



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail
DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

**RÉSUMÉ DE THÉORIE
&
GUIDE DES TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE
N°: 22**

MATERIAUX ET TRAITEMENTS



SECTEUR : FABRICATION MECANIQUE

SPECIALITE : TFM

NIVEAU : T

Document élaboré par :

Nom et prénom

NICA DORINA

CDC GM

DRIF

Révision linguistique

-
-
-

Validation

- ETTAIB Chouaïb
-
-

OBJECTIF DU MODULE**MODULE 22 : MATERIAUX ET TRAITEMENTS****Code :****Durée : 30 h****OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT****COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit **utiliser les matériaux métalliques et plastiques (nuances et demi-produits) courants du commerce et déterminer le(s) traitement(s) approprié(s) en fonction de l'usage envisagé** selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONDITIONS D'ÉVALUATION

- Travail individuel
- À partir :
 - de consignes et directives
 - du cahier des charges
- À l'aide :
 - de normes ;
 - de formulaires, abaques et diagrammes;
 - d'une bibliographie technique de référence ;
 - de catalogues fournisseurs ;

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Respect de la normalisation
- Utilisation correcte de la terminologie
- Connaissance exacte des différents matériaux
- Choix correct du matériau
- Connaissance adéquate des procédés
- Choix correct du Traitement envisagé
- Souci du rapport qualité / prix

(à suivre)

OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT (suite)

PRÉCISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Décrire les procédés d'élaboration des métaux et des principaux demi-produits disponibles dans le commerce	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation appropriée de la terminologie - Identification des propriétés physico-chimiques des matériaux métalliques - A décrit correctement les procédés d'élaboration des fontes, aciers et alliages ferreux et non ferreux
B. Utiliser les désignations normalisées des métaux, matière plastique et des demi-produits	<ul style="list-style-type: none"> - Respect de la normalisation - A utiliser des désignations commerciales de certains matériaux
C. Déterminer une nuance et un demi-produit en fonction de l'application envisagée	<ul style="list-style-type: none"> - Choix correct du matériau - Souci du rapport qualité / prix
D. Déterminer un traitement thermique en fonction des spécifications demandées	<ul style="list-style-type: none"> - Sélection du traitement thermique en fonction d'une application donnée - A déterminer correctement, à partir d'abaques ou de manuels, le processus de trempe d'un acier donné.
E. Déterminer un traitement de surface en fonction des spécifications demandées	<ul style="list-style-type: none"> - Sélection du traitement de surface en fonction d'une application donnée
F. Décrire les procédés d'élaboration, d'emploi et de mise en œuvre des matières plastiques et de leurs demi-produits couramment disponibles dans le commerce	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation adéquate des plastiques - Connaissances suffisantes pour dialoguer avec un spécialiste

OBJECTIFS OPÉRATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE DOIT MAÎTRISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR ÊTRE JUGÉS PRÉALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

Avant d'apprendre à décrire les procédés d'élaboration des métaux et des principaux demi-produits disponibles dans le commerce. (A) :

1. Identifier les propriétés physico-chimiques des métaux, alliages ferreux et non ferreux.

Avant d'apprendre à utiliser les désignations normalisées des métaux, matière plastique et des demi-produits (B) :

2. Connaître la symbolisation chimique et métallurgique.

Avant d'apprendre à déterminer une nuance et un demi-produit en fonction de l'application envisagée (C) :

3. Identifier les propriétés mécaniques des matériaux.
4. Réaliser des essais mécaniques.
5. Identifier les critères de choix des matériaux.

Avant d'apprendre à déterminer un traitement thermique en fonction des spécifications demandées. (D) :

6. Avoir une idée sur les conditions d'emploi des pièces mécaniques.
7. Décrire les divers types de traitements thermiques en précisant pour chacun d'eux :
 - les transformations métallurgiques provoquées.
 - les conséquences sur les caractéristiques des métaux.
 - les conditions de leur mise en œuvre et du contrôle des résultats obtenus.

Avant d'apprendre à déterminer un traitement de surface en fonction des spécifications demandées. (E) :

8. Décrire les divers types de traitements de surface habituellement rencontrés dans l'industrie de la mécanique.
9. Indiquer les conditions de leur mise en œuvre et du contrôle des résultats obtenus
10. Avoir des notions de corrosion en milieu industriel.

Avant d'apprendre à décrire les procédés d'élaboration, d'emploi et de mise en œuvre des matières plastiques et de leurs demi-produits couramment disponibles dans le commerce. (F) :

11. Connaître les propriétés physico-chimiques des plastiques.

MATERIAUX ET TRAITEMENTS

SOMMAIRE

MATERIAUX ET TRAITEMENTS

CHAPITRE 1

<i>MATERIAUX. GENERALITES</i>	8
I. Métaux.....	9
II. Polymères ou matières plastiques.....	11
III. Céramiques.....	12
IV. Matériaux composites.....	14
V. Matériaux nouveaux.....	15

CHAPITRE 2

<i>ESSAIS DES MATERIAUX</i>	16
I. Définitions préliminaires.....	16
II. Essai de traction.....	17
III. Essai de résilience.....	21
IV. Essai de dureté.....	23
V. Essai de fluage.....	27
VI. Essai de fatigue ou d'endurance.....	28
VII. Extensiométrie électrique, photoélasticité, vernis craquelants.....	31

CHAPITRE 3

<i>METAUX FERREUX. ASPECT METALLURGIQUE</i>	35
I. Alliage fer-carbone	35
II. Diagramme fer-cémentite	36
III. Aciers au carbone.....	37
IV. Traitements thermiques dans la masse.....	38
V. Influence des éléments d'addition.....	44

CHAPITRE 4

<i>ACIERS ET FONTES</i>	46
I. Aciers non alliés.....	46
II. Aciers faiblement alliés, pour haute résistance	49
III. Aciers fortement alliés.....	52
IV. Fontes.....	53

CHAPITRE 5

<i>METAUX NON FERREUX</i>	57
I. Etats métallurgiques	57
II. Aluminium et alliages.....	58
III. Cuivre et alliages	62
IV. Magnésium et alliages.....	65
V. Zinc et alliages.....	66

CHAPITRE 6

<i>MATIERES PLASTIQUES ET ELASTOMERES</i>	67
I. Propriétés générales et structures.....	68
II. Thermoplastiques.....	72
III. Thermodurcissables.....	74
IV. Elastomères ou caoutchoucs.....	74

CHAPITRE 7

<i>TRAITEMENTS DE SURFACE</i>	77
I. Traitements thermiques de surface.....	77
II. Traitements électrolytiques.....	80
III. Métallisation.....	82
IV. Dépôts particuliers.....	82
V. Revêtements organiques ; peintures et vernis.....	83

<i>ANEXE : Structures micrographique d'un acier inoxydable attaqué chimique</i>	88
----------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	89
-----------------------------------	-----------

1

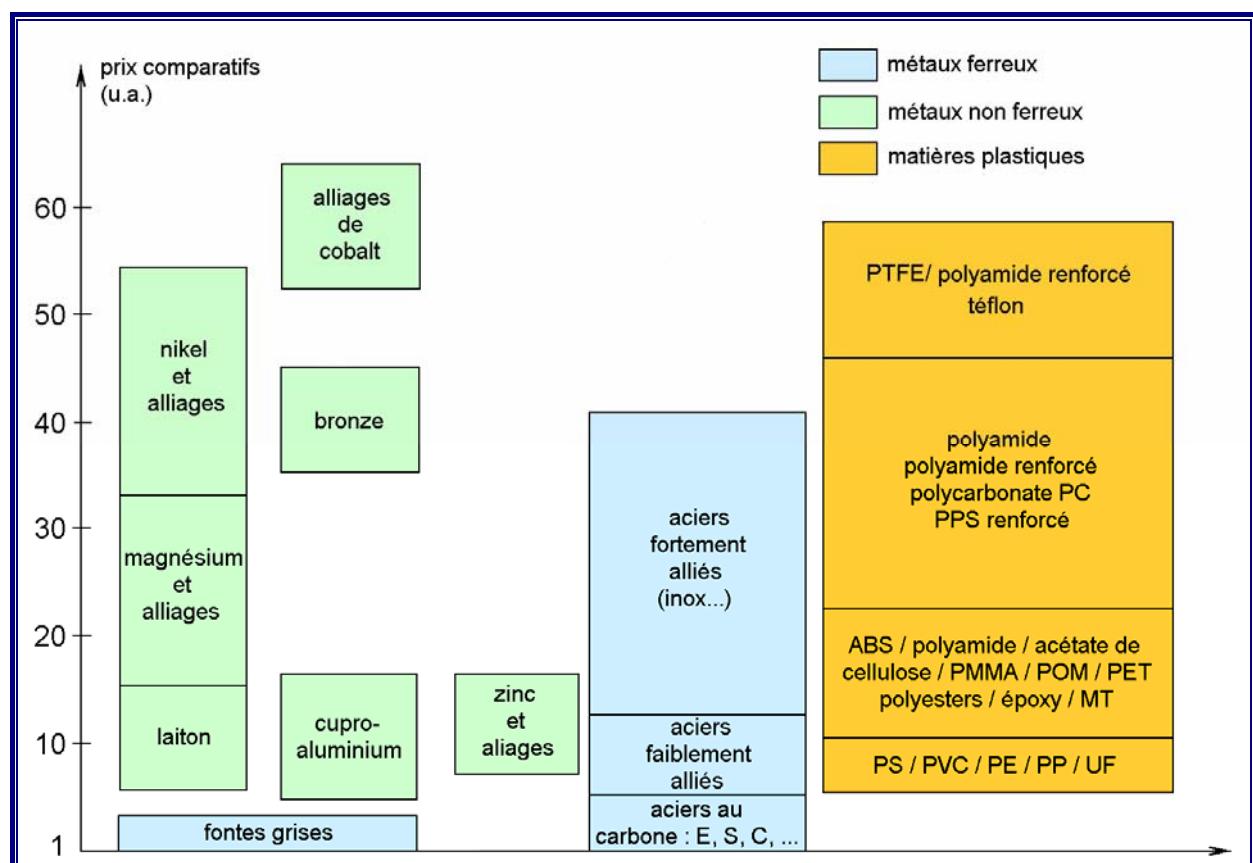
MATÉRIAUX. GÉNÉRALITÉS

OBJECTIFS

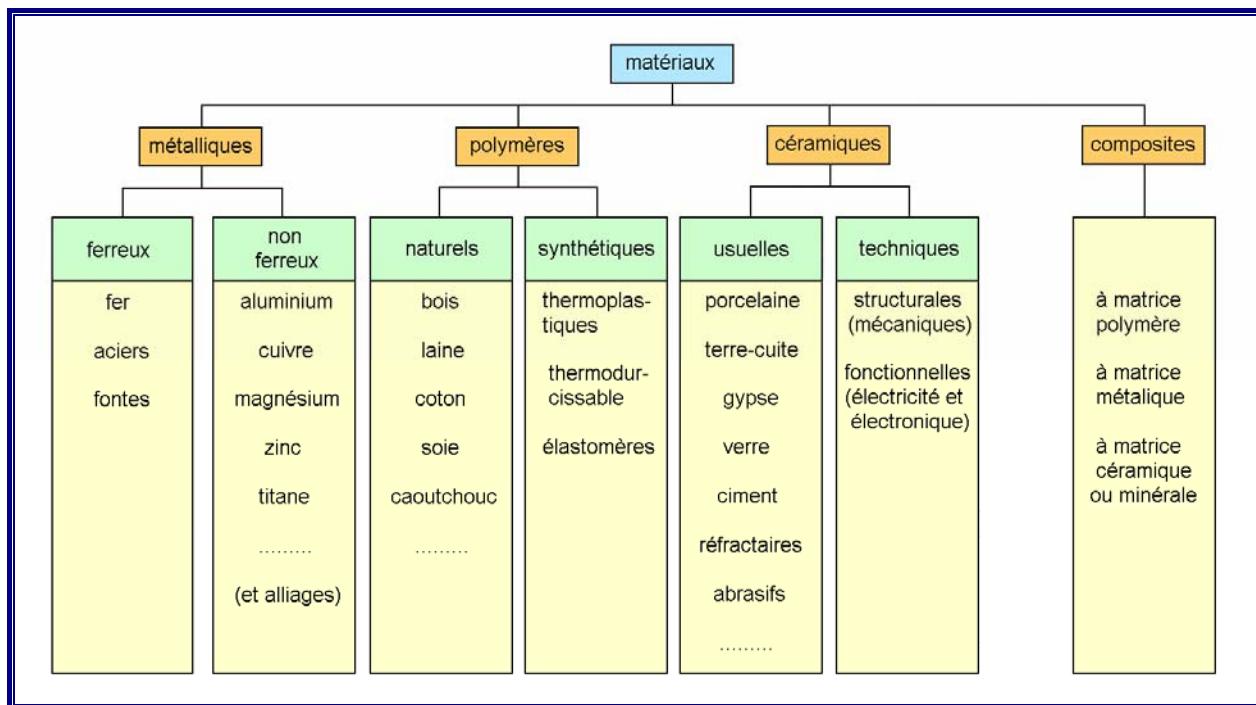
- Présenter les principaux matériaux industriels (métaux, matières plastiques, céramiques et composites).
- Indiquer les propriétés générales des deux principales familles (métaux et matières plastiques).
- Donner quelques notions sur les céramiques et les matériaux composites.

Les matériaux sont à la source de la technologie et du monde industriel. La réussite technique et le succès commercial d'un produit fabriqué dépendent en grande partie du ou des matériaux choisis.

Selectionner un matériau n'est généralement pas une opération simple compte tenu de la grande variété proposée. Le choix dépend autant du prix que des qualités propres du matériau et du procédé de fabrication retenu pour la réalisation. La sélection est le plus souvent effectuée en équipe, client et concepteur étant associés aux techniciens de fabrication.



