

IN2P3

**CARACTERISTIQUES
ET CHOIX
DES MATERIAUX**



SOMMAIRE

CARACTERISTIQUES ET CHOIX DES MATERIAUX

1 Généralités

11 Propriétés mécaniques des matériaux

- 111 *Propriétés d'usage*
- 112 *Essai de Traction*
- 113 *Re, Rm, Re0,2*
- 114 *Courbe réelle ou rationnelle*
- 115 *Palier de limite élastique*
- 116 *Influence de la température sur Re et Rm*
- 117 *Effet de masse*
- 118 *Autres caractéristiques mécaniques: A, E, G, ν variations en fonction de la température*
 - 118-1 *A: allongement à la rupture*
 - 118-2 *E: module d'Young*
 - 118-3 *Valeur spécifique du module*
 - 118-4 *ν : coefficient de Poisson*
 - 118-5 *G: module de cisaillement*
 - 118-6 *La résilience*
 - 118-7 *La ténacité*

12 Comportement élastique des matériaux

13 Comportement plastique

14 Coefficient de sécurité

2 Métaux ferreux

21 Définitions

- 211 *Transformations structurales : rappels*
- 212 *Classement des aciers*

22 Désignation normalisée: rappels

23 Avantages / Inconvénients / Comparaison

- 231 *Variations des propriétés en fonction du traitement thermique*
- 232 *Comparaison de caractéristiques mécaniques des aciers et de quelques matériaux.*
- 233 *Rapports des prix et poids*
- 234 *Aciers / Aciers spéciaux: propriétés et caractéristiques*

24 Soudage

25 Renseignements pratiques complémentaires

3 Alliages d'aluminium

31 Généralités

32 Désignation normalisée : rappels

321 *Désignation numérique*

322 *Désignation alphanumérique*

33 Durcissement

331 *Caractéristiques obtenues*

34 Etats métallurgiques

35 Influence de la température

36 Soudage

37 Renseignements pratiques complémentaires

4 Matériaux polymères

41 Généralités

411 *Les thermoplastiques*

412 *Les thermodurcissables*

42 Avantages et limites

43 Caractéristiques

431 *Polyesters*

432 *Polyamides*

433 *Polycarbonates*

434 *Polyacétals*

435 *Polyphénylènes*

436 *Polyimides*

44 Vieillissement sous radiations

45 Critères de sélection

46 Renseignements pratiques complémentaires

5 Utilisation aux basses températures

51 Evolution des propriétés à basse température

511 *Les aciers*

512 *Les alliages d'aluminium*

513 *Les composites*

52 Renseignements complémentaires

6 Tableaux de synthèse:

Polymères techniques, doses limites, dureté des matériaux

CARACTERISTIQUES ET CHOIX DES MATERIAUX

Le BE de mécanique est confronté au problème du choix des matériaux dans le respect des contraintes imposées par le cahier des charges.

L'objectif de ces pages est de faciliter ce choix et les calculs de *prédétermination* pour les matériaux courants en donnant les caractéristiques physiques et mécaniques (E , ν , R_e , $A\%$..). Les caractéristiques thermiques (C_p , λ , T_{max} ..) ne sont généralement pas indiquées ici. Il est possible de les trouver sur le site de l'IUSTI (<http://iusti.univ-mrs.fr>).

Les explications, les définitions et rappels, ont pour but de permettre une meilleure compréhension des phénomènes et des incertitudes liées aux valeurs données. En effet, les caractéristiques dépendent de la nature du matériau (métal, polymère, composite, céramique), de sa composition et de sa structure. La structure microscopique est liée aux conditions d'élaboration et aux traitements thermomécaniques effectués lors de la fabrication.

1 Généralités

11 Propriétés mécaniques des matériaux

Le comportement d'un métal est fonction des forces extérieures appliquées et traduit les évolutions de la cohésion de l'édifice cristallin. Pour les métaux, les forces qui assurent cette cohésion résultent de l'ionisation des atomes du métal qui perdent des électrons de valence et circulent entre les ions.

Les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation.. Elles sont déterminées, avec un certain intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés.

111 Propriétés d'usage

Elles peuvent être séparées en deux catégories:

- *celles qui font l'objet d'une garantie*: R_m , R_e , A , à 20°C, ou la limite élastique à chaud R_p^t , la résilience à température donnée K_c .

- *celles données à titre indicatif*: résistance au fluage (allongement donné, de 0,5 ou 1% à température donnée, en un temps donné : 10000 ou 100000 heures), à la fatigue (limite d'endurance dépendant de nombreux facteurs pour 10^7 cycles pour les aciers)

Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes normalisées prélevées dans les matériaux à tester. Les conditions de prélèvement et d'essais sont définies par les normes.

112 Essai de Traction

Il consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale S_0 et de longueur utile L_0 . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante:

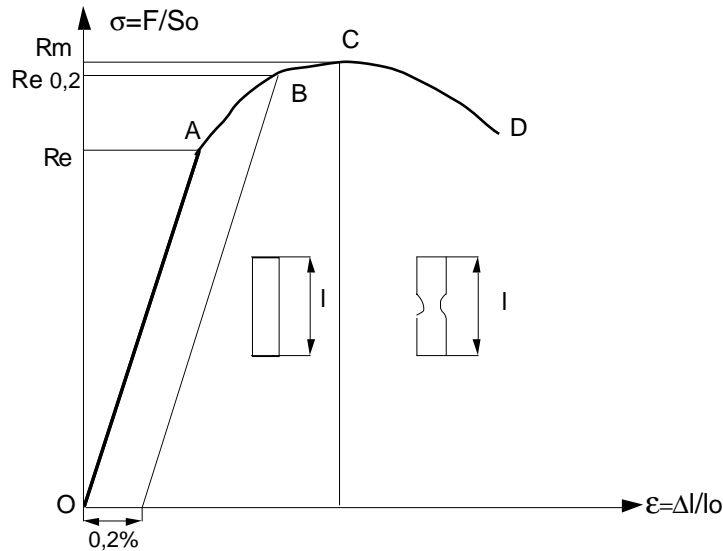


Figure 1

La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.

La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.

Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

113 Re, Rm, Re0.2

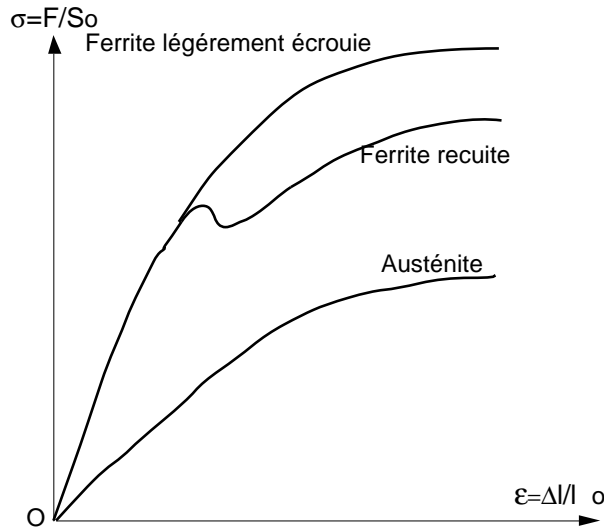
Re (MPa) est la limite de proportionnalité ou **limite élastique**. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles. Re correspond au seuil d'écoulement plastique.

Rm est la **résistance limite** à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue (Figure 1)

Re est atteinte quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité **Re0.2** qui correspond à un allongement plastique de 0,2% (voir Figure 1).

Les aciers austénitiques ont une limite élastique plus faible qui conduit en pratique à utiliser Re0.2.

Dans le cas des aciers ferritiques recuits, les interactions carbone - dislocations peuvent induire une anomalie de limite d'élasticité (crochet: voir figure 2).



Courbe de traction avant striction pour des aciers inoxydables

Figure 2

114 Courbe réelle ou rationnelle

Dans la réalité, la section varie à chaque instant et s'éloigne de sa valeur initiale. Il en va de même pour l'allongement relatif réel.

On peut tracer la courbe de traction vraie, ou rationnelle, qui utilise les sections et déformations réelles à chaque instant et met en évidence le durcissement du matériau (écrouissage) au cours de la déformation plastique.

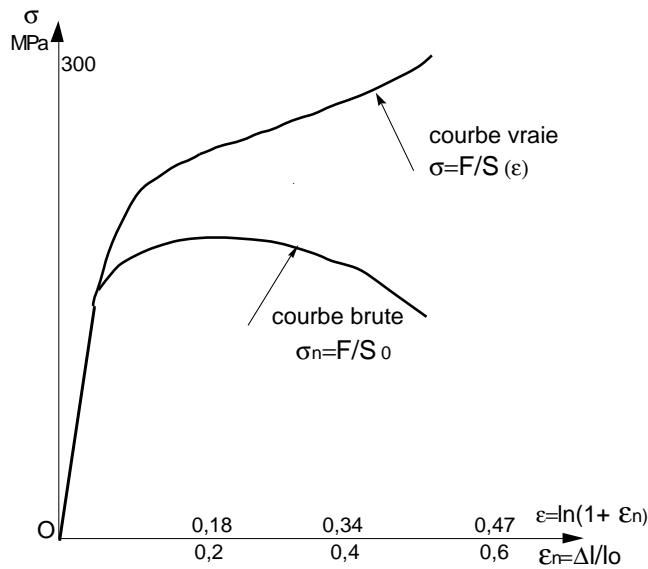


Figure 3

115 Palier de limite élastique

La courbe brute de certains matériaux tels le polycarbonate ou l'acier doux recuit montrent à la fin du domaine élastique une chute des contraintes suivie d'un palier qui correspond à une déformation plastique locale qui se propage sous effort constant.

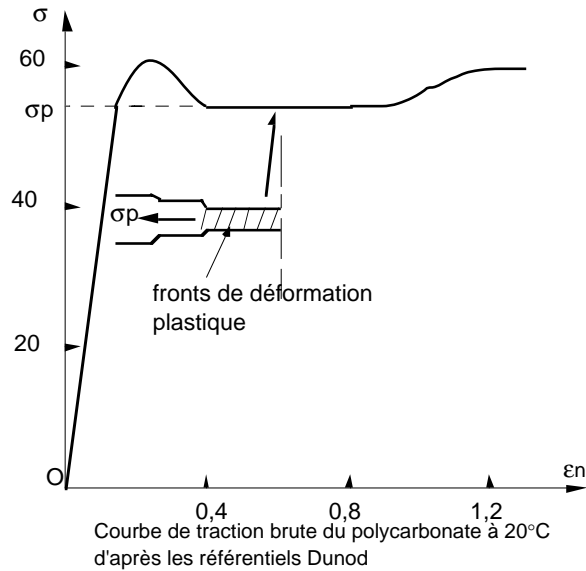
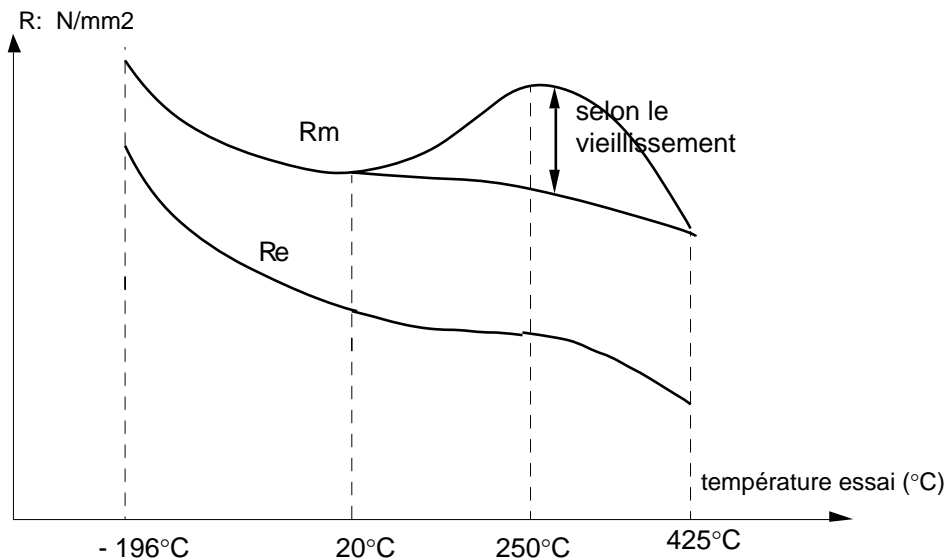


Figure 4

116 Influence de la température sur Re et Rm

Les définitions de Re ou Rm sont conventionnelles car elles dépendent de la section initiale de l'éprouvette (surtout Rm), de la qualité de l'extensomètre (Re), de la vitesse de mise en charge et de la température d'essai: ce ne sont pas des contraintes vraies.



