont réduites, à condition que les boîtes ne soient pas conservées dans des atmosphères trop humides ou salines. La présence de rouille est seulement préjudiciable à l'aspect esthétique de la boîte.

A l'intérieur de la boîte, il faut, du point de vue de la corrosion, prendre en compte la présence des deux métaux, étain et fer. Ils sont en contact par l'intermédiaire du contenu de l'emballage qui est souvent, au moins en partie, sous forme de solution. On a ainsi une pile formée par les deux métaux dans un électrolyte. La connaissance de la résistance à la corrosion intérieure des boîtes en fer-blanc est fondamentale car elle détermine la durée de conservation des aliments dans ces boîtes. Les problèmes rencontrés : perforation des boîtes, gonflement (ou bombage), mauvais goût des aliments (si à l'origine ils étaient de bonne qualité) sont liés à des phénomènes de corrosion intérieure.

Les potentiels d'électrode normaux en solution aqueuse des couples mis en jeu sont les suivants [3] :

$$Eo (Sn^{2+}/Sn) = -0,14 \text{ V} \quad Eo (Fe^{2+}/Fe) = -0,44 \text{ V}$$

D'après ces valeurs, le fer serait oxydé préférentiellement à l'étain. Ces valeurs sont données dans des conditions bien définies au niveau du pH, de la nature de l'électrolyte... Dans le cas des aliments conservés dans des emballages en fer-blanc, la valeur acide du pH, l'absence d'oxygène, la complexation des ions de l'étain... font que, en général, c'est l'étain qui perdra plus facilement ses électrons et qui donc s'oxydera et ainsi protégera le fer de la corrosion en jouant le rôle d'une anode sacrificielle au moins tant qu'il reste de l'étain »

6.5 Choix des matériaux

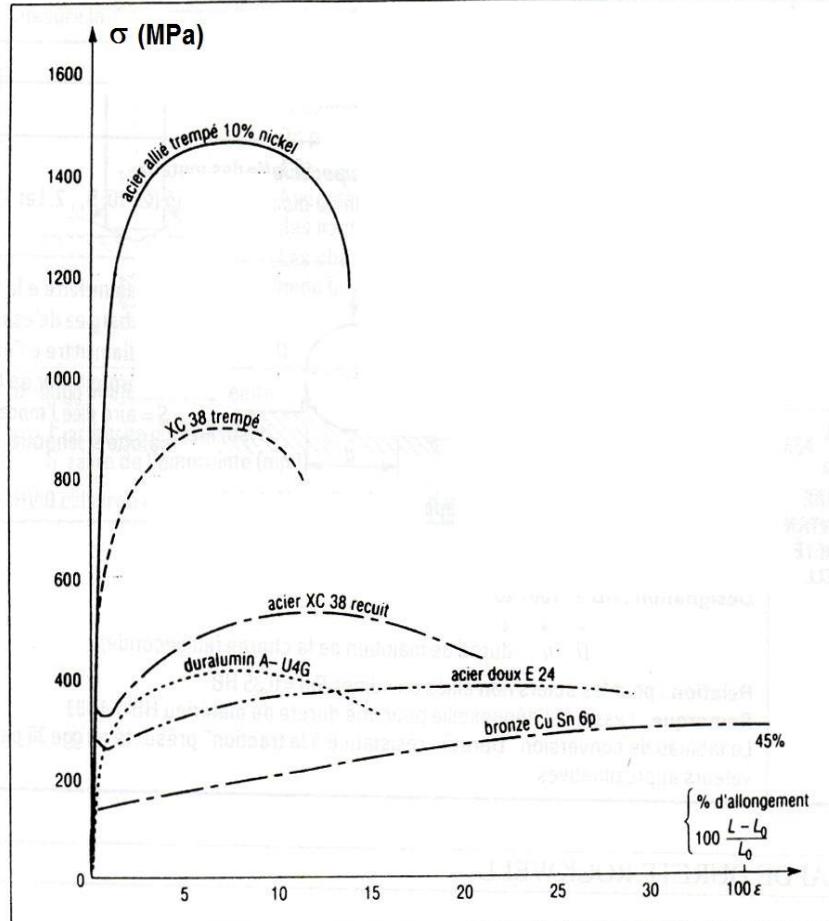
Exercice : choix matériau

En exploitant la courbe ci-dessous, quel matériau proposeriez-vous pour :