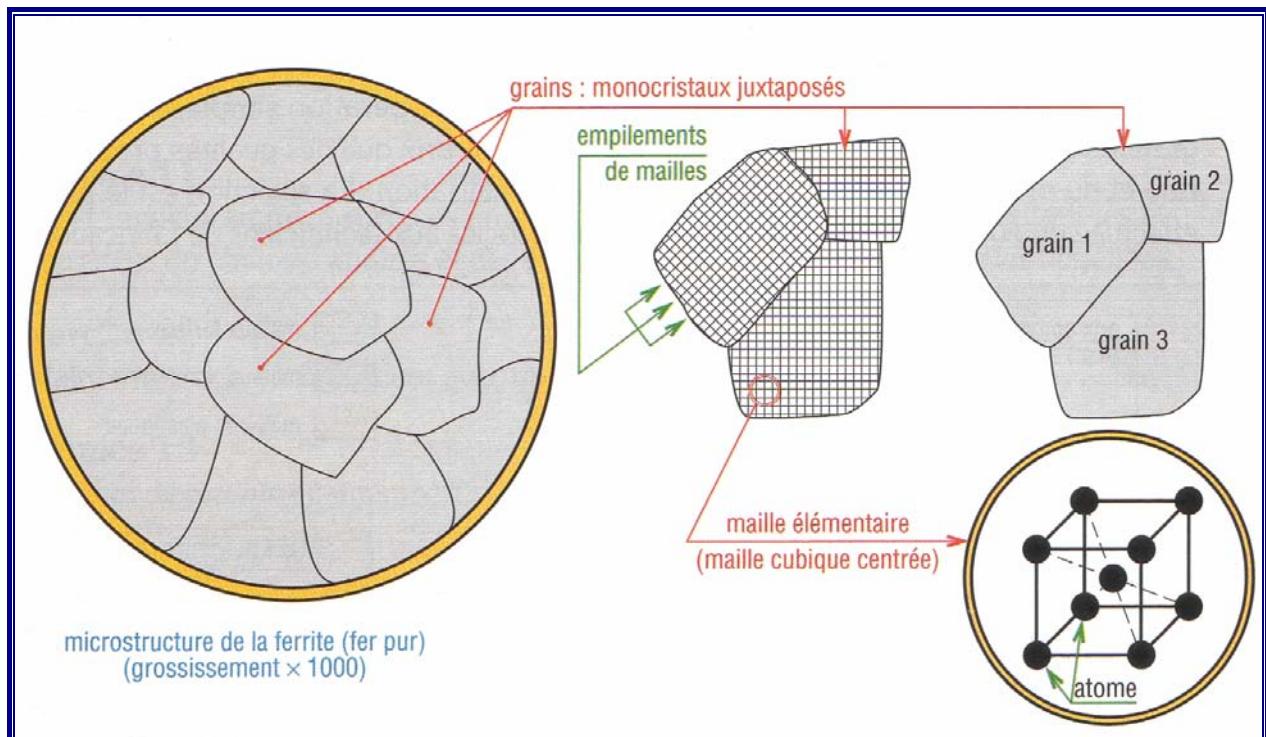
1. Prix comparatifs indicatifs (au kg) des principaux matériaux industriels (u.a. = unité arbitraire).



2. Principales familles de matériaux.

I – Métaux

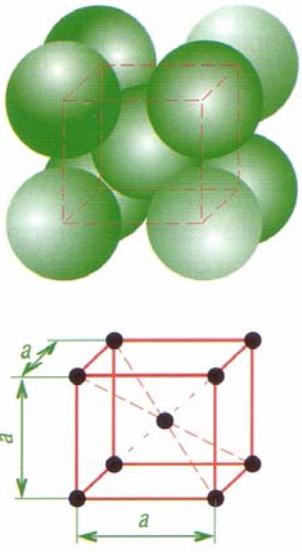
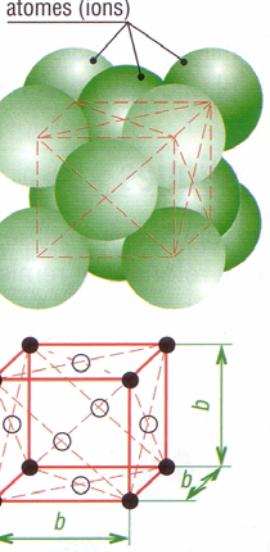
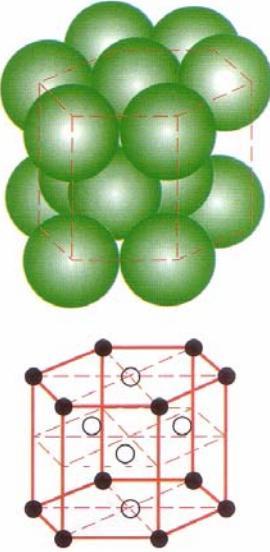
Ils sont étudiés en détail dans les chapitres suivants. Seules les propriétés caractéristiques communes sont abordées ici.



3. Structure cristalline des métaux.

Structure cristalline : c'est la façon dont les atomes sont empilés les uns sur les autres. Les métaux sont formés de monocristaux, ou grains, disposés côte à côte, dont la forme, plus ou moins régulière, est polygonale. Cette structure cristalline est à l'origine de leurs propriétés, elle influe sur les caractéristiques mécaniques et physiques.

Mailles : à l'intérieur des grains, les atomes, en contact les uns avec les autres, disposés régulièrement, forment des empilements compacts. Les réseaux cristallins ainsi formés sont appelés mailles. Les mailles rencontrées le plus fréquemment sont la maille cubique centrée, la maille cubique à faces centrées et la maille hexagonale compacte.

Structures cristallines des métaux : principales mailles			
type	maille cubique centrée	maille cubique à face centrée	maille hexagonale compacte
forme de la maille			
volume occupé par les atomes dans la maille	$V = 0,68 a^3$ 2 atomes par maille	$V = 0,74 b^3$ 4 atomes par maille	$V = 0,74$ vol. de la maille 6 atomes par prisme
exemples	fer α , Mn, Cr, W, Mo, V, Nb, Li, Zr, Ta, Ba, Ti ($> 882^\circ\text{C}$) ...	fer γ , Al, Cu, Ag, Co, Pb, Ni, Au, Pt, Sr...	Mg, Zn, Cd, Be, Co ($< 419^\circ\text{C}$) Ti ($< 882^\circ\text{C}$)...
propriétés	haute résistance peu ductile	résiste au cisaillement très ductile	fragile peu ductile

4. Structures cristallines des métaux: principales mailles.

Allotropie : propriété de certains métaux ou alliages qui peuvent avoir, selon la température, des structures cristallines (mailles) différentes, avec des propriétés différentes.

Exemples : fer α et fer γ , titane ($< 882^\circ\text{C}$ et $> 882^\circ\text{C}$)...

Alliages : lorsqu'on ajoute les atomes d'un autre métal, on modifie l'arrangement des plans de la structure cristalline du métal de base. Cela accroît le plus souvent la résistance.

Exemple : le bronze est plus résistant que les deux métaux de base qui le constituent (cuivre et étain).

Désignation normalisée : elle utilise à la fois des lettres, qui précisent la nature du métal de base et des éléments d'addition, plus des chiffres qui indiquent les indices de pureté et les teneurs. Deux types de symboles sont utilisés : les symboles chimiques usuels et les symboles métallurgiques.

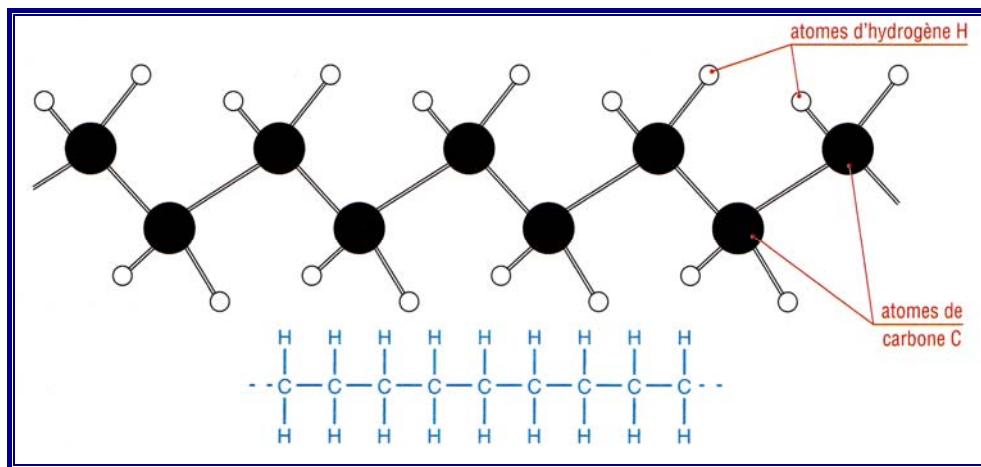
Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels							
corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité	corps	symbole chimique	symbole métallurgique	densité
aluminium	Al	A	2,7	manganèse	Mn	M	7,2
béryllium	Be	Be	1,85	molybdène	Mo	D	10,2
bore	B	B	2,35	nickel	Ni	N	8,9
cadmium	Cd	Cd	8	phosphore	P	P	1,88
carbone graphite	C	—	2,24	platine	Pt	—	21,5
carbone diamant	C	—	3,5	plomb	Pb	Pb	11,34
chrome	Cr	C	7,1	silicium	Si	S	2,4
cobalt	Co	K	8,9	soufre	S	F	2,1
cuivre	Cu	U	9	titane	Ti	T	4,5
étain	Sn	E	6 à 7,5	tungstène	W	W	19,3
fer	Fe	Fe	7,8	vanadium	V	V	5,9
lithium	Li	L	0,534	zinc	Zn	Z	7,15
magnésium	Mg	G	1,75	zirconium	Zr	Zr	6,5

II - Polymères ou matières plastiques

Il en existe deux familles principales: les thermoplastiques et les thermodurcissables (voir chapitre 6 : matières plastiques et élastomères).

1. Thermoplastiques

Très nombreux, ils sont les plus utilisés. Ils ramollissent et se déforment à la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remis en oeuvre un grand nombre de fois.



5. Polymère ou macromolécule de polyéthylène.

Exemples : polyéthylène, polypropylène, polystyrène, PVC.

2. Thermodurcissables

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

Exemples : phénoliques, époxydes ...

Remarque : une même matière plastique, comme le polyester par exemple, existe parfois dans la forme thermoplastique et dans la forme thermodurcissable.

3. Elastomères ou « caoutchoucs »

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

III - Céramiques

Ni métalliques, ni polymères, ce sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre et les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. Elles sont très dures, très rigides, résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principal inconvénient est la fragilité.

Fabrication : elle comprend en général une mise en forme (pressage, moulage, extrusion...) suivie par un traitement thermique (cuisson ou frittage).

1. Céramiques traditionnelles

Elles regroupent les ciments, les plâtres, les produits à base d'argile (terres cuites, faïence, porcelaine, grès cérame...) et les produits à base de silice (verre, cristal...).

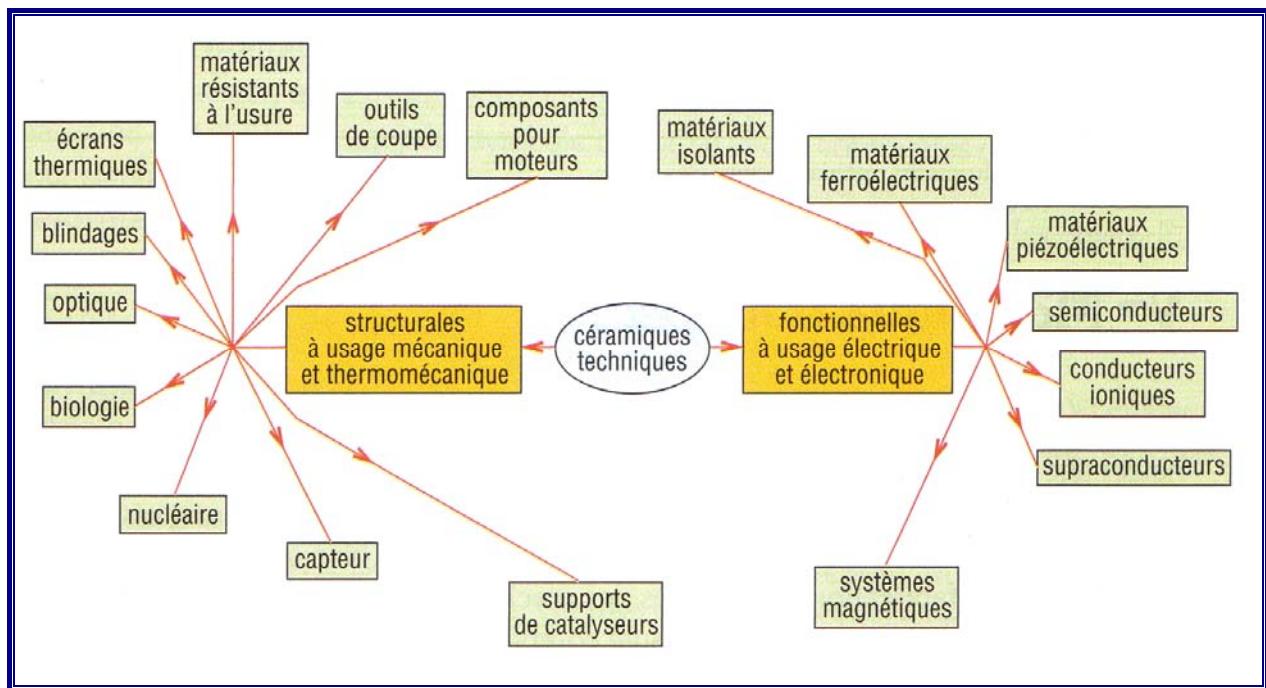
Céramiques traditionnelles			
nuances		matières premières	exemples d'emploi
produits poreux	terre-cuite	marnes, argiles	tuiles, briques, horticulture, art
	faïence	argile, silice, quartz	vaisselle, carrelage (mur), art
	produits grésés	argile, kaolin, feldspath	carrelage (sol)
	réfractaires	argile réfractaire, silice, chamotte, alumine, magnésie carbone-graphite...	ciment, béton brique pour four produits frittés
produits vitrifiés	grès cérame	argile, chamotte, silice	évier, lavabos, baignoires
	vitreuses	argile, kaolin, feldspath, silice	
	porcelaine	kaolin, argile, feldspath, quartz	vaisselle, art, génie électrique
verres		sodico-calcique silice alumine oxydes chaux magnésie cristal (oxyde de plomb) borosilicate aluminosilicate spéciaux	vitres, flacons, ampoules vaisselle, art, optique résistant aux chocs thermiques résistance à la chaleur optique, laser, fibre optique
abrasifs		oxydes, carbures, diamant	meules, papiers abrasifs

2. Céramiques techniques

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

Exemples : oxydes d'alumine (Al_2O_3), zircone (ZrO_2), nitrures de bore (BN) ou de silicium (Si_3N_4), carbures de silicium (SiC) ou de tungstène (WC).