Evolution de Re et Rm pour un acier en fonction de la température (selon L'essai de traction - Grumbach-Otua)

Figure 5

Cette évolution des caractéristiques de résistance aux basses températures sera développée au paragraphe 5

117 Effet de masse

Pour les aciers traités, un effet de masse apparaît. Il se traduit par une diminution des caractéristiques de la surface vers le coeur quand la taille des pièces augmente.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de deux aciers ayant une trempabilité respective moyenne et forte (d'après les référentiels Dunod). Les éprouvettes sont prises à 12,5 mm de la surface.

Dimension du barreau traité (en mm)	35 CD4			35 NCD16		
	Re	Rm	A%	Re	Rm	A%
d<16	80	110	11	105	135	9
16<d<40	68	100	12	105	105	9
40<d<100	57	87	14	95	95	10

118 Autres caractéristiques mécaniques: A, E, G, v; variations en fonction de la température

118-1 A: allongement à la rupture

L'allongement à la rupture est le rapport $A = 100 \cdot (l_d - l_0) / l_0$ où l_d est la longueur de l'éprouvette à la rupture en D.

118-2 E: module d'Young

La pente de la partie linéaire OA (Figure 1) représente le **module d'Young E** (en Mpa ou en GPa) ou module d'élasticité.

On appelle **loi de Hooke** la relation

$$\sigma_{\text{élastique}} = E \cdot \epsilon_{\text{élastique}}$$

La mesure de E est obtenue à l'aide d'un extensomètre.

Le module d'Young à 20°C va de 4 Mpa pour le caoutchouc à 500 GPa pour les céramiques (SiC). Cette variation importante est due aux intensités très variables des forces de liaison entre les atomes ou molécules au sein des matériaux: liaisons covalentes, ioniques.

La rigidité d'une structure en traction, compression, flexion, est proportionnelle au module d'Young.

La valeur de ce dernier, pour les matériaux isotropes, est indépendante de la direction de l'effort. Par contre, pour les matériaux anisotropes, tels les stratifiés, les composites orientés, les monocristaux, E varie avec l'orientation.

E décroît quand la température augmente : environ 10^{-4} par degré pour les métaux, les céramiques et les verres. Il varie de façon beaucoup plus importante en fonction de la température dans le cas des polymères et des composites à matrice organique.

118-3 Valeur spécifique du module

Il est intéressant d'utiliser le rapport du module et de la densité du métal. La valeur de **E/ρ est la valeur spécifique du module**: c'est un indice de performance qui tient compte de la déformation élastique et de l'allègement.

Les métaux peuvent être classées en deux catégories

- aluminium, fer, magnésium, titane (les plus performants)

$$26 < E/\rho < 27 \quad (\text{en } 10^9 \text{ N.mm.Kg}^{-1})$$

- cuivre et zinc (les moins performants)

$$14 < E/\rho < 15$$

118-4 v : coefficient de Poisson

L'éprouvette subit aussi des déformations latérales: le **coefficient de Poisson**, ou coefficient de contraction latérale dans le domaine élastique est le rapport sans dimension

$$v = (d_0 - d) / d_0$$

Ce coefficient, compris selon les matériaux entre 10^{-2} et $4 \cdot 10^{-1}$, dépend légèrement de la température.

118-5 G: module de cisaillement

Le **module de cisaillement G** ou module de Lamé ou module de Coulomb, exprimé en Mpa ou Gpa, définit le cisaillement élastique consécutif à l'application d'une sollicitation de cisaillement.

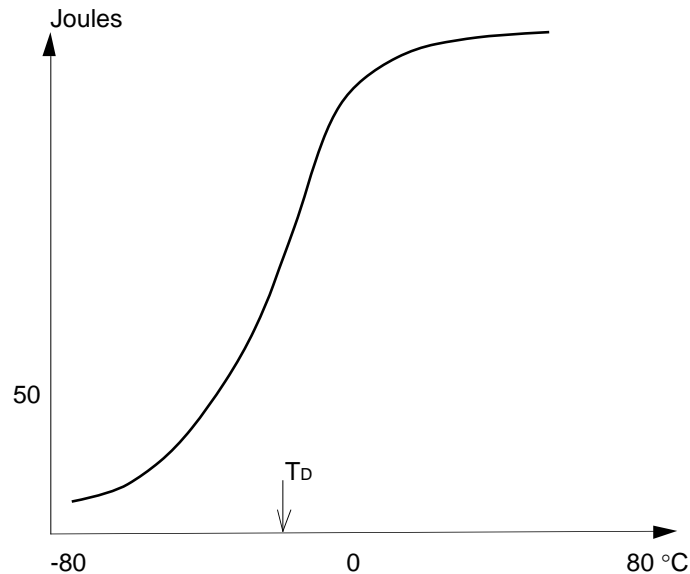
Il varie sensiblement comme E en fonction de la température et le type de matériau. Pour les matériaux isotopes, on a la relation

$$G = E / 2(1+v)$$

118-6 La résilience

On mesure l'énergie qui provoque la rupture en flexion d'une éprouvette entaillée en U ou V (**Kcu** ou **Kcv**). L'essai de **résilience** (essai Charpy) permet de déterminer la température de

transition d'un matériau qui sépare la rupture ductile, à énergie élevée, et la rupture fragile du type clivage, de faible énergie.
 Les ruptures ductiles sont fibreuses, tourmentées (déformation plastique); les ruptures fragiles sont plates ou cristallographiques.



Transition fragile/ductile. Acier 18NCD laminé.
 TD: température moyenne de transition

Figure 6:

118-7 La ténacité

C'est une caractéristique, à la base du concept de tolérance au dommage dans les structures, qui est basée sur la formulation des contraintes et déplacements au voisinage d'une fissure de géométrie connue. Le chargement est statique ou dynamique.

Ces conditions déterminent le **facteur d'intensité de contraintes K**, calculé, qui caractérise l'accroissement des contraintes et des déformations provoqué par la fissure.

La **ténacité, Kc**, est déterminée expérimentalement au moyen d'éprouvettes pré-fissurées. Elle correspond à la valeur critique de K pour laquelle se produit une propagation brutale d'une fissure de longueur a_c sous une charge P_c .

Kd est la ténacité dynamique qui correspond à la valeur critique de K sous un choc.

12 Comportement élastique des matériaux

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les matériaux métalliques et les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour les composites ou certains polymères pour lesquels le module d'Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires: ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

13 Comportement plastique

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin ont changé de place sous l'action d'un effort de cisaillement.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment des dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique.

Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car

- les dislocations interagissent entre elles
- de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions

Cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est **l'écrouissage**.

Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique: le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

14 Coefficient de sécurité

L'aptitude d'une pièce à un usage donné peut se traduire par la relation de sécurité

$$S < Li / s$$

- S est la valeur maximale admissible des contraintes qui sera définie par la suite.
- Li est l'une des limites Re, Re_{0,2} ou Rm.
- Le coefficient de sécurité s relatif à une limite donnée est toujours supérieur à 1.

Il traduit l'incertitude liée à la connaissance du matériau, dont certains aspects ont été soulignés lors des paragraphes précédents, à la détermination des efforts et au calcul des contraintes, aux conséquences résultant de la destruction de la pièce.

Pour les ouvrages stationnaires et de grandes durées de service, on prend des coefficients relativement élevés (2 à 5). Dans l'aviation, les coefficients de sécurité se déterminent à partir de la résistance limite.

On peut mettre s sous la forme suivante pour la traction si les sollicitations et la section sont constantes:

$$s = \alpha_m \cdot \alpha_e \cdot \alpha_f$$

avec

- α_m , incertitude sur l'homogénéité du matériau (1.2 pour du laminé, 1.1 pour du moulé)
- α_e , incertitude sur les caractéristiques (1.2 si on a effectué un seul essai de traction, 1 si on procède selon les normes)
- α_f , incertitude sur les charges appliquées

Si la section est variable, on voit apparaître le phénomène de concentration de contrainte au voisinage des raccords. On doit vérifier que $\sigma < S$ et que $k \cdot \sigma < Re$ avec k coefficient de concentration de contraintes.

Dans le cas de sollicitations dynamiques, on vérifie que $\sigma < S$ et que $k \cdot \sigma < \text{limite de fatigue}$

2 Métaux ferreux

21 Définitions

Les aciers sont des alliages à base de fer qui titrent moins de 2% de carbone, contrairement aux fontes qui en contiennent plus de 2%.

211 Transformations structurales : rappels

La structure du fer change avec la température. A 20°C, la structure est cubique centrée CC(fer α) A partir de 912°C apparaît la forme cubique à faces centrées CFC (fer γ). Cette forme est stable jusqu'à 1394°C où le fer redevient cubique centré (fer δ) jusqu'à la fusion à 1538°C.

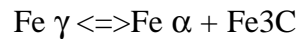
Les atomes de carbone peuvent entrer dans les espaces libres entre les atomes du fer CFC. La solubilité varie avec la température.

La solution solide de carbone dans le fer γ s'appelle **austénite**.

Celle formée dans le fer α s'appelle **ferrite** (Nota: le carbone est très peu soluble dans le fer α).

Du fait des variations de solubilité du carbone, ce dernier est mis en solution dans le fer γ , puis il se trouve rejeté sous forme de précipités de Fe_3C , ou **cémentite** lors du refroidissement. L'alliage FE/C est durci par ces carbures. Cette précipitation dépend de la température et du temps.

Le diagramme d'équilibre présente deux domaines, fer α + fer γ et fer γ + cémentite qui ont en commun un point correspondant à 727°C et 0,77% de C (en poids); un tel alliage subit à 727°C une transformation eutectoïde



Les grains de ferrite et cémentite qui se forment sont petits et étroitement liés; ils constituent un agrégat eutectoïde appelé **perlite**.

Les conditions dans lesquelles l'austénite se transforme en ferrite sont très importantes pour l'obtention des caractéristiques mécaniques des alliages.

A 727 °C, si la teneur de l'alliage FE/C est inférieure à 0,77%, l'austénite qui reste se transforme en perlite. A 20°C, l'alliage est constitué de ferrite et de perlite.

Ses propriétés sont intermédiaires entre

- la faible résistance due aux gros grains de ferrite
- la résistance plus élevée de la perlite

Si la teneur est supérieure à 0,77% de C, l'alliage à température ambiante est constitué de ferrite et de cémentite et éventuellement de perlite et de graphite: ses propriétés sont celles de la perlite fragilisée par les carbures.