1. Obtenir une pièce en acier formée par emboutissage, avec un minimum d'effort à imposer lors de l'emboutissage, et une possibilité de déformation importante. Justifier votre choix.
2. Fabriquer une pièce aussi légère que possible avec un matériau restant dans le domaine élastique pour une contrainte de 100 MPa. Justifier votre choix.
3. Fabriquer une pièce devant résister à de très fortes contraintes sans entrer dans le domaine de déformation plastique. Justifier votre choix.

Données

- Masse volumique de l'acier : 7500 kg/m³
- Masse volumique du bronze : 8500 kg/m³
- Masse volumique de l'aluminium : 2700 kg/m³
- Duralumin : alliage d'aluminium



Correction

1/ acier doux E24 2/ Duralumin AU4G (ancienne désignation pour l'alliage d'aluminium 2017) 3/ acier allié trempé 10% nickel

Exercice : Choix d'un matériau pour le mât d'un bateau

Exercice inspiré d'une étude de cas de l'ouvrage [7]

On souhaite comparer les performances de divers matériaux pour la construction d'un mât de bateau.

On assimile le mât à une poutre tubulaire creuse, soumise à un chargement uniformément réparti sollicitant la poutre en flexion. On suppose que l'on reste dans le domaine élastique.

Les formules ci-dessous, issues d'un calcul de type Résistance des Matériaux, donnent la flèche en flexion en fonction de l'effort réparti F , de la longueur L du mât, du module de Young E du matériau, et du moment quadratique I de la poutre (r : rayon de la poutre, t : épaisseur).

$$\delta = \frac{1}{8} \left(\frac{Fl^3}{EI} \right)$$

$$I = \pi r^3 t$$

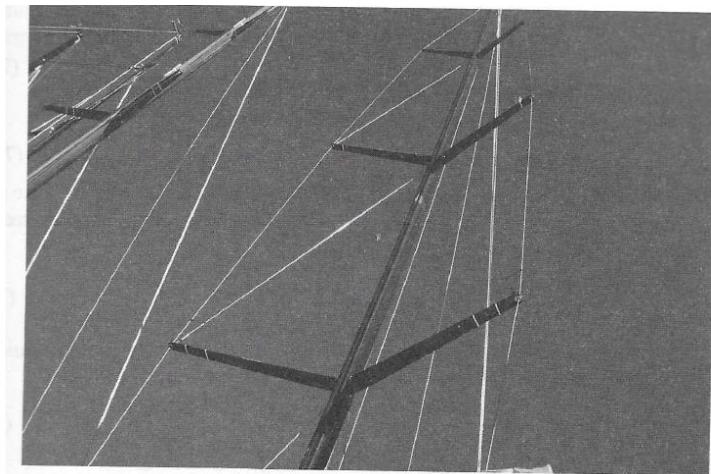
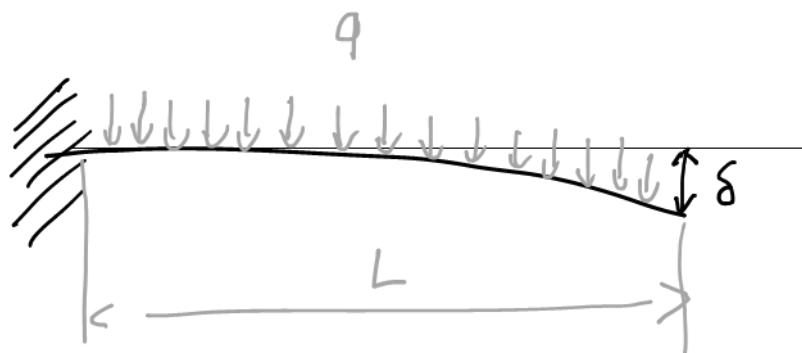
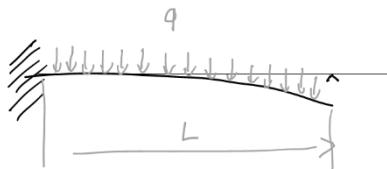