Utilisations : fibres optiques (silicium), mémoires magnétiques (ferrites), outils de coupe (carbures), abrasifs, isolants, écrans thermiques, joints d'étanchéité, laser, prothèses osseuses...



6. Domaines d'application des céramiques techniques.

IV - Matériaux composites

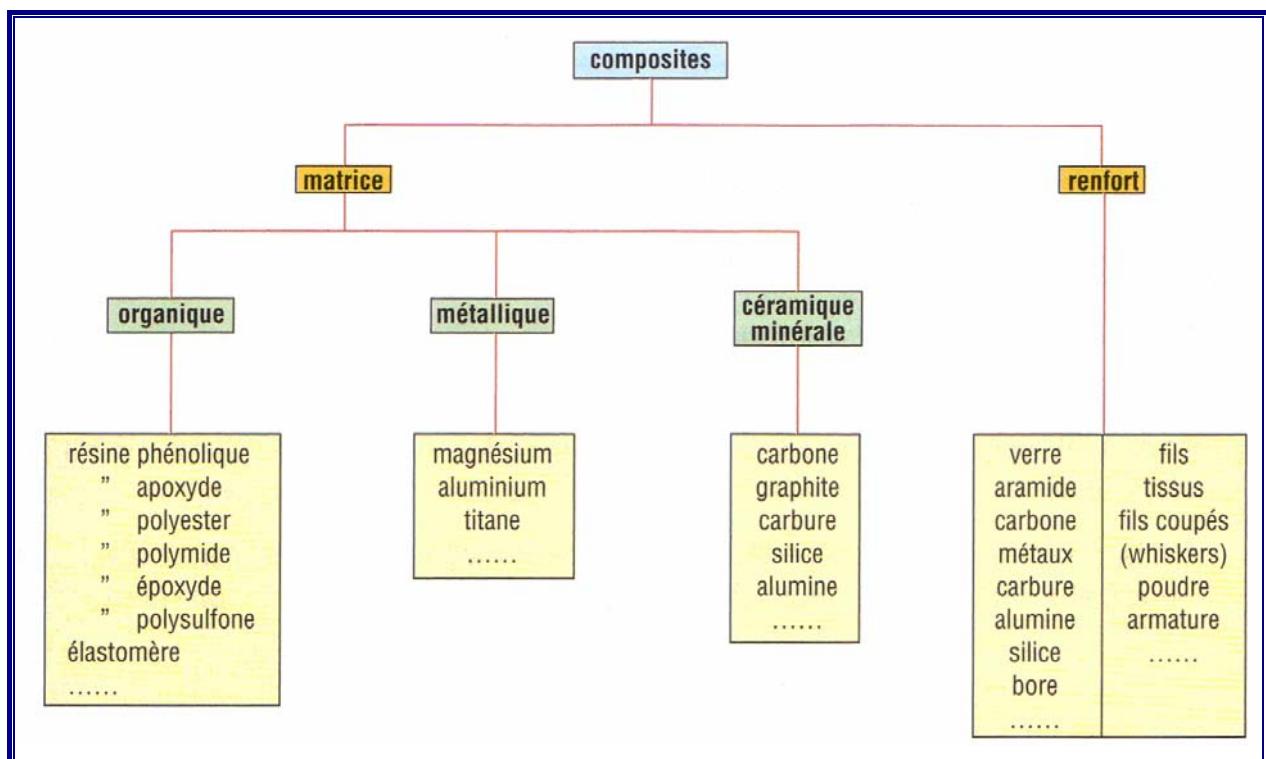
Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant : polymère, céramique ou métal) renforcés par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau afin de combiner au mieux les avantages des deux. Les deux corps, de structure différente, ne se mélagent pas (structure hétérogène) au contraire d'un alliage (structure homogène).

Exemples familiers : béton armé (béton + armature acier), pneumatiques (élastomère + toile + fils d'acier), équipements sportifs (raquettes, ski...).

Composites à matrices polymères : en renfort, la fibre de verre, la plus économique, est la plus utilisée. La fibre de carbone, plus coûteuse, est utilisée dans des applications plus pointues : équipement sportifs de haut niveau, aéronautique... Les fibres organiques comme les aramides (kevlar) sont un compromis entre les deux.

Fibres	diamètre 0,001 mm	R _r (da N/mm ²)	E (da N/mm ²)
verre E	3—20	250—350	7x10 ³
carbone	7—10	250—700	35 x 10 ³
aramide (kevlar)	12	270—350	11 x 10 ³
acier	13	420	20 x 10 ³
carbure de silicium (Si C)	3—10	2 100	43 x 10 ³
alumine Al ₂ O ₃	3—10	2 100	50 x 10 ³

7. Caractéristiques mécaniques de quelques fibres de renforcement de composites.



8. Principaux constituants des matériaux composites.

V - Matériaux nouveaux

Depuis la préhistoire, toutes les époques ont connu le développement de nouveaux matériaux : âge de pierre, âge du bronze, acier au XIX^e siècle...

De nos jours, les composites récents, les céramiques techniques et les métaux de pointe sont les plus prometteurs. En développement croissant, ils sont bien souvent des éléments déterminants dans la fabrication et le succès des machines les plus complexes: engins spatiaux, avions, équipements sportifs pour la haute compétition...

En outre, ils pallient de plus en plus à la pénurie des ressources naturelles en matériaux traditionnels et en matériaux stratégiques : chrome, manganèse, cobalt...



ESSAIS DES MATERIAUX

OBJECTIFS

- Présenter et décrire les principaux essais mécaniques normalisés et mondialement utilisés.
- Donner des notions d'extensomètre et de photoélasticité.

Les essais, en laboratoire ou sur le terrain, apportent des renseignements précis et fiables sur la qualité et les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre ; des normes internationales règlent la plupart.

Principaux essais : essais mécaniques (traction, dureté, résilience, fatigue, fluage...), essais pour la productique (emboutissage, pliage, usinabilité...), essais sur les surfaces (abrasion, rayures, rugosité, adhérence...), essais sur les fluides (viscosité, écoulements...), essais non destructifs (radiographie, ultrasons, magnétoscopie, acoustique d'étanchéité, ressage...).

I - Définitions préliminaires

Homogénéité : un matériau est homogène s'il possède, en tous points, les mêmes propriétés chimiques et physiques. La plupart des métaux et des alliages sont considérés comme homogènes. Le bois et les composites ne le sont pas, ils sont hétérogènes.

Contraintes (unités : N/mm² ou MPa) : elles caractérisent par des indications chiffrées les efforts de cohésion qui existent entre les grains de matière. On trouve des contraintes normales, ou de tension, ayant pour symbole (σ) et des contraintes de cisaillement, ayant pour symbole τ (τ).

Déformations : elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques.

Exemples : allongement, raccourcissement, fléchissement, torsion, glissement ...

Isotropie : un matériau est isotrope s'il présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux et les alliages sont généralement isotropes. Les matières plastiques, les matériaux composites et le bois ne sont pas isotropes. Le bois est plus résistant dans le sens des fibres que dans le sens perpendiculaire aux fibres.

Elasticité : elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort, chargé normalement, a un comportement élastique. La propriété contraire est la plasticité.

Plasticité : un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique. La plupart des métaux et des alliages ont un comportement *élastique* sous charges modérées et *plastique* sous charges excessives.

Ductilité : c'est l'aptitude qu'a un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. Elle est caractérisée par l'allongement pour cent A% (plus A% est grand, plus le matériau est ductile).

- Si $A \% \geq 5 \%$ les matériaux sont considérés comme ductiles.
- Si $A \% < 5 \%$ les matériaux sont considérés comme fragiles ou « cassants ».
- Z% (striction) et K (résilience) sont également des indicateurs.

La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage...).

Malléabilité : cette propriété est identique à la ductilité mais appliquée à la compression.

L'aluminium, le cuivre, l'or, certains laitons et certains aciers inoxydables sont très malléables ($A \% > 35 \%$) et acceptent des emboutissages profonds.

II - Essai de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Principe : L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant.



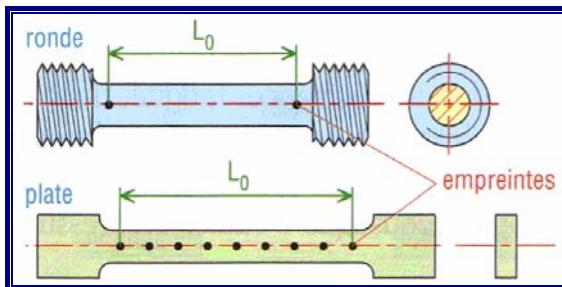
1. Machine de traction.



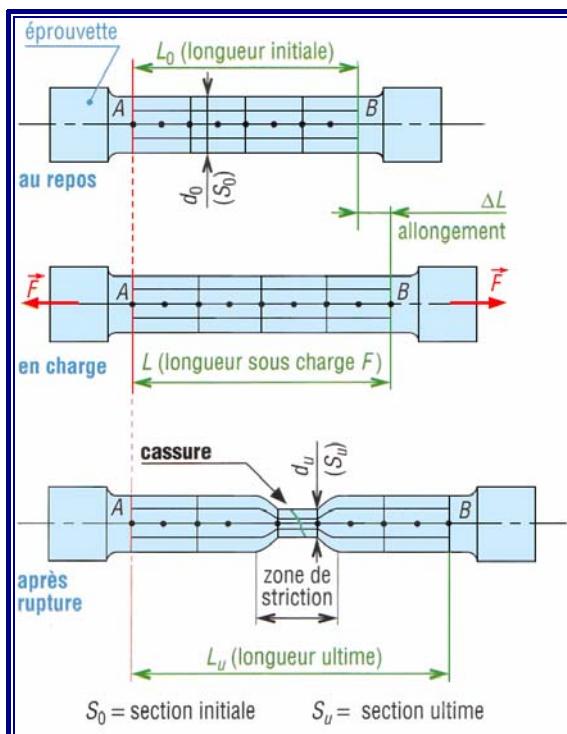
2. Eprouvette.



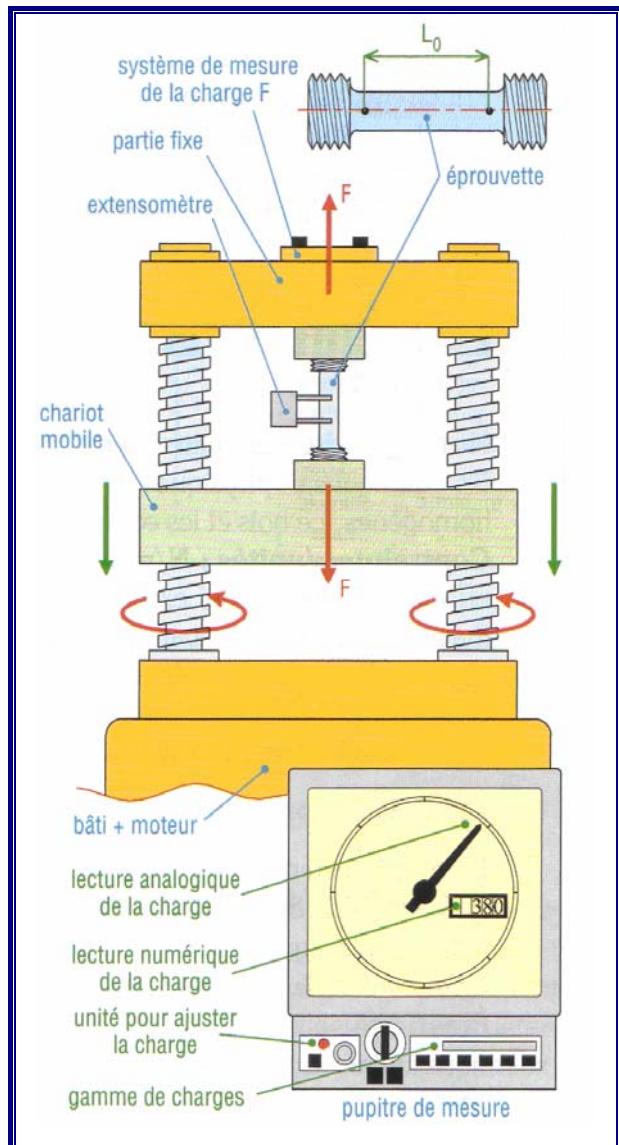
3. Eprouvette installée entre les mors de machine de traction.



4. Exemples d'éprouvettes de traction usuelles.



5. Éprouvette en cours d'essai.



6. Principe des machines d'essai de traction.

Caractéristiques mesurées

Les deux points A et B sont situés sur l'éprouvette.