Lors du refroidissement dans des conditions industrielles, qui sont hors équilibre car le refroidissement est trop rapide, le déroulement de ces transformations est perturbé et peut même être impossible.

On utilise alors un diagramme de refroidissement ou de transformation en continu (diagrammes dits TRC) qui décrit les transformations effectuées dans ces conditions.

L'austénite peut se transformer en un mélange de petits grains de ferrite et de cémentite, la **bainite**.

Il existe un domaine, au dessus de 310°C pour l'acier, dans lequel l'austénite se transforme en fer α dont la structure est déformée par les atomes de carbone n'ayant pas eu le temps de précipiter sous forme de carbures: c'est la **martensite**.

Elle donne à l'alliage sa dureté mais peut, si $C > 0,1\%$, provoquer une fragilisation de l'acier. Un revenu redonne une certaine ductilité en faisant précipiter le carbone.

Les éléments d'alliage modifient les conditions d'équilibre et les états d'équilibre.

- ils peuvent modifier la température d'apparition de la perlite et l'on distingue
 - les éléments gammagènes qui abaissent cette température (Ni, Mg)
 - les éléments alphagènes qui l'élèvent (Cr, Si, W, Ti, Mo)

- ils peuvent modifier la composition de la perlite par formation de carbures
 - en se substituant à une partie de fer de la cémentite (Mn, Cr, Mo)
 - en formant leurs propres carbures (Ti, niobium Nb, vanadium V) ou des carbures dans lesquels le fer peut partiellement se substituer à ces composants (Cr, Mo, W).

212 Classement des aciers

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères; la composition et le niveau de qualité.

Ainsi on distingue les aciers

- non alliés (<1% d'alliage)
- peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5%)
- très alliés

et, en fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers

- de base
- de qualité
- les aciers spéciaux.

Ces derniers sont placés dans trois familles

- les aciers de construction mécanique (peu ou non alliés)
- les aciers à outils (peu ou très alliés)
- les aciers inoxydables.

22 Désignation normalisée: rappels

La norme NF A 02-025 a été remplacée par la norme européenne NF EN 10-020. Les règles générales pour la désignation symbolique sont les suivantes (Yves DABIN- Matériaux - Ecole de technologie IN2P3 ou les documents AFNOR pour une désignation plus détaillée ou complète):

- aciers de base: $R_m > 690$ Mpa, $R_e > 360$ Mpa, $A\% > 26$, $C\% > 0,1$...

- aciers désignés à partir de leurs applications et caractéristiques

- une lettre indique le domaine d'application S, acier de construction, P, acier pour appareil à pression (garantie de limite élastique), E acier de construction mécanique, L acier pour tubes...
 - une valeur de la limite élastique est indiquée

- d'autres symboles correspondent à des propriétés garanties ou à des conditions de fabrication (L, emploi à basse température, Q, trempé et revenu, M, laminage thermomécanique...).
 Ex: S 355 acier de construction, $R_e > 355$ Mpa

- aciers désignés selon la composition

- aciers non alliés Mn<1% : lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par cent

Ex : C 35 (0,35% de carbone)

- aciers non alliés Mn>1% ou aciers peu alliés, aucun élément supérieur à 5%: le premier chiffre donne la teneur en C multipliée par 100. Les lettres suivantes donnent les symboles chimiques dans l'ordre des concentrations des principaux éléments. Le ou les chiffres donnent les teneurs, multipliées par 4 (Cr, Co, Mg, Mn, Ni, Si, W) ou 10 (Al, Mo, Nb, Pb, Ti, V, Cu) ou 100 (N, S, P).

Ex : 100 Cr 6 (1% de C, 1,5% de chrome)

10 Cr Mo 9 10 (0,1% de C, 2,25% de Cr, 1% de Mo)

- aciers très alliés : ils sont désignés par la lettre X, la teneur en C multipliée par 100 les principaux éléments suivis de leur teneur en %

Ex: X 6 Cr Ni 18 10 (0,06% de C 18% de chrome et 10% de nickel)

- aciers rapides : le symbole HSS est suivi des chiffres donnant dans l'ordre les concentrations (en %) en W, MO, V, Co

Une désignation simplifiée numérique existe également.

23 Avantages / Inconvénients / Comparaison

Ces alliages possèdent 2 caractéristiques favorables: leurs propriétés mécaniques sont élevées et leur prix est faible.

Par contre, leur densité de l'ordre de 7,8 est élevée et leur résistance à la corrosion est médiocre, sauf pour les aciers inoxydables.

Les performances mécaniques d'un acier dépendent

- de la teneur en carbone qui conditionne la valeur de Rm
- de sa structure qui dépend de la façon dont l'austénité formée à haute température se transforme lors du retour à la température ambiante.

231 Variations des propriétés en fonction du traitement thermique

Les propriétés mécaniques peuvent varier largement selon les conditions de réalisation des traitements thermiques (voir aussi paragraphe 117).

Par exemple pour l'acier martensitique 34 Cr Mo 4

Température de revenu	Rm (MPa)	A%
200°C	1800	5,5
400°C	1500	7
600°C	1050	13

232 Comparaison de caractéristiques mécaniques des aciers et de quelques matériaux.

Ce tableau donne *des ordres de grandeur indicatifs* à 23°C des caractéristiques de divers matériaux. Des données plus complètes sont fournies dans les paragraphes qui suivent.

	Rm (Mpa)	Re (Mpa)	E (Gpa)	ν	densité	A%
Acier ordinaire	300/1100	200/900	210	0,3	7,85	>17
Acier hautes caractéristiques	1100/1800	1000/1700	210	0,3	7,85	
Aciers inoxydables austénitiques		180/240	195	0,3	7,85	40
Alliages aluminium	200/600	100/500	70	0,34	2,8	5 / 30
Titane	650	500	110	0,34	4,5	35 / 55

Composites / fibres

	Rm (Mpa)	E (Gpa)	densité	A%
Composites C/Ep	1400	130	1,6	
Verre/Ep	1400	42	1,9	
Verre R (filaments diamètre 3 à 30microns)	4400	86	2,5	
Carbone (fibres)	2000/7000	200/600	1,8	0,4 / 1,5

Polymères

Polymères	Re (Mpa)	E (Gpa)	ν	densité	A%
Altuglas (PMMA)	60/70	3,2	0,39*	1,18	
Polycarbonate	60/75	2,3	0,38	1,2	60 / 100
Teflon (PTFE)	20/40	0,75	0,48	2,18	250 / 500
Nylon (PA 6)	85 / 60**	1,4 / 3,4	0,34	1,14	70 / 200**
PVC rigide	55	3		1,4	20 / 50

*0,35 à -20°C, 0,4 à 80°C

** humide à saturation

233 *Rapports des prix et poids*

pour une résistance égale à un effort axial (indice 1 pour une tôle en acier) selon les référentiels Dunod

	indice de prix	indice de poids
Acier inox	3,5	0,7
Alliage Al	4,4	0,5
Allage Ti	23	0,25
Céramiques		
- compression	0,4	6,5
- traction	31	58
Plastiques		
- polyester	5	1,6
- polycarbonate	10	1
Composites		
- fibres de C	10	0,06
- fibres de verre	2,5	0,2

234 Aciers/ Aciers spéciaux: caractéristiques et propriétés- soudage

234 1 caractéristiques

	Re(N/mm ²)	A%
<u>Aciers ferrito perlitiques</u>		
- Aciers de construction métallique * NF EN 10113	235 / 460*	17
- Aciers pour appareils à pression NF EN 10027 70028	235 / 460	17
- Aciers pour emboutissage et pliage à froid NF EN 10130	140 / 200	40 / 28
NF EN 10149	240 / 700	30 / 12
<u>Aciers martensitiques</u>		
- Aciers de construction mécanique NF EN 10083-1	290 / 1000	22 / 9
<u>Aciers inoxydables</u> NF EN 10088		
- martensitiques	400 / 800	10 / 20
- martensitiques + hypertrempe	520 / 1380	3 / 20
- ferritiques	240 / 700	25 / 12
- austenitiques	180 / 240	40
- austenitiques + azote 0,1 à 0,2%	270 / 350	35
- austéno ferritiques	400 / 550	15

234 2 propriétés

Le coefficient λ de dilatation linéaire est, entre 0 et 100°C, de l'ordre de 11×10^{-4} pour les aciers martensitiques et ferritiques et a pour valeur 15×10^{-4} pour les austénitiques.

La conductibilité thermique (en cal.cm/cm².s.°C) vaut 0,06 pour une nuance à 12% de chrome et descend à 0,045 pour 26% de chrome.

Le nickel diminue aussi la conductibilité pour les austénitiques (0,04 pour du 18-8, 0,033 pour du 25-20).

Les aciers ferritiques et martensitiques sont ferromagnétiques à température ambiante. La susceptibilité magnétique décroît avec la température: ils sont considérés comme étant amagnétiques à basse température.

Les austénitiques sont paramagnétiques à toute température. Ils sont susceptibles, par écrouissage, de se transformer pour partie en martensite ferromagnétique.

Les propriétés magnétiques des austéno-ferritiques dépendent de la proportion de ferrite.

24 Soudage

Avec les aciers inoxydables, tous les procédés suivants peuvent être employés: arc avec électrodes enrobées, sous atmosphère gazeuse (TIG, MIG), bombardement électronique, automatique sous flux, laser, induction. Le brasage est possible en général avec une brasure à l'argent.

Les aciers ferritiques sont en général soudables sans précaution particulière.

Les martensitiques sont sensibles à la fissuration car autotrepants: les nuances à C<15% sont soudées industriellement. Celles de type Fe Cr nécessitent un pré-chauffage et un recuit après soudage.

Les austénitiques sont en général correctement soudables. Il peut se produire des fissures à chaud dues aux contraintes de bridage.

Les austéno-ferritiques sont particulièrement bien soudables.

Des risques sont liés au soudage:

- fissuration à chaud des structures austénitiques (due à la présence d'impuretés créant des zones à bas point de fusion) au dessus de 1250°C..
- fragilisation par grossissement de grain des dépôts ferritiques au dessus de 1150°C
- fragilisation par formation de phases intermétalliques entre 500 et 900°C pour des éléments d'addition tels le molybdène (>5%).
- fissuration à plus de 400°C des cordons martensitiques.

25 Renseignements pratiques complémentaires

Le CETIM (Centre technique des industries mécaniques) a développé une méthode de choix des aciers en fonction de la nature des sollicitations et des facteurs métallurgiques.

CETIM service diffusion 52, Av. Felix Louat 60304 Senlis Tél. : 03 44 67 32 21

OTUA (Office technique pour l'utilisation de l'acier)

Cet organisme professionnel donne des informations sur l'acier, son emploi dans tous les domaines, les méthodes de mise en oeuvre. Il publie de nombreux documents, en particulier des *dossiers techniques* donnant les caractéristiques des principales nuances.