Figure 7.1 Le mât en fibre de carbone d'un voilier de compétition
(Société nautique australienne, Rushcutters Bay, Sydney 2 25,34 S / 151 13 55,08 E).

Figure 60. Référence [7]



$$\begin{aligned}
 I &= \frac{\pi R_e^4}{4} - \frac{\pi R_i^4}{4} = \frac{\pi}{4} (R_e^4 - (R_e - 2t)^4) \\
 &= \frac{\pi}{4} (R_e^4 - (R_e - 2t)^2 (R_e + 2t)^2) \\
 &= \frac{\pi}{4} (R_e^4 - (R_e^2 - 4R_e t + 4t^2)(R_e^2 + 4R_e t + 4t^2)) \\
 &= \frac{\pi}{4} (R_e^4 - (R_e^4 - 4R_e^3 t + 4t^2 R_e^2 - 4R_e^3 t - 16R_e^2 t^2 - 16R_e t^3)) \\
 &= \frac{\pi}{4} (R_e^4 - 4R_e^3 t + 4t^2 R_e^2 - 16R_e^2 t^2 - 16R_e t^3) \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot 8 R_e^3 t = 2\pi r^3 t
 \end{aligned}$$



Etude du moment quadratique

Le mat est assimilé à une poutre de rayon extérieur r_e , rayon intérieur r_i et d'épaisseur t .

Questions

- Montrer que

$$\frac{q}{\delta} = \frac{8\pi \cdot E \cdot r^3 \cdot t}{L^3}$$

- On suppose que le rayon r du mât est très grand devant son épaisseur t. Montrer alors que la masse M du mât peut être supposée égale à $M=2\pi r \cdot t \cdot L \cdot \rho$

La conception du voilier impose la longueur L et le rayon r du tube, donc la seule variable non fixée est son épaisseur t.

- Montrer que l'on peut écrire

$$M = \frac{1}{4} \cdot \frac{F}{\delta} \cdot \frac{\rho}{E} \cdot \frac{L^4}{r^2}$$

- Pour avoir un mât le plus léger possible, quelle donnée matériau doit-on minimiser ? En déduire l'indice de performance I_p pour le choix du matériau.
- Déterminer l'indice de performance I des matériaux ci-dessous et conclure sur le choix actuel des mâts pour voiliers de plaisance et voiliers de compétition

Matériau	ρ ($\text{Mg} \times \text{m}^{-3}$)	E (GPa)
Acier	7,8	200
Alliage d'aluminium	2,7	69
Alliage de titane	4,5	120
PRFV	2,0	40
Bois	0,6	12
PRFC	1,5	200

Correction

Matériau	Indice de performance
Acier	
Alliage d'aluminium	
Alliage de titane	
Composites à fibres de verres	
Bois	
Composites à fibres de carbone	

25,6410256

25,6410256

26,3157895

20

Les composites à base de fibres de carbone sont largement les plus performantes mais ils sont plus chers que les autres matériaux donc réservés à la compétition et au haut de gamme. Les mats en alliage d'aluminium sont plus abordables et gardent des performances intéressantes. Les aciers souffrent de corrosion en milieu marin.

Exercice : choix d'un matériau pour une tige

Soit une tige de section S , soumise à un effort de traction F .

On chercher à minimiser la masse m de cette tige tout en respectant le cahier des charges :

- L'allongement maximal de la tige sous l'effort imposé F ne doit pas dépasser la valeur ΔL
- La tige est de longueur L

La tige est faite d'un matériau de module d'Young E , masse volumique ρ .