L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette au repos (sans charge).

L : Longueur de l'éprouvette mesurée sous charge F .

F : Force exercée par la machine d'essai sur l'éprouvette.

Résultats de l'essai

$$\text{Résistance élastique } R_e = \frac{F_e}{S_0} \begin{cases} F_e \text{ en N} \\ S_0 \text{ en } mm^2 \\ R_e \text{ en MPa} \end{cases}$$

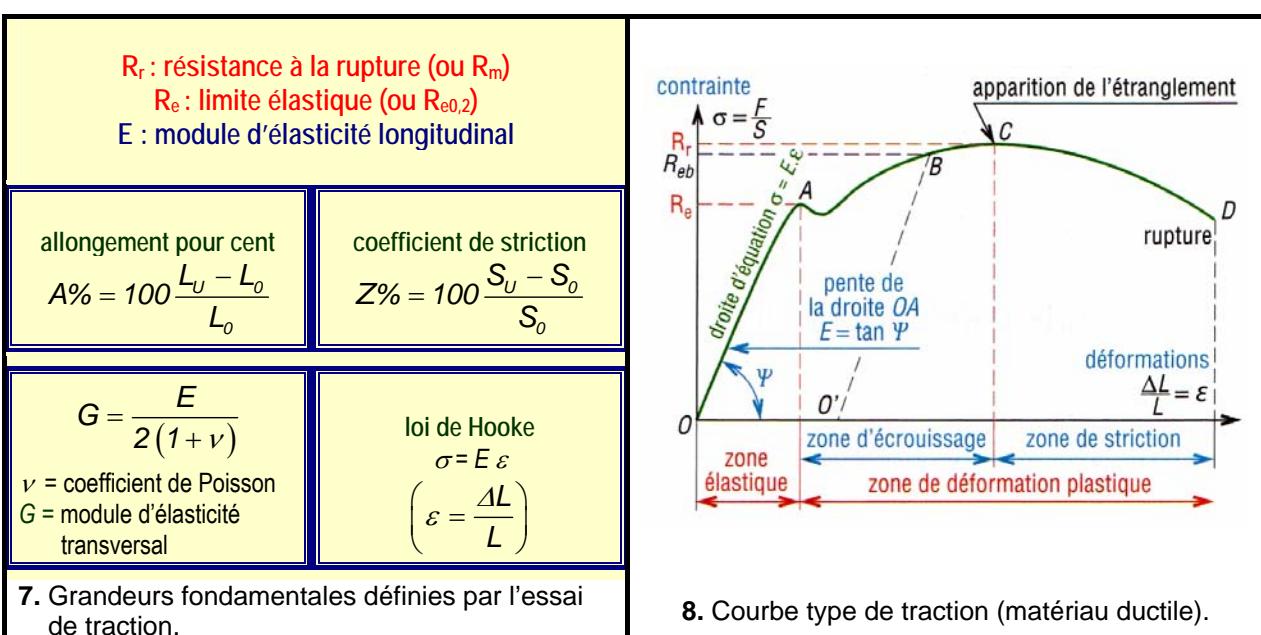
$$\text{Résistance à la rupture } R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

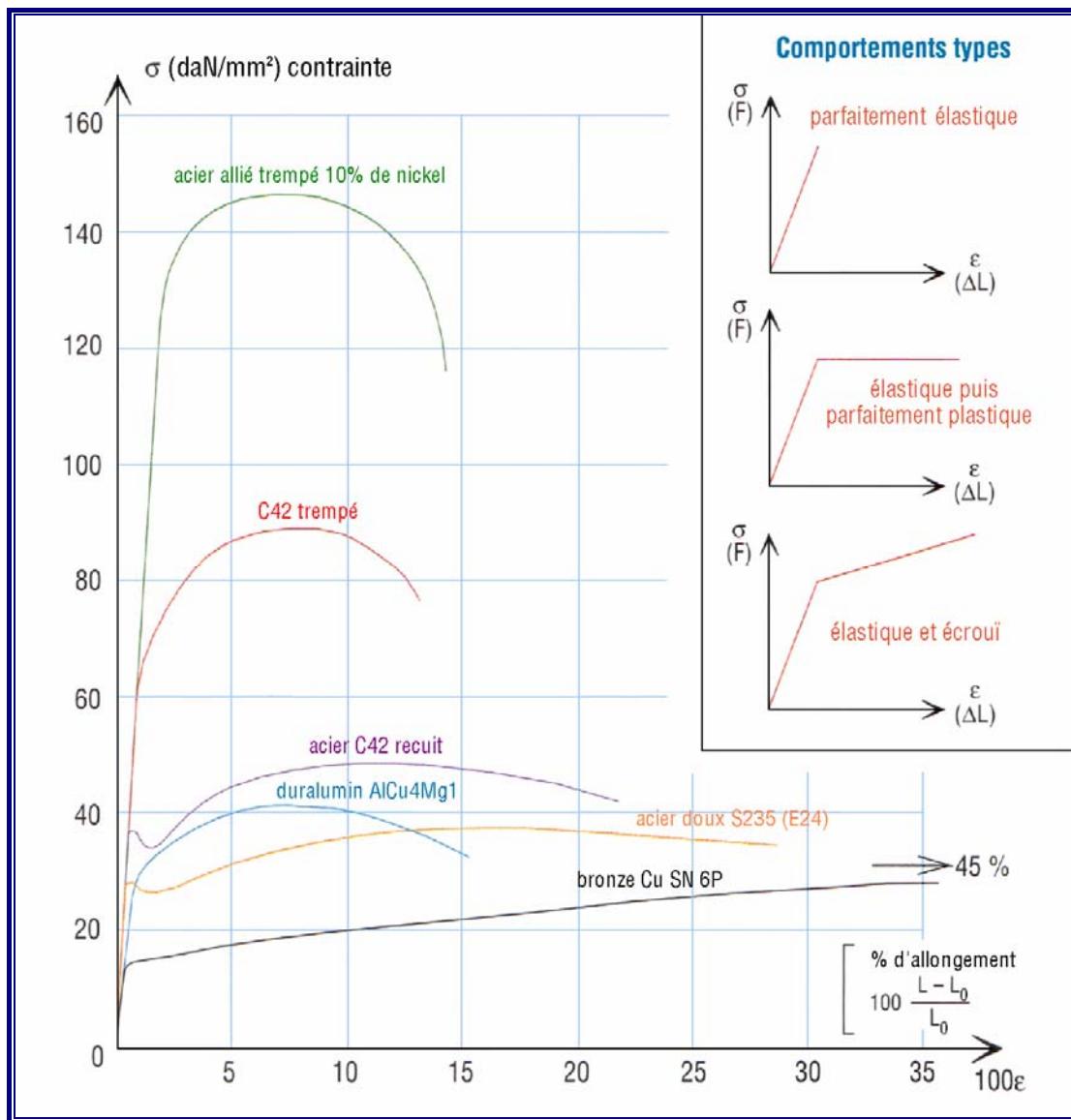
$$\text{Allongement pour cent } A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

L_u : Longueur ultime après rupture

1. Courbes contraintes déformations typiques

Pour un grand nombre de matériaux, comme les métaux et les alliages, les courbes obtenues présentent une zone, appelée domaine élastique, où le graphe est une droite (segment OA). Pour tous les points de cette droite, la déformation, ou l'allongement, est proportionnelle à la contrainte, ou à l'effort exercé, et le matériau (l'éprouvette) est parfaitement élastique (se comporte comme un ressort parfait).





9. Courbes de traction de quelques matériaux et modèles de comportement.

Module d'élasticité longitudinale E (N/mm²) : il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus E est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

Exemples : $E_{\text{acières}} = 200\,000 \text{ N/mm}^2$, $E_{\text{élastomères}} = 1 \text{ N/mm}^2$.

Loi de Hooke ($\sigma = E\epsilon$) : cette loi, ou équation de la droite QA, traduit la proportionnalité précédente (σ en N/mm², E en N/mm² et ϵ sans unité). Elle est à la résistance des matériaux ce qu'est la loi d'Ohm à l'électricité.

Limite élastique R_e (N/mm²) : elle marque la fin du domaine élastique (« point A »). Pour les valeurs supérieures le matériau ne se déforme plus élastiquement mais plastiquement (l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales après déchargement, il subsiste un allongement permanent).

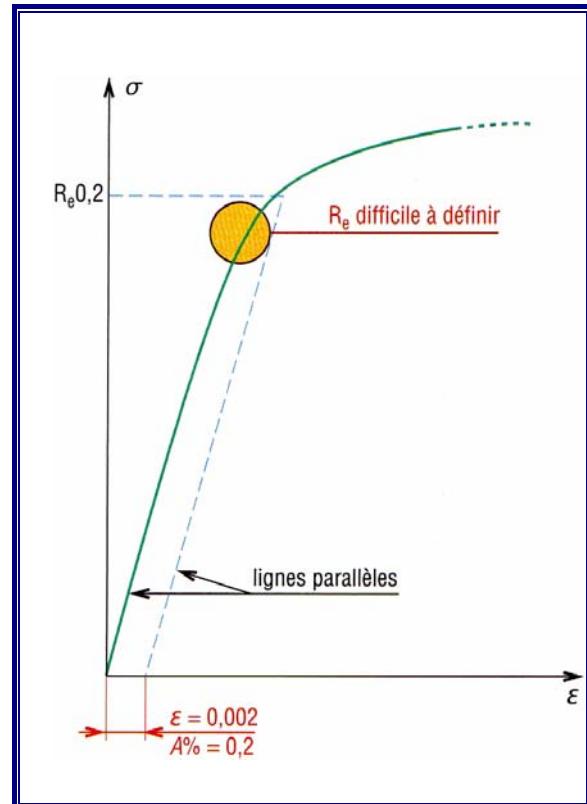
2. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ ou $R_{p0,2}$ (N/mm²)

Variante de la précédente (R_e), elle tient compte des imprécisions de la mesure, c'est-à-dire des imperfections de la droite OA et des appareils de mesure. Pour la mesure de R_e on tolère une légère déformation permanente de 0,2 % ($A\% = 0,2$).

3. Phénomène d'écrouissage

Surtout employé en compression, il permet d'augmenter la limite élastique R_e sans modifier la résistance à la rupture R_r . Dans un premier temps le matériau est déformé plastiquement (avant point de striction C : chemin OAB). Au relâchement le déchargement se fait suivant la droite BO', parallèle à QA (voir fig. 8).

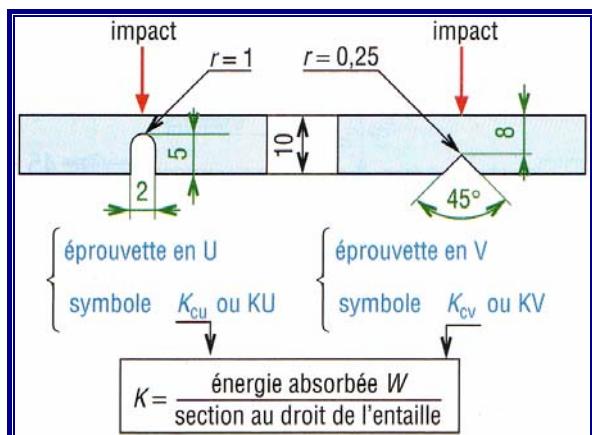
À la remise en charge la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec R_{e_b} comme nouvelle limite élastique.



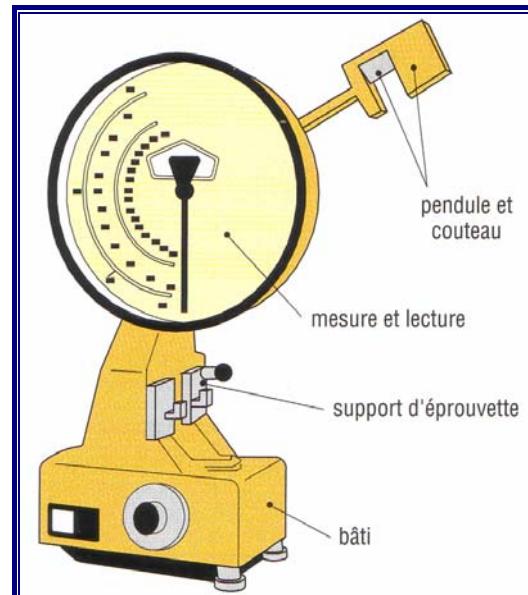
10. Définition de $R_{e0,2}$.