OTUA 19 Le Parvis La Défense 4 Cedex 35 92072 Paris la Défense Tél. : 01 47 67 86 63

Ouvrages:

Peyre - Tournier : Le choix des aciers CETIM informations 1981

Peyre – Tournier : Choix des traitements thermiques superficiels Coll 'Matériaux en mécanique' CETIM

Rabey - Philbert : Bases de choix des aciers de construction mécanique Otua 1973

Otua - Cetim : Conseils aux mécaniciens pour la préparation et la rédaction des clauses techniques d'une commande d'aciers de construction Document technique 1981 Otua

AFNOR Tour Europe Cedex 7 92080 Paris la Défense

AFNOR Recueil de normes « les produits sidérurgiques » tomes 1 3 5 1988

Lacombe Baroux Beranger : Les aciers inoxydables Les éditions de physique, Les Ulis 1990

Les aciers inoxydables Propriétés, mise en oeuvre, emploi Tec et Doc Lavoisier 1990

Handbook of stainless steels Mc Graw Hill

Techniques de l'ingénieur - Métallurgie - Mise à jour permanente

3 Alliages d'aluminium

31 Généralités

L'aluminium est utilisé pour

- sa faible masse spécifique de 2,7 Kg/dm³
- sa résistance à la corrosion
- sa bonne conductivité thermique de 237 W/m.K
- sa faible résistivité électrique 0,026 μΩ.m à 20°C

Pour un emploi en mécanique, on fait appel à des alliages définis par les critères suivants:

- l'aluminium est l'élément dominant
- la teneur totale en masse des éléments d'alliage dépasse 1% (Fe+Si>1%, Cr, Cu, Mg, Mn, Ni, Zn >0,1%)

Le durcissement est obtenu par écrouissage ou par précipitations de composés intermétalliques formés à partir des éléments d'alliage et réalisées par traitement thermique.

L'addition de 5% de Si augmente E de 3000N/mm². Les valeurs classiques de E et ν sont données au tableau 1.

32 Désignation normalisée :rappels

La normalisation prévoit deux types de désignation basées sur la composition chimique.

321 Désignation numérique(NF EN 573-1)

Derrière les quatre lettres EN AW, on trouve quatre chiffres:

- le premier indique le groupe d'alliage; **1** si Al >99%, **2** Al + Cu, **3** Al + Mn
4 Al + Si, **5** Al + Mg, **6** Al + Mg + Si, **7** Al + Zn, **8** Al + autres éléments.

- le deuxième est égal à 0 s'il s'agit du métal d'origine et peut prendre les valeurs de 1 à 9 si l'alliage présente des particularités.

- les 2 derniers chiffres ont une signification si c'est un aluminium non allié (2 premières décimales de la teneur minimale en aluminium). Si on a un alliage, ils servent à différencier les nuances d'un même groupe.

Ex: EN AW-1098 (99,98% d'Al) EN AW-4045 (10% de Si)

322 Désignation alphanumérique (NF EN 573-2)

On distingue

- l'aluminium non allié.

La désignation comprend le symbole Al suivi de la teneur minimale du métal (%)

Ex: EN AW-Al 99,98 (au moins 99,98% d'Al) correspond à EN AW-1098

- les alliages.

Le symbole Al est suivi des symboles des éléments d'alliage puis de la teneur moyenne arrondie en % des éléments.

Ex: Al Si2 Mn (1,8% de Si, 0,9% de Mn) correspond à EN AW-4015

Pour une désignation complète, voir les documents de l'AFNOR ou le cours de Y DABIN.

33 Durcissement

Il s'effectue

- par *écrouissage*: ce sont les alliages des séries 3*** et 5***

Comme pour nombre de métaux, l'écrouissage des alliages d'aluminium augmente sa dureté, sa limite élastique et la charge de rupture mais diminue le A%.

- par *traitement thermique*: séries 2***, 6*** et 7***

Le traitement thermique consiste en un chauffage à température suffisamment élevée pour permettre la mise en solution totale des éléments d'addition, un refroidissement assez rapide par trempe à l'eau à 20°C (état de 'trempe fraîche') et un durcissement par mûrissement (ou maturation ou vieillissement naturel) à température ambiante pendant plusieurs semaines ou un revenu entre 100 et 200°C de 5 à 24 heures

331 Caractéristiques obtenues

	Re 02 N/mm ²	A%
- écrouissage		
3*** et 5*** écroui	40 / 150	18 / 30
3*** et 5*** écrouissage important	180 / 400	3 / 5
3*** et 5*** écrouissage important et réchauffage de restauration	140 / 200	5 / 8
- traitement thermique		
série 2*** trempe et mûrissement	160 / 330	20 / 24
série 2*** trempe et revenu	300 / 420	10 / 13
série 6*** trempe et mûrissement	130 / 210	18 / 28
série 6*** trempe et revenu	200 / 360	10 / 17
série 7*** trempe et revenu	320 / 620	5 / 12

Pour *certaines alliages*, un léger écrouissage augmentant les caractéristiques est fait entre la trempe et le revenu: ainsi l'alliage 2024 passe de 370 à 430 N/mm² avec un écrouissage intermédiaire de 2%.

34 Etats métallurgiques

La norme NF EN 515 définit la désignation des états métallurgiques

- état recuit : symbole O
- état écroui : symbole H
- état obtenus par traitement thermiques T (avec de nombreuses variantes)

35 Influence de la température

A chaud, on utilise surtout les alliages de la série 2*** (jusqu'à 250°C). A 150°C, Re est divisé par 2.

Les alliages d'aluminium à basse température ne présentent pas de risque de rupture fragile. La résistance et le A% augmentent : pour la série 5***, la limite d'élasticité augmente de 15 à 20% de 20 à -196°C et l'allongement à la rupture, pour la même variation des températures, augmente de 50% (voir paragraphe 4).

36 Soudage

Le soudage peut être employé avec les séries 1***, 3***, 4***, 5***, 6*** et sur certains alliages de la série 7***.

Il demande une absence d'oxygène. Les procédés TIG, MIG, plasma, laser et faisceau d'électrons peuvent être utilisés. Le produit d'apport choisi doit éviter les risques de fissuration à chaud.

Le brasage sous flux est réservé aux séries 1***, 3***, 5*** et à quelques alliages de la série 6***.

37 Renseignements pratiques complémentaires

Chambre syndicale de l'aluminium et de ses alliages
30 av de Messine 75008 Paris Tél. : 01 45 63 02 66

Institut français des technologies de l'aluminium (institut de formation)
Tour Manhattan Cedex 21 92087 Paris la Défense Tél. : 01 46 91 40 13

Aluminium Pechiney
Immeuble Balzac 92048 Paris la Défense Cedex Tél. : 01 46 91 46 91

Pechiney Rhénalu
Tour Manhattan 92087 Paris la Défense Cedex Tél. : 01 46 91 46 67

Alusuisse France 89600 Saint Florentin Tél.: 03 86 43 56 00

Softal
Tour Manhattan 92087 Paris la Défense Cedex Tél. : 01 46 91 52 01

Guide de l'acheteur:
Aluminium Métaux non ferreux Répertoire des fournisseurs
Editions SIRPE 76, rue de Rivoli 75004 Paris Tél. : 01 42 74 40 48

4 Matériaux polymères

41 Généralités

Un **polymère** est un enchaînement de groupes organiques identiques appelés monomères. Un **monomère** est une suite d'atomes de carbone liés entre-eux et avec d'autres éléments (H, N, Si, Cl...).

On distingue les **homopolymères**, répétition d'une unique structure moléculaire et les **copolymères**, répétition de plusieurs structures différentes.

Ils sont classés en deux catégories: les thermoplastiques et les thermodurcissables.

411 Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont constitués de chaînes ramifiées, ont un point de fusion et comportent deux classes: les amorphes, sans ordre moléculaire, et les cristallins. Le changement d'état solide/liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois avec une perte de caractéristiques à chaque cycle.

Les **amorphes** n'ont pas d'ordre apparent (structure semblable à un liquide) et pas de température de fusion précise mais présentent une phase de ramollissement. Ils sont caractérisés par un faible retrait, une tenue au choc, une tenue dimensionnelle et une résistance au fluage. Les PS, ABS, PMMA, PC, PSU, PVC ..(voir la signification des abréviations au paragraphe 46) sont des amorphes.

Les **cristallins** ont une structure ordonnée dans une matrice amorphe. Le taux de cristallinité donne l'importance de la structure cristalline dans l'ensemble de la matière. Ce taux dépend de la matière et du refroidissement lors du moulage. Ils ont une bonne tenue à la fatigue, un faible coefficient de frottement, une bonne tenue chimique. On peut noter, parmi les cristallins, les PE, PET, PBT, PA, POM, PTFE...

Des alliages de thermoplastiques sont développés par les sociétés: ABS/PC, Acétal/élastomère, polyamide/élastomère, PBT/PET, PET/élastomère, PC/polyester, ABS/PA, ABS/PC ...

411 Les thermodurcissables :

Les thermodurcissables ont leurs macromolécules orientées dans l'espace dans les trois directions. Il n'y a pas de point de fusion.

Le moulage est obtenu à l'aide d'un agent réticulant, d'un catalyseur ou d'un durcisseur. En général, ils sont plus rigides que les thermoplastiques, résistent mieux au fluage et se prêtent au moulage de grandes pièces avec des fibres courtes, longues ou tissées.

Les principales familles sont les polyester, les phénoliques, les époxydes, les aminoplastes.

42 Avantages et limites

Les avantages sont

- une bonne résistance aux agents chimiques
- une mise en forme facile
- une densité faible

Les limites principales sont les suivantes:

- des propriétés mécaniques faibles, sauf pour les composites à matrice organique
- une limitation de l'utilisation à une température limitée (100 à 200°C)

43 Caractéristiques

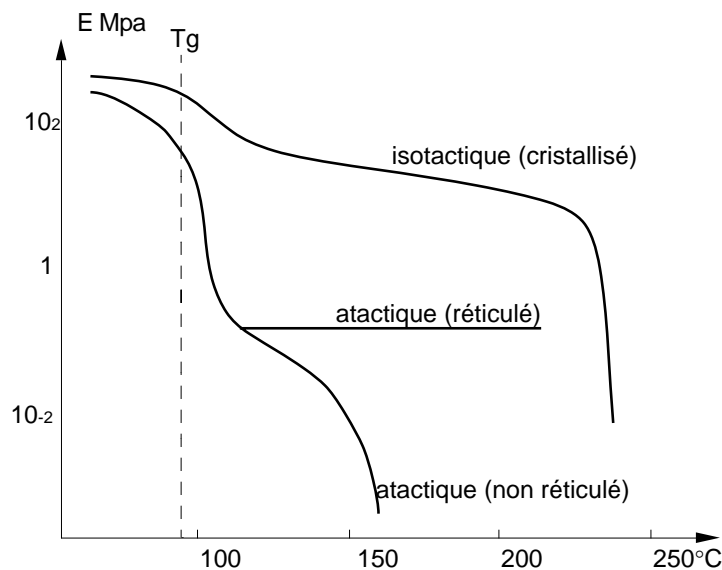
On distingue les polymères de grande diffusion (PVC, PMMA, Polyuréthane, résines thermodurcissables, styrènes et polyoléfinés..) et les polymères techniques ou de spécialité qui possèdent de meilleures qualités (polyamides, PC, polyacétals, polyimides, alliages de polymères et polymères renforcés de fibres..).

Les caractéristiques des polymères découlent de leur structure atomique et notamment de l'existence de chaînes réticulées.

Certaines familles de polymères présentent à la fois les caractéristiques des thermodurcissables et des thermoplastiques, comme le polyuréthane ou le polyimide.

La densité est globalement comprise entre 0,9 et 2 pour les thermoplastiques et 1,1 et 2 pour les thermodurcissables, leur résistance à la traction (Mpa), entre 20 et 800 (composites/fibres longues), leur module (Gpa) entre 1 et 100 (UD HM). Leur prix massique est élevé (10 F/Kg pour les PP - PVC à plus de 100 F/Kg pour les PEEK - EP/carbone).

Les caractéristiques des polymères se dégradent quand la température s'élève. Il existe une, ou des températures de transition de phase qui correspondent à des changements d'arrangement moléculaire: les caractéristiques sont alors sensiblement modifiées.