1. Rappeler la relation entre la contrainte σ et la déformation ϵ dans la tige
2. En déduire la section S à donner à la tige en fonction de ΔL , L , F , et E
3. Exprimer la masse m de la tige en fonction de L , S et ρ masse volumique du matériau de la tige
4. En déduire la masse m de la tige en fonction de ΔL , L , F , E et ρ
5. Définir l'indice de performance pour cette tige qui permet de minimiser la masse tout en respectant le critère d'allongement
6. On propose 3 matériaux différents. Remplir le tableau ci-dessous. Dans la colonne « classement », classer les matériaux par leur indice de performance, de 1 à 3

Matériau	Module d'Young E (MPa)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Indice de performance proposé	Classement
Aluminium	75000	2500		
Acier	200000	7500		
Bois	4000	1300		

Correction

On impose un allongement ΔL maxi pour un effort donné F et la longueur L de la tige

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

Donc on doit avoir une section S telle que

$$S = \frac{F}{E \cdot \frac{\Delta L}{L}}$$

Or

$$m = L \cdot S \cdot \rho$$

Donc

$$m = L \cdot \frac{F}{E \cdot \frac{\Delta L}{L}} \cdot \rho = \frac{L}{\Delta L} \cdot L \cdot F \cdot \frac{\rho}{E}$$

On doit minimiser $\frac{\rho}{E}$ donc maximiser E/ρ . On choisira l'aluminium.

	E	p	E/p
Alu	75000	2500	30
Acier	200000	7500	26,7
Bois	4000	1300	3,1

7 Références

[8], [10], [13], [13], [14]

- [1] G. Hénaff, « Cours de propriétés mécaniques des matériaux ». ISAE-ENSMA, 2003.
- [2] Husseini Hassan Al, « Adaptation de la méthode de corrélation d'images numériques pour la gestion des discontinuités du milieu et de la transformation », Université de Poitiers, 2014.
- [3] H.-H. Kausch, Éd., *Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques*. in Traité des matériaux, no. 14. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001.
- [4] M. Bouteau, « Propriétés de mouillage de surfaces chimiquement hétérogènes », 2007. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2007CERG0333/document>
- [5] A. Lamure, « ADHESION et ADHERENCE des MATERIAUX ».
- [6] M. Dupeux, *Aide-mémoire de science des matériaux*, 3^e éd. DUNOD, 2013.
- [7] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 1. Propriétés, applications et conception*. DUNOD, 2013.
- [8] M. Ashby et D. Jones, *Matériaux. 2. Microstructure et procédés de mise en oeuvre*, 4^e éd. DUNOD, 2014.
- [9] E28 Committee, « Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials », ASTM International. doi: 10.1520/E0008-04.
- [10] Arcelor, « Steel for packaging - Product catalogue ». 2013. [En ligne]. Disponible sur: www.arcelormittal.com/packaging
- [11] J. R. Davis & Associates et ASM International, Éd., *Aluminum and aluminum alloys*. in ASM specialty handbook. Materials Park, OH: ASM International, 1993.
- [12] VIGNES et ANDRE, *Une vie de fer-blanc Expériences sur l'élaboration, les propriétés et le recyclage d'un matériau*, BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS Vol 88., vol. 88. 1994.
- [13] A. Rivière, « Cours de matériaux ISAE-ENSMA ». ISAE ENSMA, 2003.
- [14] M. Dupeux et J. Gerbaud, *Exercices et problèmes de sciences des matériaux*. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2010.

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature>
- <http://btscira.perso.sfr.fr/page1/page29/page29.html>
- <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/general/toc.html>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Seebeck
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermistance>
- <http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/Distillation/chapitre2/Chapitre-3/Section-3-5.html>
- <http://perso.wanadoo.fr/philippe.boeuf/robert/physique/mouille.htm>
- http://www.biophysique.sitew.com/dl/Root/9n4dm-tension_superficielle.pdf