III - Essai de résilience

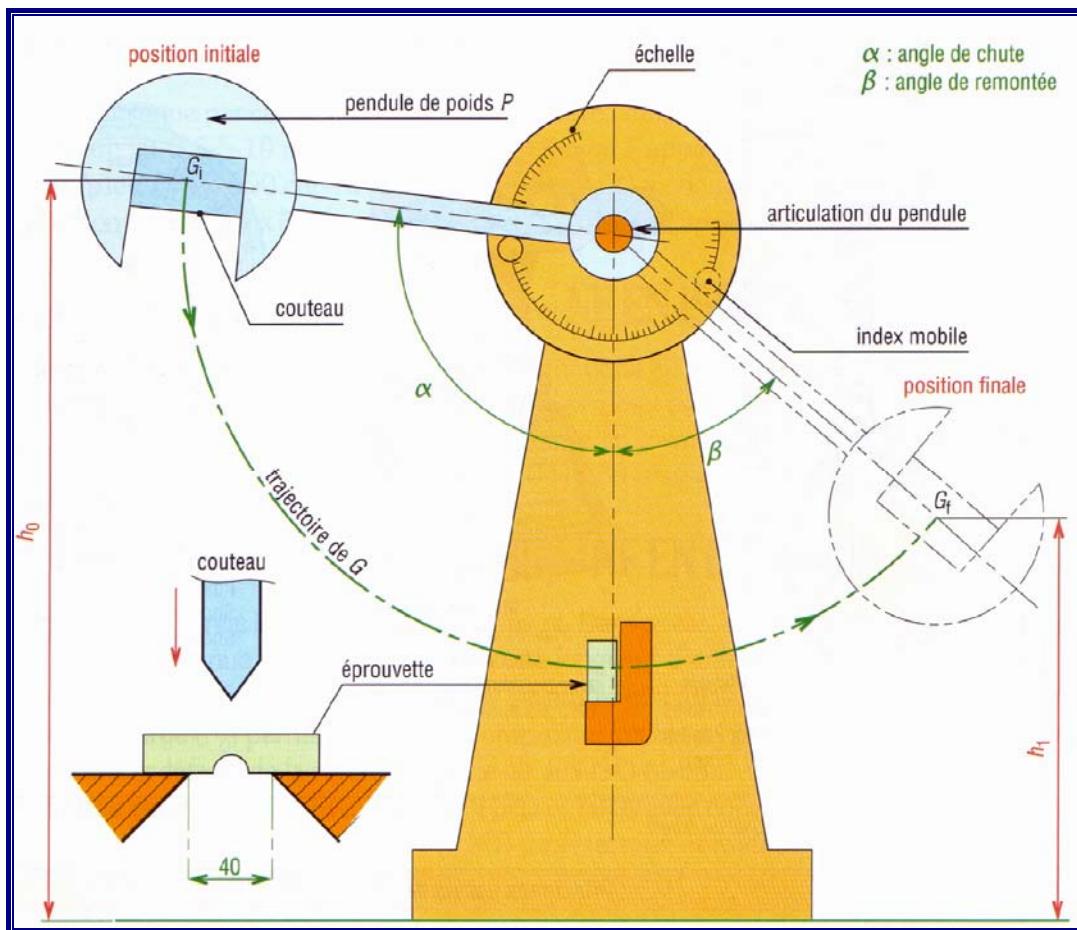
NF EN 10045 - 1



11. Essai Charpy : forme des éprouvettes (55x10x10).



12. Machine d'essai de résilience.



énergie potentielle du pendule

$$\begin{aligned} \text{au départ : } W_0 &= P \cdot h_0 \\ \text{à l'arrivée : } W_1 &= P \cdot h_1 \end{aligned}$$

énergie absorbée par l'éprouvette

$$\begin{aligned} W &= P(h_0 - h_1) \\ &= W_0 - W_1 \end{aligned}$$

$$W_0 \text{ nominale} = 300 \text{ J (Charpy)}$$

$$13. \text{ Principe d'essai de résilience. Vitesse d'impact : } V = \sqrt{2gL(1 - \cos \alpha)}$$

La **résilience**, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre ; ce risque est amplifié aux basses températures.

Elle est mesurée sur des machines du type **Charpy** (éprouvette sur deux appuis) ou Izod (éprouvette encastrée). Une jauge peut être collée sur le couteau (courbes : force-déplacement). L'essai, qui est un essai comparatif entre matériaux, mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau à tester.

L'énergie absorbée par l'éprouvette (W) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le départ ($W_0 = P \cdot h_0$) et l'arrivée ($W_1 = P \cdot h_1$) :

$$W = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P(h_0 - h_1).$$

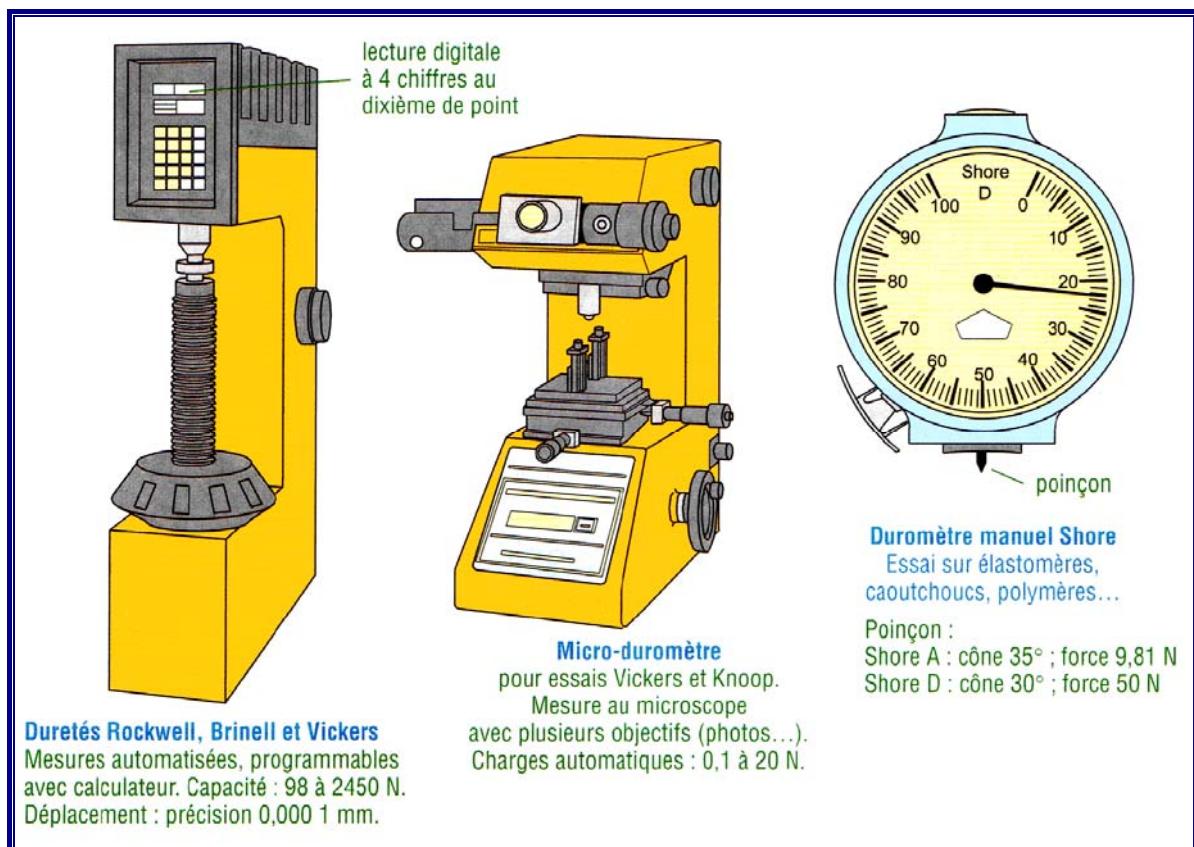
La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille (fig. 11).

Exemple : $KV = 121$ (pour énergie nominale 300 J ; entaille V ; énergie absorbée 121 J).

IV - Essai de dureté

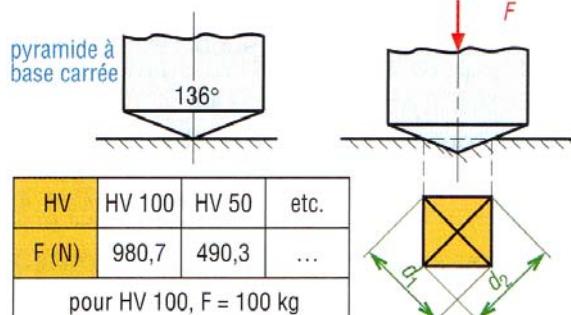
La **dureté**, de symbole général **H**, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures...), à l'usure et à l'érosion.

Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue (essais Brinell, Vickers et Rockwell) mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques).



14. Exemples de machines d'essai de dureté.

Principaux essais de dureté			
essai	symboles	principe et conduite de l'essai	
Brinell HB	HBW	<p>bille $\varnothing d$ en carbone</p> <p>surface</p> <p>F</p> <p>$\varnothing a$</p>	$HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ avec $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ $(F \text{ en N, } a \text{ et } d \text{ en mm})$ $0,981 \leq F \leq 2942 \text{ daN}$

Vickers HV HV 100 HV 50 HV 30 HV 20 HV 10 HV 5 ... HV 0,01	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #FFD700;">HV</td> <td style="background-color: #FFD700;">HV 100</td> <td style="background-color: #FFD700;">HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #FFD700;">F (N)</td> <td style="background-color: #FFD700;">980,7</td> <td style="background-color: #FFD700;">490,3</td> <td>...</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">pour HV 100, F = 100 kg</td> </tr> </table>	HV	HV 100	HV 50	etc.	F (N)	980,7	490,3	...	pour HV 100, F = 100 kg				$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \text{ avec}$ $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ $(F \text{ en N, } d_1 \text{ et } d_2 \text{ en mm})$ <p>Variante : essai Knoop</p> $d_1 = 7,1 \text{ d}_2 \text{ HK} = 14,2 \frac{F}{d_1^2}$ $\text{angle } 172,5^\circ$
HV	HV 100	HV 50	etc.											
F (N)	980,7	490,3	...											
pour HV 100, F = 100 kg														

15. Principes des essais de dureté Brinell, Vickers et Rockwell.

1. Dureté Brinell (symbole HBW) - NF EN ISO 6506

Elle est obtenue par calcul.

Principe

Il consiste à imprimer dans le métal étudié, une bille d'acier très dur de diamètre D sous l'action d'une charge F . D et F dépendent du matériau à essayer. Les valeurs les plus courantes sont $D = 10$ mm et $F = 29\,420$ N, elles sont utilisées surtout pour les essais des métaux ferreux et des bronzes. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille en carbure (diamètre : 1–2, 5–5–10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte.

Exemple : $F = 3\,000$ daN, $d = 10$ mm, pendant 20 secondes, symbole HBW 10/3000/20.

Utilisation : tous métaux (Norme NF EN ISO 6506). Temps d'application 2 à 8 s, maintien 10 à 15 s.

Application :

H 2,5 – 1 840 – 15

$D = 2,5$ mm ; $F = 1\,840$ N ; durée 15 s.

Mesure : Diamètre (d) de l'empreinte.

Résultat : La dureté Brinell HB est un nombre proportionnel au rapport :

$$\frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire de l'empreinte en } mm^2)}$$

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

Remarques :

- L'empreinte laissée par la bille est importante : $d \approx 3 \text{ mm}$.
- La dureté du matériau doit être inférieure à celle de la bille (la solution est déconseillée si $HB \geq 250$).
- L'épaisseur $e \geq 10 \text{ h}$ pour éviter les déformations.
- L'essai de traction est destructif, il faut prélever sur la pièce un échantillon. L'essai de dureté n'est pas destructif.
- Pour les aciers non alliés la dureté Brinell est liée à la résistance à la traction par la relation :

$$R_m = 3,5 \text{ HB}$$

$$N / mm^2$$

- Domaine d'utilisation : Pièces brutes de laminage ou de moulage.

2. Dureté Vickers (symbole HV) - NF EN 150 6507

Elle est obtenue par calcul.

Principe

Il consiste à imprimer dans le métal étudié un pénétrateur de diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet de 136° , sous l'action d'une charge F . La dureté du matériau est fonction de la grandeur de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

On mesure la diagonale de l'empreinte à l'aide d'un microscope spécial puis on calcule l'aire de la pyramide à base carrée :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}}$$

Charge à utiliser

Elle peut varier de 49 N à 981 N ; la charge d'essai normale est de 294 N.

Durée du maintien de la charge : 10 à 15 s.

Résultat :

Dureté Vickers :

$$HV = \frac{F \text{ (charge en N)}}{S \text{ (aire en mm}^2\text{)}} = \frac{2 F \sin 136^\circ / 2}{d^2}$$

Utilisation : tous métaux.

Variante : essai Knoop (microdureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections).

Exemple : 640 HV 30 (charge 294,2 N; 10 à 15 s ; dureté 640).

3. Dureté Rockwell (symbole HR) - NF EN 150 6508

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement.

Il consiste à imprimer en deux étapes un pénétrateur, **bille d'acier** ou **cône de diamant**, dans le matériau à tester en exerçant deux charges d'intensité connue F_0 et F_1 .

Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur, bille acier, (S : exemple 60 HRBS) ou carbure (W : exemple 60 HRBW) et cône diamant (A, C, D, et N). Une précharge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface (norme NF EN ISO 6508).