Tg: température de transition vitreuse pour laquelle la viscoélasticité décroît fortement
réticulation: polymérisation en blocs 3 dimensions augmentant la rigidité

Figure 6: E du polystyrène en fonction de la température

Pour les applications à **haute température** (température en service continu >150°C), on choisit souvent les thermoplastiques cristallins (PPS, PEEK, PEK..) ou amorphes (PES, PEI..)

La température d'utilisation continue des PES est de 190°C.
Elle est de 180°C pour les PEI.

Pour les matériaux cristallins

- Les PPS ont une température de fusion de 275°C. Les températures de transition sont de 112, 263 et 180°C.
- Les PEEK fondent à 334°C et les transitions se passent à 142, 315 et 250°C.
- Les PEK fondent à 365°C et les transitions sont à 156 et 357°C.

Outre le problème de la température, certains polymères vieillissent sous l'action des UV par rupture des liaisons C=O, C=C, C-H, O-H, en atmosphère avec O₂ ou O₃ par attaque lente

(fragilisation) ou interaction avec des solvants organiques, chlorés ou oxygénés, en milieu aqueux. Au froid, ils se rigidifient (voir paragraphe 5). Des fissurations sous contrainte ou en présence de solvants (PMMA, polystyrène, PPO, PSU) peuvent apparaître.

Nous allons essentiellement donner les caractéristiques des principaux polymères techniques et de spécialité: les polyesters, polyamides, polycarbonates, polyacétals, polyphénylène, polyimides (kapton). Les alliages de polymères et les polymères renforcés de fibrilles (fibres < 1 mm) ou de fibres ne seront pas traités.

Les caractéristiques doivent être pratiquement vérifiées expérimentalement au cas par cas, les données étant souvent indicatives.

Celles qui suivent sont généralement obtenues à partir des référentiels Dunod ou du Précis des matières plastiques (Afnor).

431 Polyesters: PET et PBT.

A) *Propriétés d'usage*

Le PBT est fortement cristallin (60%) alors que le PET peut se trouver à l'état amorphe (transparent) ou partiellement cristallin (30%). On l'utilise dans cet état où sa résistance à la traction et au déchirement sont très bons.

Sa température de transition vitreuse est basse (73°C) et ses propriétés sont fortement affectées lors de ce passage.

Le PBT donne une grande rigidité, une bonne tenue au fluage et en fatigue, de bonnes propriétés de frottement et une dureté élevée. Il présente une bonne tenue thermo-mécanique (surtout au fluage à chaud) s'il est renforcé de fibres de verre.

La mise en oeuvre se fait par moulage - injection.

Les propriétés sont données au tableau suivant

Propriétés des polyesters:

Propriétés	Unités	PET amorphe	PET orienté	PET cristallin	PBT	PBT +30% FV
masse volumique	g/cm ³	1,3		1,39	1,31	1,66
contrainte au seuil écoulement	Mpa	80	200 250	60	52	120
A%	%	3 300	5 10	90	5 250	2 3
E	Mpa	2000	6000 9000	2500	2700	9000
Résistance choc Izod entaillé	KJ/m ²	20			5	6
T fusion	°C	255	255	255	225	225
Tg	°C	73	73	73	60	60
T fragilisation	°C	- 40			- 40	
T résistance continu	°C	70	100	100	100 200	145 190
Retrait	%	0,1		1 2	1,5 2	
Conductibilité	W/m.K	0,3			0,21	0,24

B) Applications

Automobile: PET alternateurs, ventilateurs, poignées - PBT phares, éléments d'allumage

Electroménager: PBT poignées, boutons

Construction électrique: petites pièces précises de grande stabilité dimensionnelle; barrettes, broches de connexion

C) Commercialisation (selon les producteurs: voir 46, documentation)

PET: Amite, Mylar, Rhodester, Hostadur, Melinex de chez Akzo, DuPont, Rhône Poulenc, Hoechst, ICI

PBT: Deroton, Pocan, Tenite, Ptmt, Ultradur, Vestodur, Hostadur de ICI, Bayer, Eastman, Dynamit, Basf, Hüls.

432 Polyamides

Ce sont des polymères amorphes ou, pour la plupart d'entre-eux, semi-cristallins dont la formule chimique a :

- un seul groupement amide -(CO-NH)- qui se répète; ainsi avec 6 carbones, on a le PA6. On aura de même le PA11 ou le PA12

- deux groupements qui sont présents dans la répétition (PA6,6, PA4,6, PA 6-10 ou 6-12)
Il y a des copolymères (ex: PA6-66) où les proportions du mélange conditionnent les caractéristiques mécaniques. Certains de ces copolymères servent de colles thermofusibles.
Il existe des alliages avec des élastomères pour augmenter la résistance aux chocs.

La mise en oeuvre se fait essentiellement par injection. L'extrusion donne des feuilles ou des tubes. Le collage se fait à l'aide de solvants ou de vernis adhésifs. Le soudage par ultrasons convient bien aux PA. Les méthodes par frottement ou infrarouges sont utilisables.

A) Propriétés d'usage

La fonction amide est hydrophile: la reprise d'eau provoque une baisse de la température de transition vitreuse, donc une diminution de la fragilité, une diminution forte du module et affecte la stabilité dimensionnelle.

Aussi, les propriétés mécaniques sont données le plus souvent à sec et après 24 heures à 23°C dans une atmosphère de 50% d'humidité relative (HR).

On classe les polyamides en fonction de leurs propriétés mécaniques et physiques

- stabilité dimensionnelle: mauvaise pour les PA à forte teneur en groupes amides PA6, 46, 66, 610, 612.

Ce sont des semi-cristallins translucides à opaques de densité 1,13 g/cm³

La reprise en eau de ces PA abaisse le Tg. Les caractéristiques mécaniques sont données pour des éprouvettes à 23°C à sec et pour 50% d'humidité relative (HR 50). La prise d'eau augmente le volume (PA non chargé: 1% d'eau en masse augmente le volume de 0,9%). Les PA610 et 612 ont une meilleure constance des propriétés en atmosphère humide.

La résistance aux rayonnements ionisants est très moyenne. Les formules chargées en fibres de verre résistent mieux (20 à 30 Mrad).

On obtient une bonne stabilité dimensionnelle pour les PA11 et 12 qui ont des propriétés voisines. Les caractéristiques de ces deux PA ne présentant pas de défaut marqué: bonne stabilité en température, résistance au fluage et à la pression, bonne résistance chimique, à la fissuration sous contrainte, aux chocs à basse température, coefficient de friction faible et résistance à l'abrasion élevée.

La masse volumique (1,02) et la reprise d'eau sont les plus faibles des PA. Ils sont isolants et peuvent être antistatiques. La résistance à la corrosion électrolytique est excellente. Le coefficient de poisson est 0,41.

Les rayonnements ionisants ont une action faible (10 Mrad pour une épaisseur de 0,1 mm, 40 Mrad pour une gaine épaisse)

Il existe des tissus de fibre de verre imprégnés de PA12 (Vestopreg de Hüls).

- renforcés au choc par alliage avec des phases élastomères (PA 6, 66, 11, 12..).

- tenue en température: PA semi-aromatiques ayant une température de fusion ou de transition vitreuse plus élevées que les PA précédents: PA6-6T, PPA, MXD6, 6T/X.

Ils sont semi-cristallins et l'un de leurs éléments est une molécule aromatique. Ils sont normalement livrés chargés de fibres de verre ou de charges minérales. La masse volumique dépend de la charge. Tg et le point de fusion n'en dépendent pas. Les caractéristiques mécaniques dépendent de l'humidité.

Les variations dimensionnelles des produits chargés (dues au fluage, à l'humidité, pour un même % de charge) sont plus faibles que pour les PA aliphatiques.

Le PPA existe en qualité choc. Les PPA ont des propriétés autoextinguibles.

Il existe des PA transparents qui sont des polymères amorphes contenant des éléments aromatiques tels le PA 63T (T: acide téréphtalique) ou qui sont mélangés avec des PA semi cristallins ayant comme désignation TRG (les trogramid) ou GRL (grilamid). Ces matériaux ont de bonnes propriétés mécaniques et résistent beaucoup mieux que les PA amorphes aux agressions chimiques. Le Tg dépend de la composition et peut atteindre 200°C. E et la contrainte sont peu affectés par l'immersion dans l'eau: ils sont utilisés dans les installations hydrauliques transparentes.

Les PEBA (Polyéther bloc amides) sont des thermoplastiques dans lesquels les PA cristallisent et forment des zones dures empêchant le fluage du polyéther. Ils couvrent un domaine très grand de dureté. Leurs propriétés mécaniques sont données en fonction de la dureté. Cette dureté diminue de 30 points shore D entre -60 et 80°C.

La résistance chimique est meilleure pour les duretés élevées.

La densité est faible. La reprise d'humidité dépend des types de zones de PA et PE.

Les PEBA ont une résistance superficielle de $10^{13}\Omega$. La rigidité électrique va de 25 à 35 kV/mm.

La température d'utilisation doit être $> -60^\circ\text{C}$ (Tg du PE).

Les propriétés mécaniques des différents PA sont données ci - dessous

Propriétés des polyamides sans charges ni renforts: (valeurs à sec / HR 50)

Propriétés	Unités	PA6		6		66		66		6/66
		basse viscosité		haute viscosité		basse viscosité		haute viscosité		
masse volumique	g/cm ³	1,13		1,13		1,13		1,13		1,13
contrainte au seuil écoulement	Mpa	85	40	90	45	85	50			80 45
A% à 23°C	%	4,5	20	4	20	5	20			> 50
E traction	Mpa	3200	1000	3200	1100	3000	1100	3200	1600	3200 1100
Résistance choc izod à 23°C	KJ/m ²	5,5		7,5/ 10		5,5/ nr		6/ nr		6/ nr
T fusion	°C	222				260				218

nr: pas de rupture

Propriétés	Unités	66 / 6	11	612	PEBA	Dureté shore D	
					42	55	69
masse volumique	g/cm ³	1,13	1,04	1,06	1,01	1,01	1,02
contrainte: au seuil rupture traction	Mpa Mpa	85 45	47 42	140 75	36	44	52
A% à 23°C - 40°C	%	4 20	280 230 40	4 6,5	450	500	420
E traction	Mpa	3200 1100	1800	2700 1750	50	145	
Résistance choc izod à 23°C à - 30°C	KJ/m ²	6 nr	nr 6	4 6 5 4,3	nr	nr	
T fusion	°C	243	160	218	120 à 210 °C		

nr: pas de rupture

Propriétés des polyamides chargés FV:

Propriétés	Unités	PA6	18%	6	50%	66	20%	66	50%	66/6	20%
masse volumique	g/cm ³	1,24		1,56		1,29		1,57		1,29	
contrainte rupture	Mpa	140	75	225	150	145	100	250	170	140	85
A% à 23°C	%	4	6,5	2	3	4	5	2	2,5	4	8
E traction	Mpa					7300	5300	16000	12500	7000	4500
Résistance choc	KJ/m ²	8	16	17	29	7	13	14	18	8	15

Propriétés physiques des polyamides semi - aromatiques non chargés:

Propriétés	Unités	MXD 6	PPA	6 6T	6T X
masse volumique	g/cm ³	1,14	1,12	1,18	1,18
fusion	°C	236	312	298	260 à 330
Tg à sec	°C	90	135	100	
à 100% HR	°C		40		

Propriétés de polyamides semi - aromatiques chargés:

Propriétés	Unités	MXD 6	PPA	PA6 6T	PA 6T X
charge FV	%	50	45	35	50
masse volumique	g/cm ³	1,64	1,56	1,44	1,64
reprise eau	%	1,55	0,12	1	1
Contrainte rupture traction	Mpa	190	225	200	240
A% à 23°C	%	1,8	2	3	2
E traction	Gpa	17		3,5	18,5
flexion		17	14,5		
Résistance choc izod à 23°C	KJ/m ²	100	100	180	

B) *Applications*

Elles dépendent de la formulation des produits (plastifié, chargé, renforcé, ignifugé, antistatique, anti UV)

Automobile: pales, capotages, enjoliveurs, poignées, grilles, mécanismes de sièges...

Industrie: engrenages, capotages, connecteurs..

Bâtiment: chevilles de fixation, pieds de sièges.

Sport: semelles, raquettes de tennis, selles de bicyclette, jantes de roues de vélo..

Agriculture: réservoirs, irrigation..

Alimentaire, médical: gaines, emballages, films, seringues, prothèses articulaires..

Aéronautique: flexibles, réservoirs d'huile, profilés intérieurs (non feu).

C) *Commercialisation*

Les principaux producteurs sont EMS, DuPont, DSM, BASF, Nyltech, Hüls.

Les principaux produits ont pour désignation:

- PA6: Grilon, Minlon, Ultramid, Zytel
- PA66: Grilon T, Minlon, Technil A, Ultramid A, Zytel
- PA 6/66: Technyl B, Ultramid C
- PA 610 Ultramid S
- Pa 612 Vestamid D, Zytel

Pour le PA12, ce sont le Rilsan, Vestamid, Grilamid d'Elf Atochem, Hüls , EMS.

Le PPA est diffusé sous la marque Amodel (Amoco), le PA 6 6T est l'Ultramid (BASF) et le 6T X est le Grivory d'EMS.

Les PEBA se trouvent sous les marques Pebax d'Elf et Vestamid de Hüls.

433 Polycarbonates

Le PC -polycarbonate- est un polyester de l'acide carbonique. C'est un polymère amorphe, dur, à haut poids moléculaire. Il est livré en standard ou renforcé de fibres de verre.

A) *Propriétés d'usage*

Ils présentent une rigidité et une dureté élevées, une très bonne tenue aux chocs et une grande tenacité E (>2300 Mpa) varie peu avec la température. Sa reprise en humidité est très faible. Sa résistance à l'abrasion est inférieure à celle des PA.

La plage d'utilisation va de -150 à 135°C. Il existe des PC hautes températures qui sont des copolyesters (biphénols) diffusés par Bayer (KU1-9331, 9351, 9357, 9371).

C'est un très bon isolant thermique qui possède de bonnes propriétés diélectriques. Il se charge électrostatiquement: ceci peut être évité par un lavage avec des lessives.

Ils sont extrudés ou obtenus par moulage/injection. Ils se collent et se soudent facilement et permettent de concevoir des assemblages par clipsage.

Le tableau qui suit donne les caractéristiques des PC.

Propriétés des polycarbonates:

Propriétés	Unités	PC injection	PC transparent	PC 20% FV	PC 30% FV	PC 40% FV
masse volumique	g/cm ³	1,2	1,24	1,35	1,43	1,52
transmission lumière	%	88	88			
contrainte au seuil écoulement	Mpa	63	60			
rupture à 23°C	Mpa	67	67	100	140	160
A% à 23°C	%	110	110	4	4	4
E	Mpa	2400	2400	5600	6700	9800
Résistance choc	J/m	640		105	107	
T fusion	°C	230 250				
Tg	°C	150	150	150	150	150
T fragilisation	°C	- 25	- 25			
T résistance continu	°C	115 125	110 125	120 130	120 130	120 130
Retrait	%	0,5 0,7	0,4 0,6	0,2 0,5	0,2 0,3	0,1 0,3
Conductibilité	W/m.K	0,2	0,2	0,21	0,21	0,22
coeff dilatation	°C ⁻¹	6,7x10 ⁻⁵	6,6x10 ⁻⁵	2,7x10 ⁻⁵	2 à 2,5x10 ⁻⁵	1,7x10 ⁻⁵

B) Applications

Elles sont nombreuses: construction, pharmacie et médical, matériel de protection, automobile, électronique, cinéma, bureau, éclairage, décoration...

C) Commercialisation

Les principales marques sont: Makrolon, Lexan, Sinvet, Calibre de Bayer, GE plastics, Enichem et Dow chemical.

434 Polyacétals

Les polyacétals -POM- sont des thermoplastiques cristallins. Ils peuvent être des homopolymères ou des copolymères injectés ou extrudés et sont stabilisés contre l'action des UV. Il existe des POM chargés en téflon (PTFE) ou en bisulfure de molybdène pour abaisser le coefficient de frottement. Ils peuvent être chargés en poudres, en billes de verre pour obtenir une dureté plus élevée, ou en fibres de verre pour une meilleure rigidité et tenue à température élevée. Des nuances renforcées aux chocs existent.

A) Propriétés d'usage

Les POM sont très cristallins. Ils sont opaques et absorbent peu l'humidité. Leur intervalle de fusion est étroit. Le coefficient de dilatation à température ambiante est 8 fois celui des métaux. Par rapport aux polyamides, ils sont plus rigides entre 50 et 120°C. La tenue au fluage est bonne. Le *coefficient de poisson* est de 0,35. La dureté à la bille (ISO 2039) décroît linéairement de 200 à 60 Mpa entre -20 et 120°C. Les propriétés électriques sont bonnes.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des POM.

Propriétés des polyacétals:

Propriétés	Unités	Homopolymère	Homopolymère choc	Copolymère	Copolymère Choc	Copolymère FV
masse volumique	g/cm ³	1,42				
contrainte au seuil écoulement	Mpa	71	58	62	35	
A% au seuil	%	8 25	30	8,5 10	14	
E	Gpa	3		2,6	1,5	7
Résistance choc Izod entaillé	KJ/m ²	5 12	80	7	20	4,5
T fléchissement sous charge à 1,8 MPa	°C	110	70	100	55 75	160

B) Applications

L'automobile: bouchons, essuie glaces, valves, charnières, pales..

Mécanique: engrenages, paliers et cames

Les loisirs, la manutention (tapis, palettes, chaînes, convoyeurs), la plomberie (robinets, valves, lavabos, filtres..) constituent d'autres domaines d'application.

C) Commercialisation

Homopolymères: Delrin de DuPont

Copolymères: Ultraform de BASF, Hostraform, Kematal de Hoechst

435 Polyphénylènes

Les PPO sont livrés en standard modifié avec le PS choc, le polymère pur étant impossible à mettre en oeuvre, renforcés par des fibres de verre, ou ignifugés Le PPO modifié est amorphe et non transparent..

Ils sont mis en oeuvre par moulage-injection, extrusion ou thermoformage.

A) Propriétés d'usage

Les PPO absorbent peu l'eau.

Ils possèdent une excellente tenue en température et stabilité dimensionnelle entre -40° et 120°C.

Les propriétés électriques sont bonnes, ainsi que les propriétés mécaniques: E est élevé, la résistance au fluage est excellente et la résistance au choc est bonne. Le coefficient de frottement est élevé (0,4).

Le PPO peut être soudé par ultrasons ou par friction. Il peut être collé dans de bonnes conditions avec de l'époxy.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des PPO.

Propriétés des polyphénylènes:

Propriétés	Unités	PPO	PPO 30% FV
masse volumique	g/cm ³	1,06	1,27
contrainte au seuil écoulement	Mpa	55	120
A% seuil / rupture	%	7 / 50	- / 3
E	Mpa	2500	9000
Résistance choc	J/m	200	80
T fusion	°C	280 310	280 310
Tg	°C	210	210
T résistance continu	°C	90	
Retrait	%	0,5 0,7	0 0,4

B) *Applications*

Industries électriques, électronique: interrupteurs, boîtiers, contacteurs..
Electroménager: calandres, armatures, récipients..

C) *Commercialisation*

La marque est le Noryl de GE

436 Polyimides

Ces polymères sont classés selon deux types et appartiennent à la catégorie des polymères résistant à haute température.

Nous connaissons en particulier le film Kapton, de type 1, le plus ancien.

Ce type (PI) est obtenu par frittage d'une poudre sous pression et à température élevée. Il n'est pas possible de le modifier ensuite, les températures de ramollissement et de décomposition étant proches.

Le type 2, plus récent, inventé par la NASA, est un thermoplastique qui se transforme par injection ou extrusion. Depuis les années 80, une société japonaise en possède la licence.

A1) *Propriétés d'usage types 1 – 2*

Le type 1 est amorphe même si pour le cas du film, une certaine cristallinité se produit lors de l'étirage. Le PI non chargé a une densité de $1,43 \text{ g/cm}^3$.

Le coefficient de poisson est de 0,41.

Le coefficient de dilatation est, de 20 à 260°C, de 30 à 50 10^{-6} selon le matériau (norme ASTM D 696)

Après immersion à 23°C, l'absorption d'eau est de 0,2%.

Le taux de dégazage est faible au dessous de 260°C pour un produit desséché ($10^{-10} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$)

Le PI a

- une bonne stabilité dimensionnelle et une résistance au fluage
- un domaine d'utilisation allant de la cryogénie à 480°C (290°C en continu)
- une bonne résilience (43 J/m sur éprouvette entaillée: norme ASTM D 256)
- une résistance à l'usure, une conformabilité assurant l'étanchéité sans déformation

permanente

Sous radiation, il y a perte <1% en poids pour 100 Mrads de γ et <2% pour cette dose avec des électrons.

Les propriétés électriques sont bonnes.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des PI.

Propriétés des polyimides type 1:

Propriétés	Unités	23°C	260°C
Résistance en traction	Mpa	86	41,5
flexion	Mpa	110	62
A% rupture	%	7,5	6
E	Mpa	3100	1700
Masse volumique	g/cm ³	1,43	
Conductivité à 40°C	W/m.K	0,35	
T fléchissement charge de 2 MPa	°C	360	

Le type 2 (New TPI)

Il est semi-cristallin, sauf pour les pièces moulées qui sont recuites pour avoir une cristallinité allant jusqu'à 45%. Il peut être standard ou chargé.

Les qualités chargées le sont

- par des fibres de verre (FV 30% pour module élevé ou usages électriques)
- par fibres de carbone (FC 30%: résistance mécanique élevée, peu abrasif)
- par du graphite G ou des fibres aramide (A 40%: faible coefficient de friction, peu abrasif)
- par des polymères fluorés F, pour un faible coefficient de friction

Pour ce matériau, la résistance chimique, la tenue en température et le module sont meilleurs.

Il a une densité de 1,33 g/cm³ non chargé. L'absorption d'eau est de 0,24% pour le non chargé et < 0,1 pour les chargés (en 24 h à 23°C et 60% d'humidité relative).

La résistance aux γ et aux électrons est excellente (12000 Mrad).

La mise en oeuvre est obtenue par moulage/injection, extrusion.