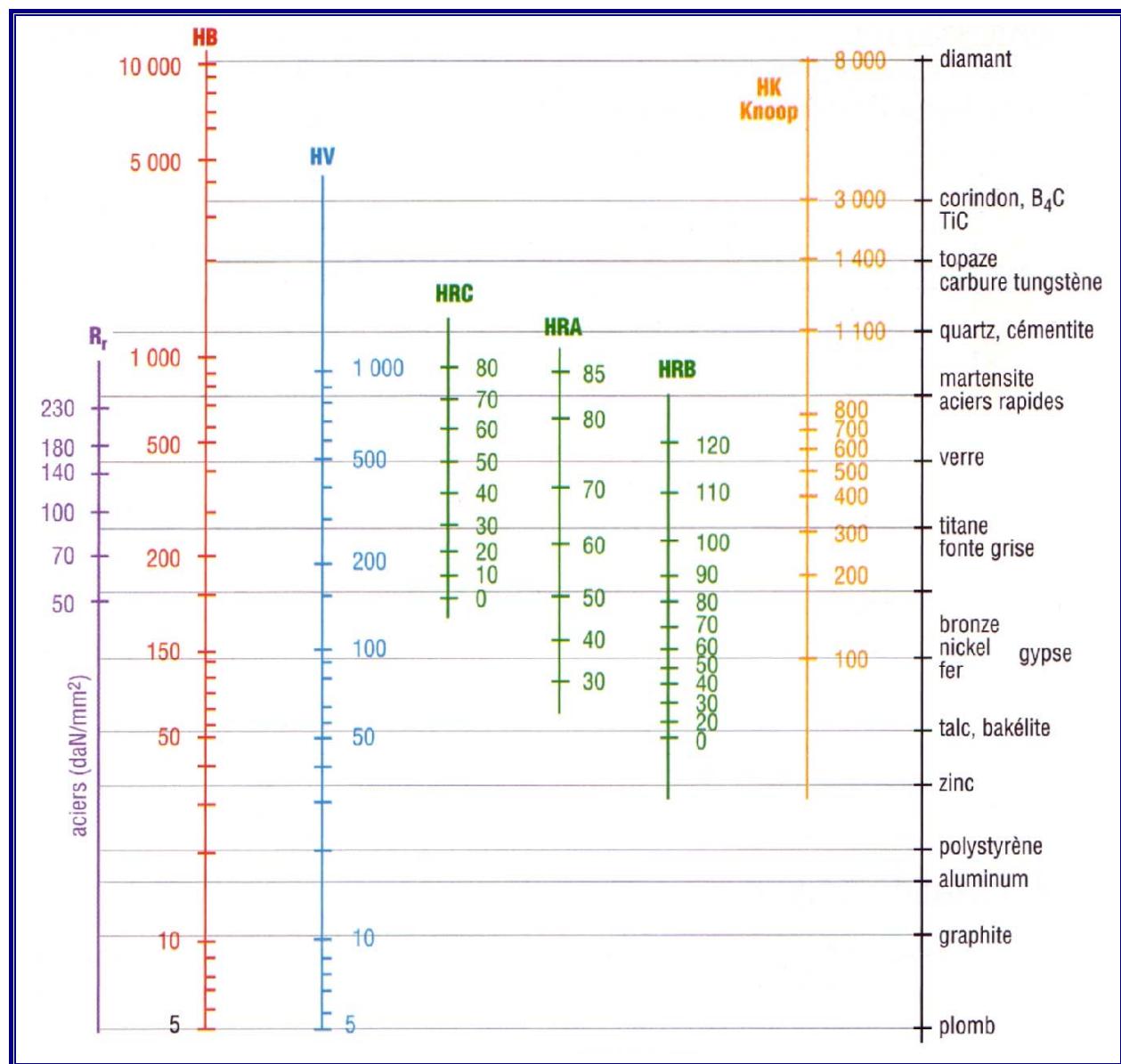
- **Essai au cône de diamant**

Angle au sommet 120° est utilisé pour le contrôle de la dureté des matériaux durs $HB > 250$ ($R_m > 900 \text{ N/mm}^2$). L'empreinte doit être réalisée sur une surface propre. **Résultat : HRC**.

- **Essai à la bille**

Différents diamètres de billes sont utilisés, le plus courant pour les alliages de Fe, Al, Cu, est celui de 1,58 mm. L'essai à la bille n'est pas recommandé si $HB \geq 250$. L'empreinte peut être réalisée sur une surface brute (mais exempte d'oxydation). **Résultat dureté HRB**.

Echelles de mesure : HRC (ferreux), HRD et HRA avec cônes (pour matériaux durs et très durs : carbures, aciers trempés...) ; HRB (non ferreux et métaux en feuilles) ; HRE, HRF, HRG (métaux doux) ; HR15N, HR30N, HR45N, HR15T, HR30T, HR45T (plastiques...).



16. Comparaisons indicatives des échelles de dureté usuelles (voir NF EN ISO 18205).

V - Essai de fluage

La déformation continue des objets, avec le temps, sous l'action d'efforts appliqués constants est appelée fluage.

L'essai de fluage est un essai de traction, à chaud ou non, souvent de très longue durée (milliers d'heures).

La rupture par fluage se produit, après un temps long, sous des charges constantes bien inférieures aux limites usuelles du matériau (R_r ou R_e).

Ce phénomène est observé dans les systèmes travaillant pendant de longues durées (10, 20 ans...) ou dans les machines travaillant à températures élevées, comme les chaudières, les moteurs d'avion ou les aubes de turbine.

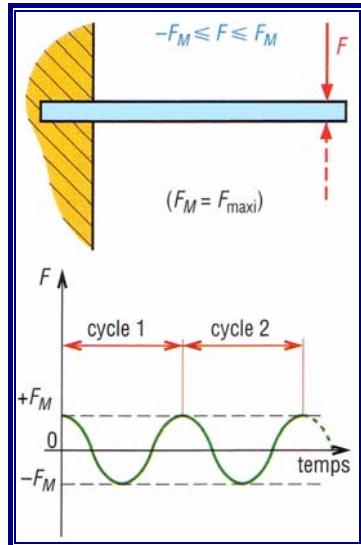
La chaleur accentue fortement le phénomène. Certains matériaux (matières plastiques...) sont sensibles au flUAGE à température ambiante.

VI - Essai de fatigue ou d'endurance

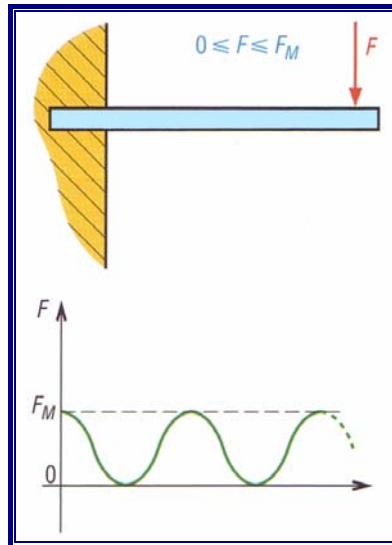
1. Phénomène de fatigue

Il est de première importance sur les structures d'avions et dans de nombreux autres domaines (roulements, engrenages, arbres de transmission...). Une roue de voiture mal équilibrée est un exemple de système soumis à un phénomène de fatigue ; un effet de résonance peut l'amplifier.

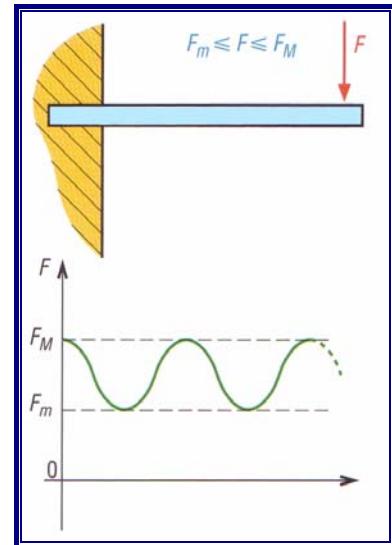
La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_r et R_e).



17. Charge alternée.



18. Alternée dans une seule direction.

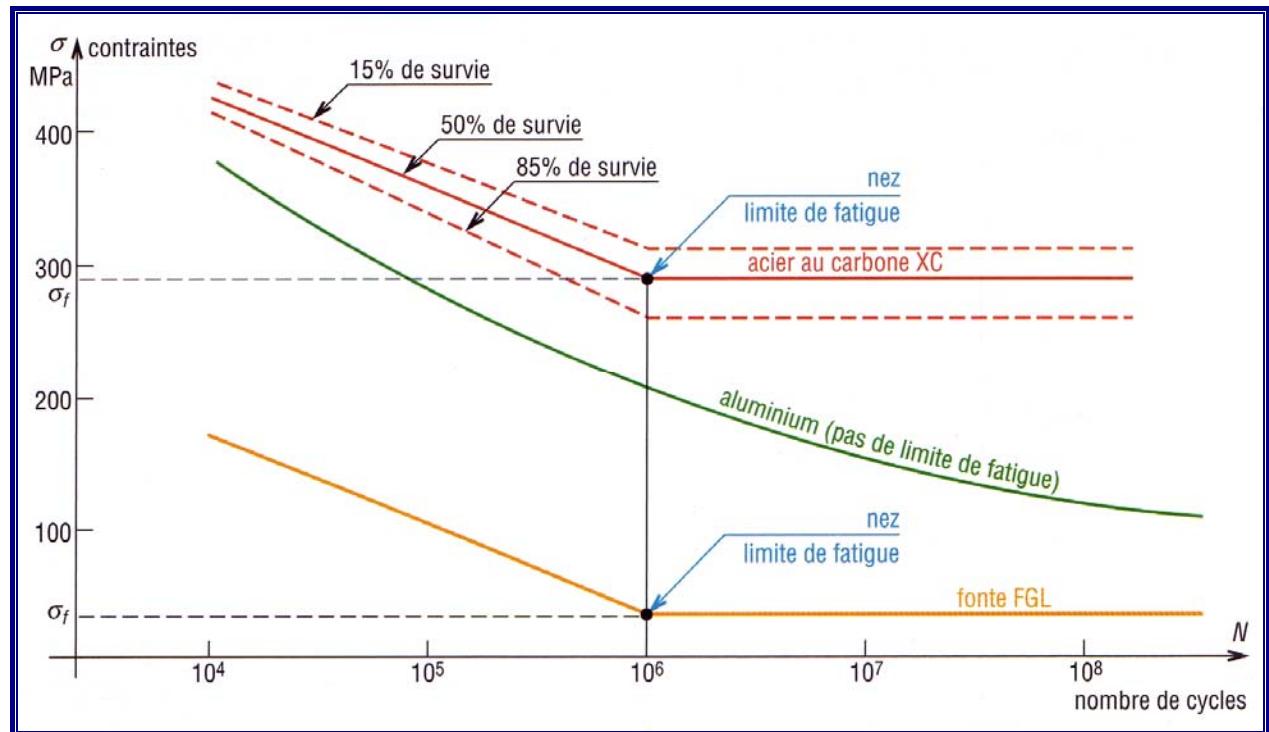


19. Charge ondulée.

2. Essai de fatigue

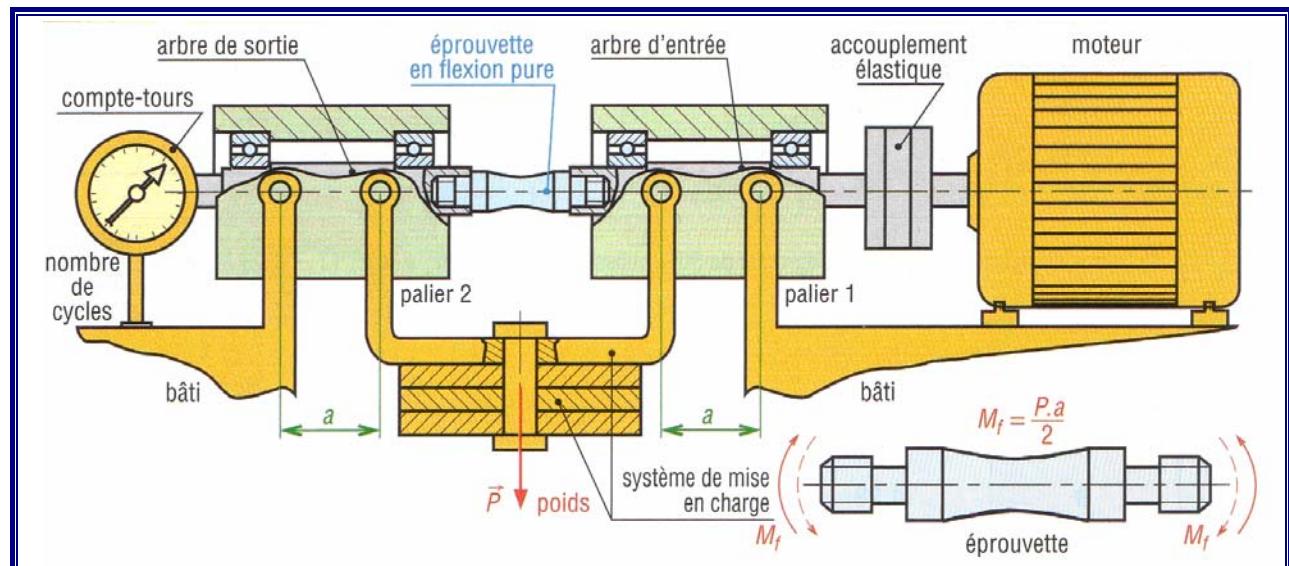
C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane.

Cette valeur moyenne, une fois déterminée, est choisie comme représentative de la capacité du matériau (analogie avec la durée de vie des roulements).



20. Courbes d'endurance ou de Wolher.

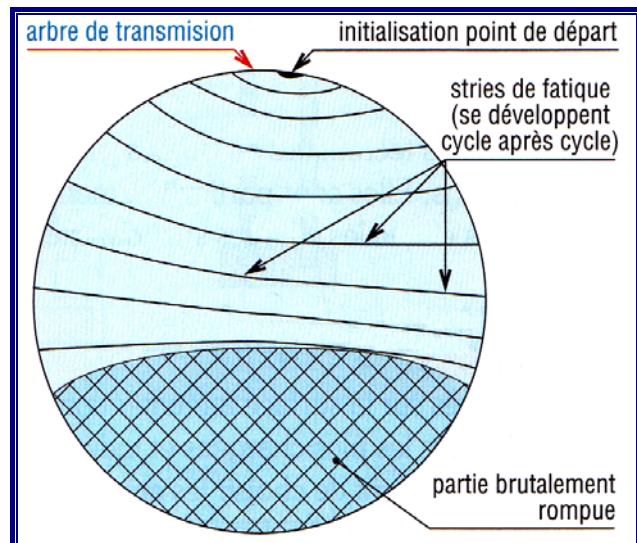
Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée « le plus classique », l'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée M_f .



21. Essai de fatigue en flexion rotative (machine de Moore) ou flexion alternée.

3. Mode de rupture

Les fissures de fatigue démarrent à partir des imperfections en surface rayures, empreintes, stries d'usinage, arête de filetage, hétérogénéité due au traitement thermique, défauts du réseau cristallin... Après amorce, la fissure s'agrandit sous l'action des efforts alternés qui écartent et rapprochent continuellement les parties fissurées ; il y a un phénomène de concentration de contraintes en ces points. La rupture définitive se produit brutalement lorsque les dimensions de la partie non encore fissurée ne sont plus suffisantes pour supporter les charges exercées.