Propriétés des polyimides type 2:

Propriétés	Unités	PI	PI	PI	PI	PI
		non chargé	30% FC	20% F	25%G	40%G
masse volumique	g/cm ³	1,33				
contrainte	Mpa	94	233	73	59	92
A%	%	90	2	6	6	2
E 23°C	Mpa	3000				
Résistance choc	J/m	90	110	140	60	60
Tg	°C	250				
T fusion	°C	388				
T flexion sous 1,8 MPa	°C	238				

B) Applications

type 1

- paliers, coussinets, joints, sièges de vannes, segments de pistons, engrenages, pièces de moteurs de transmission, déflecteurs de torches à plasma

type 2

- pièces mécaniques de précision, industrie électrique et électronique, gainage de câbles
- automobile
- films et fibres, matrice de composites

D) Commercialisation

type 1

La marque est Vespel SP-1, 3, 21, 22, 211 DuPont

type 2

Ce sont de vrais thermoplastiques fournis en 3 qualités (haute, basse fluidité et standard). La marque est Aurum.(Mitsui Toatsu Chemicals)

A2) Propriétés des films

La base chimique est du type 1. L'épaisseur va de 25 à 125 µm. En plus des polyimides, on trouve des sandwichs en résine fluorée PEP/PI/FEP.

Les films sont des produits amorphes, translucides de couleur ambrée. L'indice de réfraction est 1,78. La masse volumique est 1,42 g/cm³. La chaleur spécifique est 1090 J/ kg.K

Ils ne fondent pas. La température de transition vitreuse est mal définie et varie entre 360 et 410°C. On peut les utiliser de 4°C à 400°C. La conductivité thermique varie de 0,15 à 0,19 W/ m.K entre 23 et 300°C.

Le retrait résiduel est de 0,3% à 250°C et, selon l'épaisseur, de 1,5 à 3,5 % à 400°C. La valeur du coefficient de dilatation a ensuite pour valeur $20 \cdot 10^{-6}$ à température ambiante.

L'absorption d'eau est de 2,9% après immersion de 24 H. A 23°C, et avec 50% HR, elle est de 1,3%.

Le coefficient de poisson est de 0,4. L'endurance au pliage est de 10000 cycles (norme ASTM D 2176 63 T).

La résistance à la traction est indépendante de l'épaisseur et du sens. Elle atteint 165 Mpa à 23°C. L'allongement est de 70%. Après 1000 h à 300°C, la résistance passe à 125 Mpa et l'allongement à 20%.

La résistance aux radiations est très bonne.

Les caractéristiques électriques dépendent de l'épaisseur du film.

La température et la fréquence modifient ces valeurs: la résistivité passe ainsi de 10^{16} à $10^{10} \Omega m$ entre 0 et 300°C.

Le tableau qui suit donne des caractéristiques mécaniques des films entre -196 et 200°C.

Propriétés des films standard (entre -195°C et 200°C) :

Température	Unités	-196	23	200
Résistance rupture en traction	Mpa	240	172	117
A% rupture	%	2	70	90
E	Gpa	3,6	3	1,86

B) Applications

Ce sont les isolants avec un domaine en température étendu: rubans pour câbles, supports de circuits imprimés souples, isolants de transformateurs, protection en milieu agressif ou ionisant...

D) Commercialisation

Ils sont produits sous la marque Kapton. H, V ou F (DuPont)

44 Vieillessement sous radiations

Quelques indications ont été données dans les paragraphes qui précèdent. Rappelons d'abord que le rad (rd) est l'absorption d'une énergie de 0,01 J sous forme de rayonnement pour un élément de 1 kg.

Les polymères se dégradent ou se réticulent sous l'effet des rayonnements selon leurs structures moléculaires. Les structures linéaires se réticulent (polystyrène..) alors que les structures ramifiées (époxy, PC..) se dégradent.

La présence de noyaux benzéniques améliore la tenue aux radiations.

- la réticulation produit des ponts entre les chaînes linéaires conduisant à des structures tridimensionnelles du type thermodurcissable. Le poids moléculaire augmente fortement et le thermoplastique ne fond plus à sa température normale et peut être insoluble dans ses solvants habituels.

- la dégradation provoque des ruptures de chaînes et le poids moléculaire diminue.

La présence d'oxygène accélère la dégradation par formation de groupements peroxydiques. A partir de 5 Mrd, la dégradation des polymères est notable.

Les polystyrènes, époxydes et polyimides sont les plus résistants.

Pour le polystyrène, qui se colore en jaune à faible dose, la tenue mécanique est conservée jusqu'à plus de 20 Mrd. Son irradiation dans le vide crée un matériau insoluble à structure tridimensionnelle.

Le polystyrène choc perd la moitié de sa tenue au choc à 230 Mrd.

Le polycarbonate se rigidifie jusqu'à 2 Mrd puis ses propriétés mécaniques diminuent rapidement à partir de 10 Mrd.

Les époxydes se dégradent à partir de 100 Mrd.

Les propriétés électriques augmentent à faible dose, sont maximales pour quelques Mrd puis diminuent.

45 Critères de sélection

Il est nécessaire de choisir le matériau et de déterminer parallèlement sa mise en oeuvre car des différences importantes de caractéristiques peuvent apparaître.

Voici une liste récapitulative de fonctions et les matériaux qui y sont généralement associés (d'après Conception de pièces mécaniques en plastique - CETIM).

Structure mécanique

- *primaire: pompes, transmissions, hélices, châssis..*

Acétal, polyamide, PC, Polyamide-imide, polyester, PEEK, polyimide, PPS, polysulfone, composites renforcés..

- *secondaire: capotages...*

ABS, PMMA, polyéthylène, polypropylène, PC, polyamide, PPO, PVC, polystyrène, composites renforcés..

Pièces de grande dimension

ABS, PPO, polycarbonate, polyester (PET, PBT), polystyrène, polyuréthane, polyéthylène (haute densité), polypropylène, composite renforcé..

Optique

PMMA, PC, polystyrène, polysulfone, polyéthersulfone, PET, certains époxydes et polyesters...

Pièces frottantes

Acétal, polyamide, polyimide, polyuréthane, polyéthylène, fluorés..

Facilement usinables

Acétal, polyamide, PC, PMMA, celluloses

Pièces soudables

PVC, polyéthylène, polypropylène et les thermoplastiques

Tenue thermomécanique

polyfluorés, polyimides, PEEK, PPS..

Tenue aux chocs

Polyuréthane, PC, polyéthylène basse densité, polyamide..

Imperméabilité aux gaz

Vinylés, PET, fluorés.

Films

Polyéthylène, polypropylène, polyimide, polyamide, PC, PVC, cellulosiques, fluorés, styréniques.

46 Renseignements pratiques complémentaires

Ouvrages:

CETIM:

Guide des matières plastiques en mécanique

Les matériaux composites

Conception de pièces mécaniques en plastique et composite

Afnor:

Précis de matières plastiques

éd ENSAM Paris, J Verdu

Vieillessement des polymères

Documentation:

La liste des marques et des distributeurs est disponible (annuaires France plastiques et France composites) au CEPP, 25 rue Dagorno Paris 75012 Tel: 01 43 47 30 20

Plastiques techniques; calcul, conception, applications Hoechst

Guide de sélection Rhône Poulenc

Fiches techniques: Elf-Atochem, Total-Cray Valley, Bayer, Basf, Huls..

Informations techniques: Du Pont

Abréviations

ABS:	acrylonitrile butadiène styrène
CA	acétate de cellulose
CN	nitrate de cellulose
PA 6, 66..	polyamide 6, 6.6..
PAI	polyamideimide
PC	polycarbonate
Pebd, Pehd	polyéthylène basse, haute densité
PAEK, PEEK, PEK..	polyaryléthercétone (P E K)
PES	polyéther sulfone
PI	polyimide
PIB	polyisobutylène
PMMA	polymétacrylate de méthyle
POM	polyoxyméthylène
PP	polypropylène
PPO	oxyde de polyphénylène
PPE	oxyde de polyphényléther
PPS	polysulfure de phénylène
PS	polystyrène
PSU	polysulfone
PTFE	polytétrafluoréthylène
PU	polyuréthane

PVC	polychlorure de vinyle
SAN	styrène acrylonitrile
SB	polystyrène choc
SI	silicone

5 Utilisation aux basses températures

Un petit nombre de matériaux est utilisable pour la construction de structures cryogéniques.

Les alliages métalliques qui ont le meilleur comportement sont à structure cubique face centrée: aciers austénitiques ou alliages d'aluminium. Le comportement mécanique d'un métal dépend, aux basses températures, de sa structure cristalline.

Les matériaux composites à matrice polymère sont par contre des isolants thermiques. Leurs propriétés mécaniques évoluent moins vite à basse température que celles des métaux. En choisissant les fibres de renfort et la texture, on peut optimiser le composite en fonction des besoins.

51 Evolution des propriétés à basse température

Certaines indications ont déjà été données précédemment: c'est la limite élastique qui dépend le plus de la température.

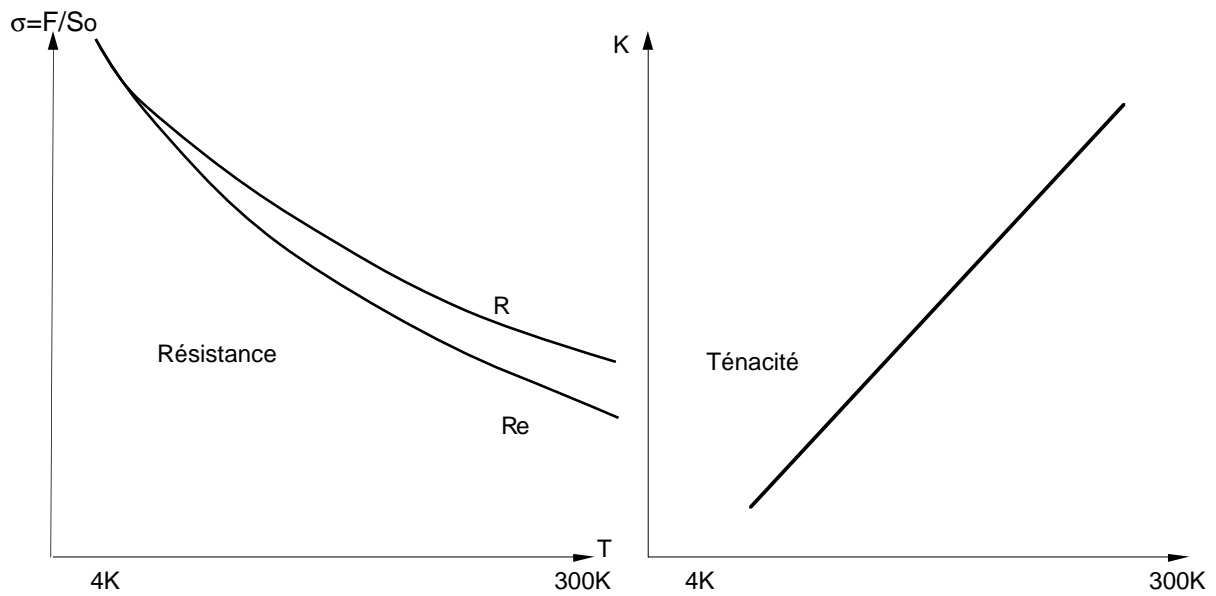
Plus précisément, les propriétés visco-plastiques et élastiques changent complètement à basse température. Le module d'Young augmente pour les alliages et les composites renforcés par des fibres longues minérales unidirectionnelles. La variation est beaucoup plus importante pour les polymères.

La limite élastique augmente mais il y a réduction de la résilience et de la ténacité. Le durcissement des alliages est lié à la réduction de la déformation plastique et à la moindre mobilité des dislocations.