22. Cassure typique de fatigue.

Valeurs indicatives de σ_{f50} (limite de fatigue pour 50% de survie) $\sigma_{f50} = k \cdot R_r$ (avec R_r : résistance à la rupture par traction du matériau)				
sollicitations	K	matériaux		nombre de cycles
flexion	0,5	acières de construction	$R_r < 1\ 400 \text{ N/mm}^2$ $HB < 400$	10^7
	0,4	acières moulés et fontes		10^7
	0,38	alliages de magnésium		10^6
	0,45	alliages de cuivre, alliages de nickel		10^7
	0,38	alliages d'aluminium laminés	$R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
	0,16	alliages d'aluminium pour la fonderie	$R_r < 280 \text{ N/mm}^2$	$5 \cdot 10^8$
torsion	0,29	acières		10^7
	0,32	fontes grises FGL		10^7
	0,22	alliages de cuivre		10^7
traction alternée	0,43	acières		10^7

Pour des pourcentages de survie différents de 50% utiliser la relation : $\sigma_{fn} = \sigma_{f50} (1 - 0,08 b)$ avec :						
<i>n % de survie</i>	90	95	98	99	99,9	99,99
<i>b</i>	1,28	1,64	2,05	2,33	3,08	3,62

VII - Extensométrie électrique, photoélasticité, vernis craquelants

Ces trois techniques classiques permettent l'étude expérimentale des contraintes et des déformations. Elles sont particulièrement intéressantes lorsque les formes des objets sont compliquées et que les charges sont difficiles à évaluer autrement (calculs...).

1. Vernis craquelants

Projetés sur la surface à étudier comme un aérosol, ils sont utilisés pour localiser visuellement les zones les plus chargées et indiquer les directions principales des déformations.

Ils permettent de choisir les emplacements de collage des jauge de contraintes et leur orientation ; l'orientation des craquelures est toujours perpendiculaire à la direction de la déformation en traction la plus importante.

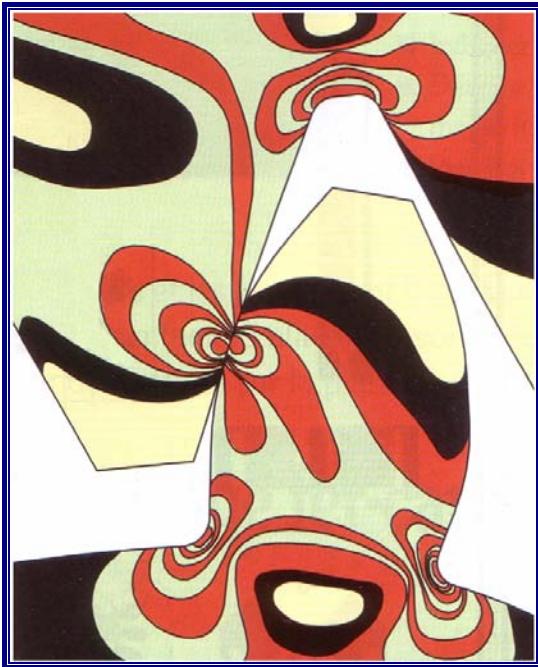
2. Méthodes photoélastiques

Plus précises que les vernis craquelants, ces méthodes permettent des études plus détaillées sur les zones les plus chargées, les directions principales des déformations par exemple. Les résultats sont particulièrement intéressants près des formes amenant des concentrations de contraintes (trous, encoches, épaulements...).

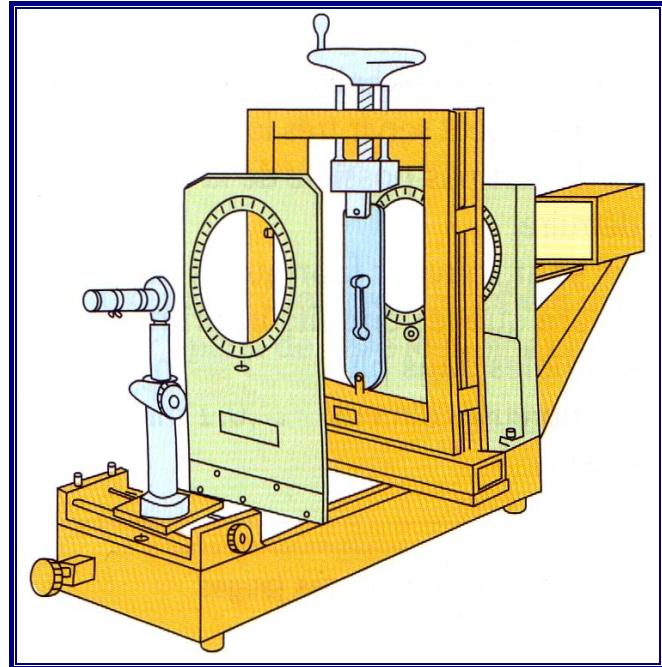
Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets.

Les pièces soumises à des vibrations ou des charges dynamiques peuvent être étudiées avec un système stroboscopique.

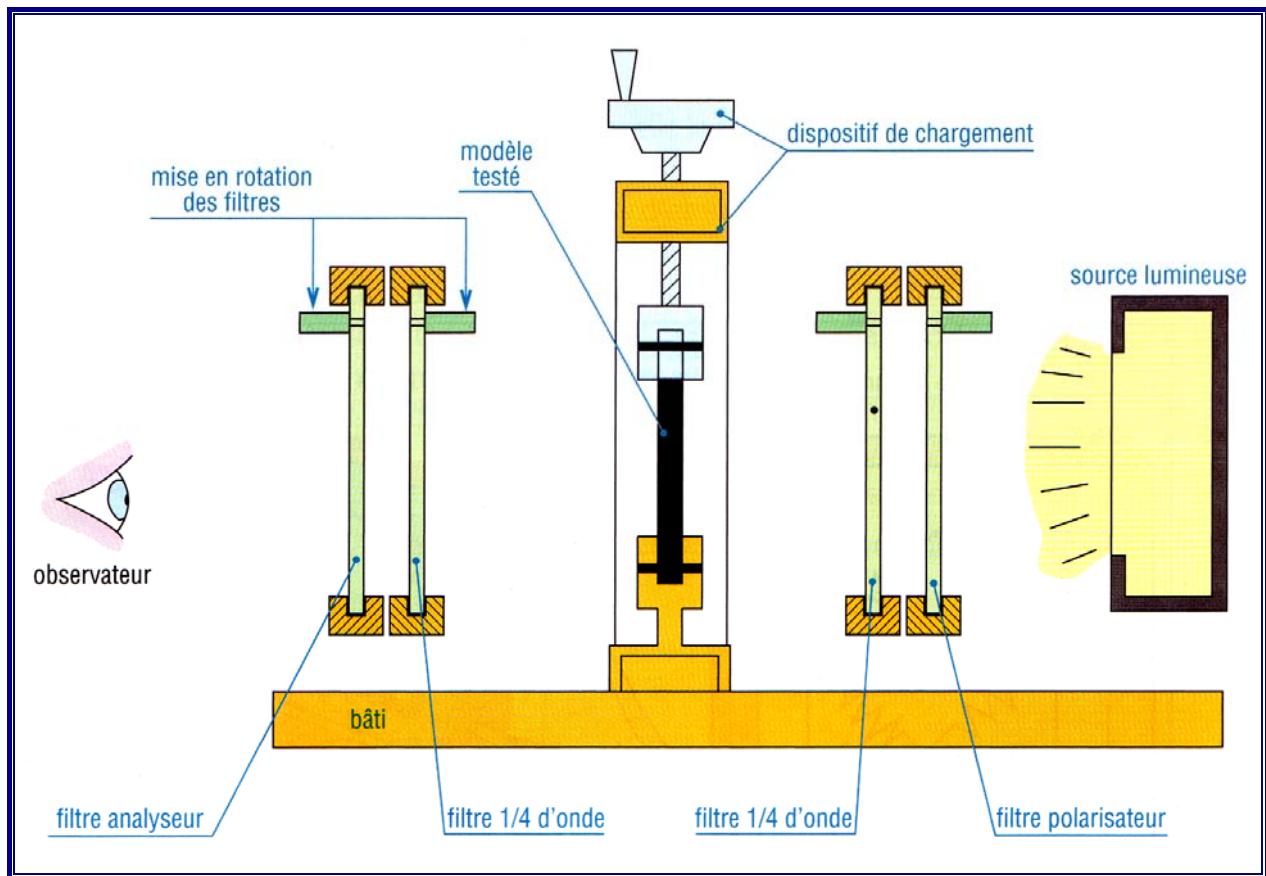
L'étude dans les trois dimensions est envisageable par tranches découpées dans des modèles 3D « figés ».



23. Motif obtenu par photoélasticité.



24. Exemple de polariscope par transmission.



25. Principe du polariscope par transmission (étude de modèles plans).

3. Extensométrie électrique

Elle est basée sur l'emploi des jauge de contraintes. C'est la méthode expérimentale la plus usuelle pour vérifier les résultats théoriques (calculs de contraintes, de déformations...).

Les jauge sont collées sur la surface à étudier et mesurent les déformations en un point donné. La déformation subie est transformée en variation de résistance électrique mesurée par un pont d'extensométrie : c'est le principe du pont de Wheatstone. Les contraintes sont ensuite obtenues par calcul à partir des lois de la résistance des matériaux ou élasticité.

Jauge de contraintes : sous l'effet d'un allongement la section du brin (fil) de la jauge diminue, il en résulte une variation de la résistance électrique du fil. En mesure, R_1 est une jauge active collée sur la structure et R_2 une jauge identique collée sur une pièce de même matière. R_2 ne subit aucune contrainte et est à la même température que R_1 .

Dans certains capteurs (forces, pressions, couples, déplacements...) on utilise généralement quatre jauge judicieusement disposées. Une jauge peut servir très longtemps, cependant il n'est pas possible de la décoller sans la détruire.

Elles sont souvent fabriquées de la même manière que les circuits imprimés et sont disponibles dans plusieurs formes et dans de nombreuses dimensions (0,1 mm à 10 cm et plus).

propriétés des jauge

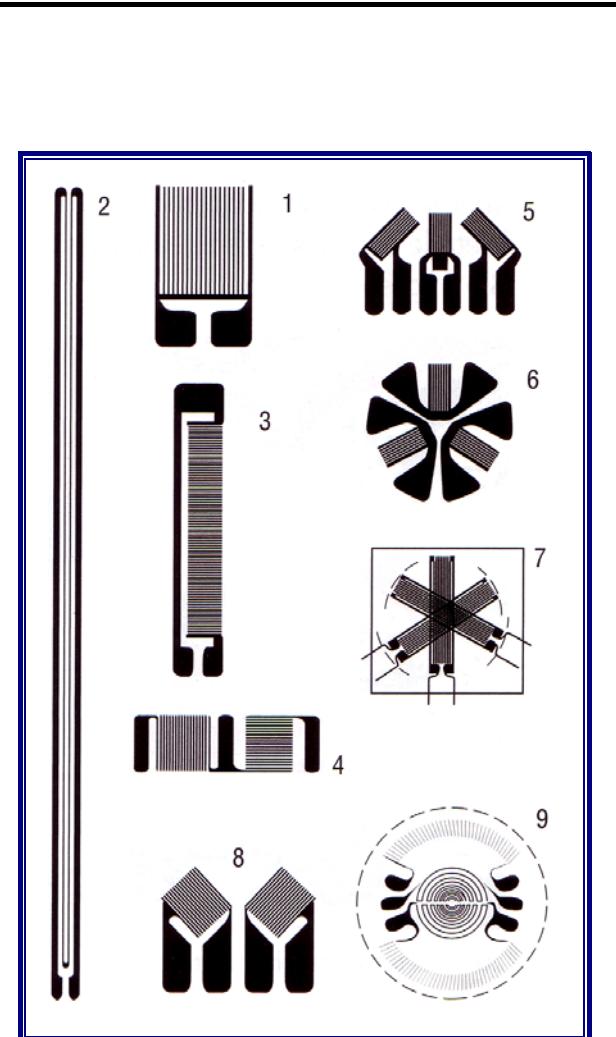
$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

avec ΔR : variation de résistance

ΔL : allongement du brin

K : facteur de jauge

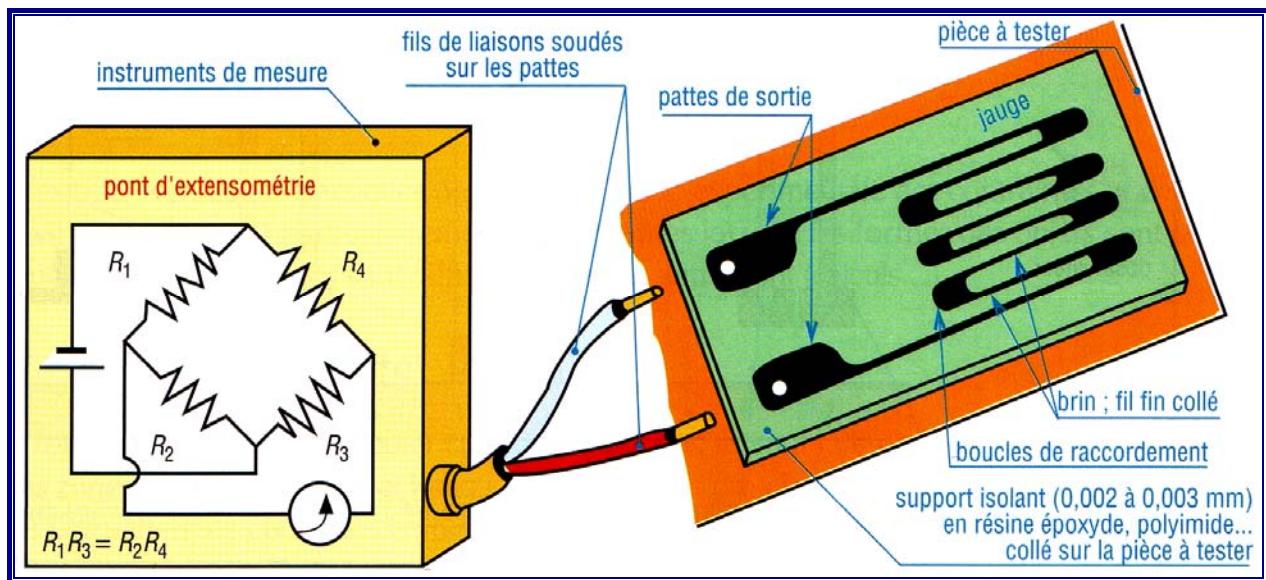
$$\begin{cases} K = 2 & \text{constantan} \\ K = 3,2 & \text{élinvar} \\ K = 0,5 & \text{manganin} \end{cases}$$



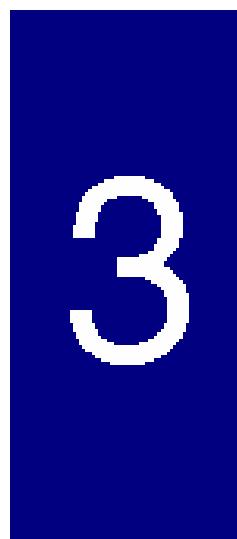
- 1, 2, 3 : jauge simples
- 4 : rosette à 2 jauge
- 5, 6, 7 : rosette à 3 jauge
- 8 : pour torsion et cisaillement
- 9 : capteurs de pression

26. Propriétés des jauge.

27. Exemples de jauge.



28. Principes d'utilisation des jauge.



MÉTAUX FERREUX. ASPECT MÉTALLURGIQUE

OBJECTIFS

- Indiquer les propriétés générales de l'alliage fer-carbone.
- Décrire le diagramme fer-carbone et les traitements thermiques dans la masse (trempe, revenu, recuit).
- Préciser l'influence des éléments d'addition.