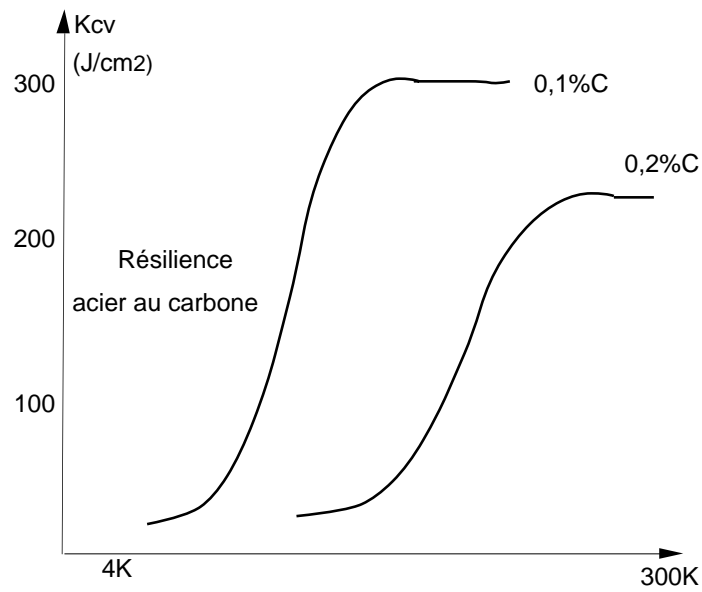
Les alliages deviennent fragiles, très fragiles même pour les métaux cubiques centrés, et restent bons conducteurs de la chaleur.

La résistance à la fatigue est modifiée à cause de l'augmentation de R_e . La limite d'endurance, le seuil de fissuration et la résistance à la fissuration sont améliorés.

Les figures 7 8 9 donnent, en fonction de la température, le type de variation généralement constatée pour les aciers pour σ , K, Kcv.



Figures 7 – 8



Figures 9

Les aciers, les alliages d'aluminium, les composites et certains polymères peuvent être utilisés à température cryogénique.

Les paragraphes qui suivent donnent quelques indications complémentaires.

511 Les aciers

- Les aciers de construction **ferritiques** classiques sont peu utilisés aux basses températures à cause du risque de rupture fragile.

Les aciers à 3% de Ni peuvent être utilisés jusqu'à une température de 170 K.

Les aciers à 9% de Ni, traités pour être à structure **martensitiques** avec 10 à 15 % d'austénite résiduelle, peuvent être utilisés jusqu'à 100 K. Ils peuvent être soudés avec un préchauffage.

- Les aciers **austénitiques** inoxydables Fe Cr Ni ou Fe Cr Mn peuvent être employés jusqu'à quelques degrés K, donc avec l'hélium liquide.

Leurs caractéristiques mécaniques peuvent être améliorées par addition d'azote: à 4 K, le 304 LN a une limite élastique de 900 Mpa et le 316 LN, de 1300 Mpa. Une teneur élevée en Ni améliore la tenue à la fatigue de ces aciers.

Ils ont cependant tendance à prendre une structure martensitique sous l'effet des basses températures et des déformations, ce qui entraîne une résilience plus faible et un changement des propriétés magnétiques. Il faut donc choisir des nuances stables chargées en Cr, Mo, Ni

512 Les alliages d'aluminium

Ils peuvent être utilisés jusqu'à quelques K et sont légers, ductiles, tenaces, stables. Les alliages 2219, 2090 (600 Mpa de résistance à 4°K) et 7020 donnent les meilleurs résultats. Ils sont cependant délicats à souder. Ils peuvent être collés pour des assemblages métal-métal ou métal-composite résistant à basse température.

513 Les composites

- Les matrices polymères **thermoplastiques** utilisées pour les composites à basse température présentent une résistance qui augmente et une ductilité qui diminue. Ils doivent être utilisés avec précaution (voir paragraphes précédents).

- Les **thermodurcissables** sont plus stables aux température cryogéniques. La résistance à la traction d'une résine époxy double entre 300 et 4 K. La ductilité est de l'ordre de celle des thermoplastiques.

Les polymères ont une résistance mécanique faible, sont fragiles, ont un coefficient de dilatation important, mais leurs caractéristiques magnétiques et leur conductibilité faibles sont des facteurs positifs à basse température.

Pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques, on renforce la matrice par des fibres à haute performance;

- Le verre E ou S (les plus utilisées car isolantes et de faible coefficient de dilatation)

- Les fibres en carbone. Elles sont plus chères mais présentent une très faible dilatation et E est plus élevé que pour le verre.

- Les fibres d'aramide (Kevlar) concurrencent le verre. Elles ont de meilleures propriétés en traction et de moins bonnes en compression.

- Les fibres de bore sont très chères. Elles ont une bonne résistance en compression.

Pour les **composites unidirectionnels**, E augmente de 10% dans la direction longitudinale des fibres, entre 300 et 4 K (sauf pour le Kevlar).

La résistance en traction augmente de 50%, beaucoup moins que pour les métaux.

Le module E et la résistance varient beaucoup plus dans la direction transversale.

La résistance à la fatigue est améliorée et la résilience est beaucoup moins affectée que celle des métaux et des polymères.

Il est possible d'arriver à une optimisation par un choix correct des fibres et matrice mais ceci demande *une compétence particulière*.

52 Renseignements pratiques complémentaires

Le cours de S BUHLER (Ecole IN2P3 de technologie) donne, en plus des caractéristiques mécaniques, les valeurs de conductivité thermique, de résistivité électrique, de coefficients de dilatation...

Une bibliographie très complète est également fournie.

6 Tableaux de synthèse

Polymères techniques, doses limites, dureté des matériaux

Propriétés des polymères techniques pour des usages hautes performances

	Unités	PA semi aromatique	P-Amides	P-Carbonates	P-Sulfones	P-Etherimides	P-Esther cetones	P-Imides	P-Amideimide	P-Benzimidazole
		PPA-MXD 6	6 et 66	PC	PSU	PEI	PEEK	PI	PAI	PBI
Propriétés Physiques										
		<i>Tous les paramètres de ces matériaux sont donnés pour des polymères non chargés</i>								
Masse volumique	Kg/m3	1,43 chargé 30%	1,13	1,25	1,24	1,27	1,31	1,43	1,4-1,61	1,3
Temp fusion	°C	236-312	222-260	230-250			334	Pas de fusion		Pas de fusion
Temp transition vitreuse	°C	90-135		150	187	220	143	250	275	400
Reprise d'eau (sous 50% HR)	%	1,95	2,5-3,5	0,2-0,4	0,3	0,1-0,5	0,14-0,2	0,2		?
Indice de refraction moyen	-				1,63		non	non	non	non
Nb d'Abbé (dispersion chromatique)	-	?	32	30	22		-	-	-	-
Propriétés Mécaniques										
Contrainte au seuil	MPa		85-40	60			Pas de seuil	Pas de seuil	Pas de seuil	Pas de seuil
Allongement au seuil	%		4,5-20	7			-	-	-	-
Temp max service continu	°C	135		135	140	170	250	290	230	345
Temp min service continu	°C			-150	-100		-60	-220	-196	?
Traction a temp ambiante										
Contrainte rupture	MPa	153		67	70	85	140	86	192	159
Allongement à la rupture	%	2,4		>110	20-80	60	>50	7,5	15	3
Module traction a 23°C	GPa	9,7	3,2	2,43	2,5	2,9	3,6	3,3	4,9	5,9
Flexion à l'ambiante										
Rupture	MPa	230			106	160		110	244	?
Module	GPa	9	2,8	2,43	2,7	3,2	4,1	3,1	5	?
Coeff de Poisson					0,37			0,41	0,45	
Choc Izod entaillé à 23°C	KJ/m-2	60	5,5	6,4	5-7		5-10		14,2	2,7
HDT à 1,8 MPa	°C	228-280	65	140	164-171	180-210	160-230	360	278	430
Coeff de frot à 20°C sur lui-meme							0,2-0,3			0,2-0,3
Tenue au rayonnement										
Dose pour une baisse de 50%	Gy	>1E+06			bon?			>5E+07	1,00E+07	
Propriétés Thermiques										
Conductivité thermique	w/m °C			0,2	0,26		0,25	0,35	0,26	0,4
Chaleur spécifique	KJ/Kg.°C							1,13	0,8-1,5	
Coeff de dilatation	°C-1		7-8E-05	6,60E-05	5,50E-04		25-50E-06	30-55E-06	3,00E-05	2,30E-05
Perméabilité aux gaz à 20°C										
O ₂	mm3/m.Mpa				894					
H ₂	mm3/m.Mpa				6990					

Ixef 1 Ertalon 3 Axxis 3 Udel 2 Ultem 7 Ketron 3 Vespel 4 Torlon 2 Celazole 3
Amodel 2 Nylatron 3 Makrolon 8 Ultrason 5
Trogamid 6 Lexan 7
Apec HT 8

- | | | | |
|---|----------------------------------|---|----------------|
| 1 | Solvay SA | 12 cours Abert 1er, 75383 Paris cedex 08 | |
| 2 | Amoco | Miniparc du chêne, 12c rue du 35e régiment d'aviation, 69500 Bron | |
| 3 | DSM Engineering Plastic Products | ZI St Jean, rue René Desgrand, BP 17069608 Villeurbanne cedex | www.dsmepp.com |
| 4 | Dupont de Nemours France | 137, rue de l'université, 75334 Paris cedex 07 | www.dupont.com |
| 5 | BASF France | 49, Avenue Georges Pompidou, 92593 Levallois-Perret | |
| 6 | Hüls France SA | Tour Horizon 52, qual de Dion-Bouton 92805 Puteaux cedex | |
| 7 | GE Plastics France | ZI de St Guénault BP 67, 91002 Evry cedex | |
| 8 | Bayer France | 49-51, qual de Dion-Bouton, 92815 Puteaux cedex | |

Doses limites

Classification of materials and components
according to the dose range up to which they may typically be used.

Materials	Upper dose limit in Gy = 100 rad	Materials	Upper dose limit in Gy = 100 rad
Acrylic scintillator Butyl rubber Electronics components (active) Optical fibre Perfluoro ethylene-propylene (FEP) Phenolic resin, unfilled Polyacryl (Plexiglas) Polyamide (Nylon) Polyester resin, unfilled Silicone oil Silicone rubber Teflon (PTFE) Viton	$10^2 - 10^4$ 5×10^4 $10^2 - 10^3$ $10 - 10^2$ 5×10^4 10^4 10^5 1×10^5 5×10^4 5×10^5 5×10^5 10^3 $1-2 \times 10^5$	Araldite B (epoxy resin) Araldite F (epoxy resin) Epikote (epoxy resin) Epoxy Novolac Epoxy resin, aromatic hardener Glass-fibre reinforced EPR-hoses Mineral oil Paints based on epoxy or polyurethane resins Polyimide resin Special radiation resistant lubricants Special radiation resistant motors	$1-2 \times 10^7$
Araldite D (epoxy resin, cured at ambient temperature) Chlorosulfonated PE (Hypalon, CSP) Cross-linked PE (XLPE) Ethylene-acrylate rubber (EAR) Ethylene-propylene rubber (EPR) Ethylene vinyl acetate (EVA) Flamtrol (polyolefin) Halar (CTFE) Hytrel (PETP copolymer) Lupolen (PE) Polychloroprene (Neoprene) Polyolefin Polyvinyl chloride (PVC)	$1-2 \times 10^6$	Cerium-doped glass Ryton (PPS) Inorganic filled resins: - Epoxy, aromatic hardener - Phenolic - Polyester - Polyimide - Polyurethane - Silicone	1×10^8
		Aluminium oxide Magnesium oxide Magnetic materials Metals Mica Glass fibre Quartz	$> 10^8$

*) Use of these materials in radiation areas is not recommended or to be used with precautions.

Dureté des matériaux