Les aciers et les fontes sont les alliages du fer et du carbone avec éventuellement des éléments d'addition (acières alliés). Ils sont peu coûteux (le fer, métal de base le moins cher, existe en grande quantité sur la planète) et sont facilement recyclable.

I - Alliage fer-carbone

1. Fer

Le fer perd ses propriétés magnétiques au dessus de 768 °C, point de Curie, et existe sous plusieurs formes en fonction de la température (densité 7,88) :

- Fer α (alpha) : il existe jusqu'à 912 °C. De structure cristalline à maille cubique centrée, il ne dissout pratiquement pas le carbone (0,022 %C à 727 °C, 0,008 %C à température ambiante). La solution fer α plus carbone dissous s'appelle la ferrite.
- Fer γ (gamma) : il est stable entre 912 °C et 1 394 °C de maille cubique à faces centrées, il peut absorber, ou « dissoudre », beaucoup plus d'atomes de carbone que le fer α car les interstices sont plus nombreux entre les atomes. La proportion maximale est de 2,11 % à 1148 °C. La solution fer γ plus carbone dissout s'appelle l'austénite.
- Fer δ (delta) : il est stable entre 1 394 °C et 1 538 °C ; de maille cubique centrée, il a peu d'importance sur le plan industriel.

2. Carbone

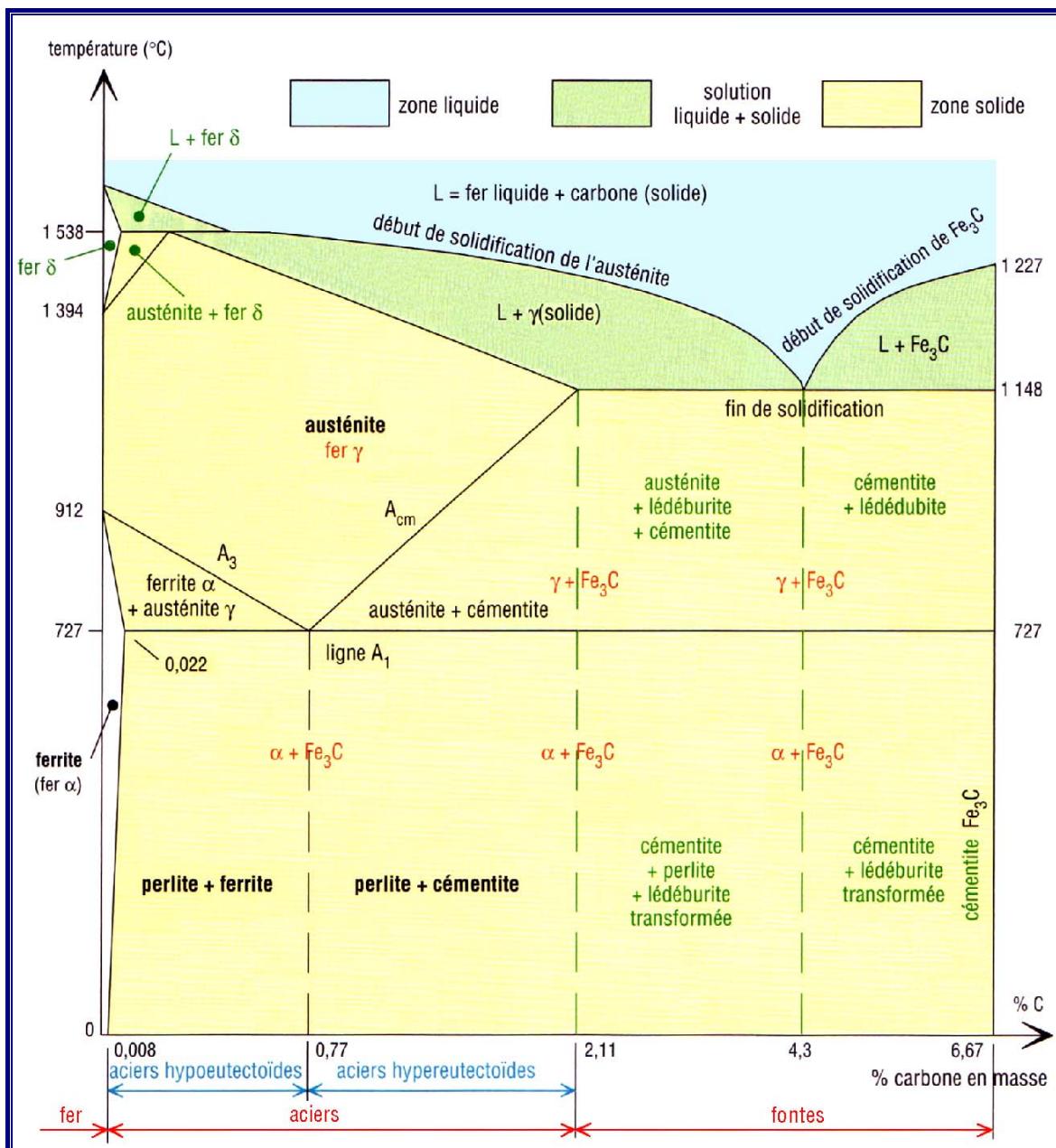
Il fond à 3 500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée.

3. Alliage fer-carbone

Alliés avec le fer, les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices, ou les vides, laissés entre les atomes de fer de chaque maille. Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés.

Sous certaines conditions d'équilibre, le carbone peut s'amalgamer, sans dissolution, au fer pour former du carbure Fe_3C ou cémentite qui contient 6,67 %C, pourcentage maximal d'absorption.

II - Diagramme fer-cémentite (Fe - Fe_3C)



1. Diagramme fer-carbone (Fe- Fe_3C ou fer-cémentite).

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques.

Il est limité à droite par la cémentite (6,67 %C, matériau fragile, cassant, très dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux les aciers (entre 0,008 et 2,1 %C) et les fontes (de 2,1 % à 6,67 %C).

Ligne A_1 (727 °C) : elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,77 %C, en austénite ; au-dessus de 727 °C la perlite n'existe plus.

Ligne A_3 : elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite la ferrite n'existe plus au dessus de cette ligne.

Ligne A_{cm} : elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.

Symboles A , r , et c : ils sont normalisés, aux normes internationales. Le symbole A est utilisé pour arrêt, r pour refroidissement et c pour chauffage.

Exemples : Ar_1 signifie passage de la ligne A_1 lors d'un refroidissement ; Ac_3 passage de A_3 lors d'un chauffage ; passage de A_{cm} lors d'un chauffage...

III – Aciers au carbone

Lorsque les refroidissements sont suffisamment lents, l'austénite se transforme d'abord en ferrite qui, compte tenu des interstices plus petits de sa maille, ne peut pas absorber tous les atomes de carbone libérés. En conséquence, au fur et à mesure que la température diminue, une partie du carbone libéré se combine avec les atomes de fer pour produire de la cémentite. Cette cémentite s'agglomère avec la ferrite précédente pour donner la perlite. En fin de refroidissement on peut obtenir trois cas d'aciers.

1. Acier eutectoïde (0,77 %C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 %C.

2. Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)

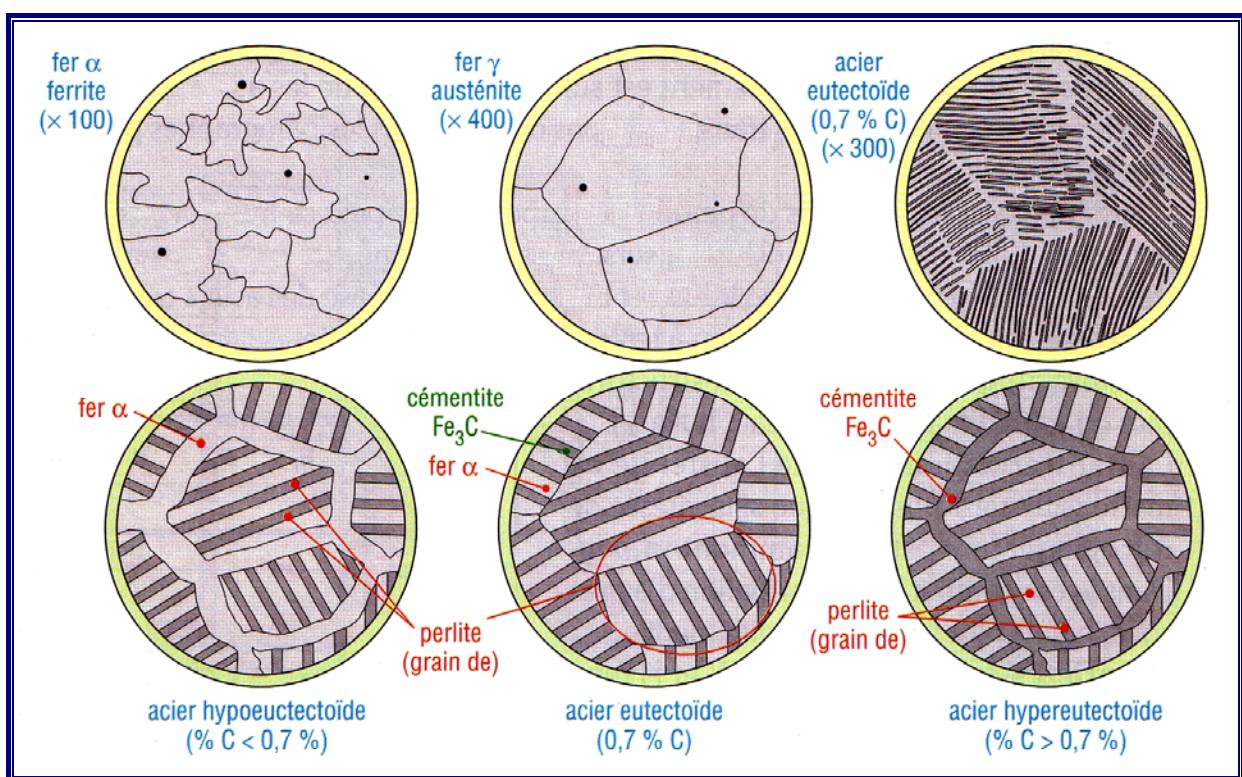
Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial.

Exemples : un acier à 0,4 %C contient 45 % de perlite et 55 % de ferrite un acier à 0,6 %C contient 79 % de perlite et 21 % de ferrite...

3. Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la cémentite. Tout le carbone initial ne pouvant être dissous et consommé par la perlite, les atomes restants s'amalgament avec le fer pour former de la cémentite, dans des proportions qui sont fonction du pourcentage de carbone initial.

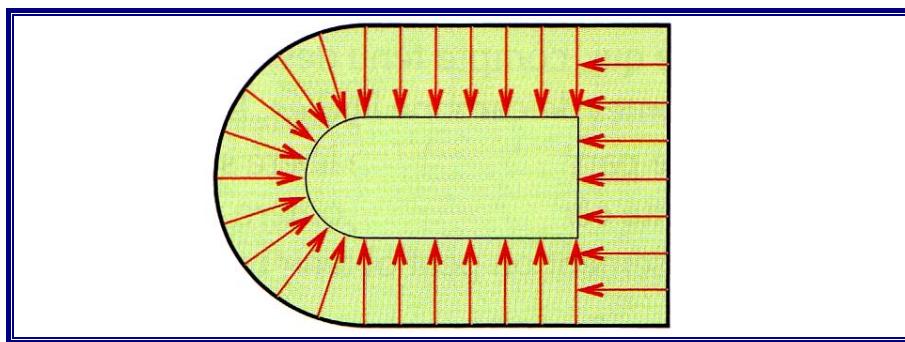
Exemples : un acier à 1,2 %C contient 6 % de cémentite et 94 % de perlite ; un acier à 1,4 %C contient 9,5 % de cémentite et 90,5 % de perlite...



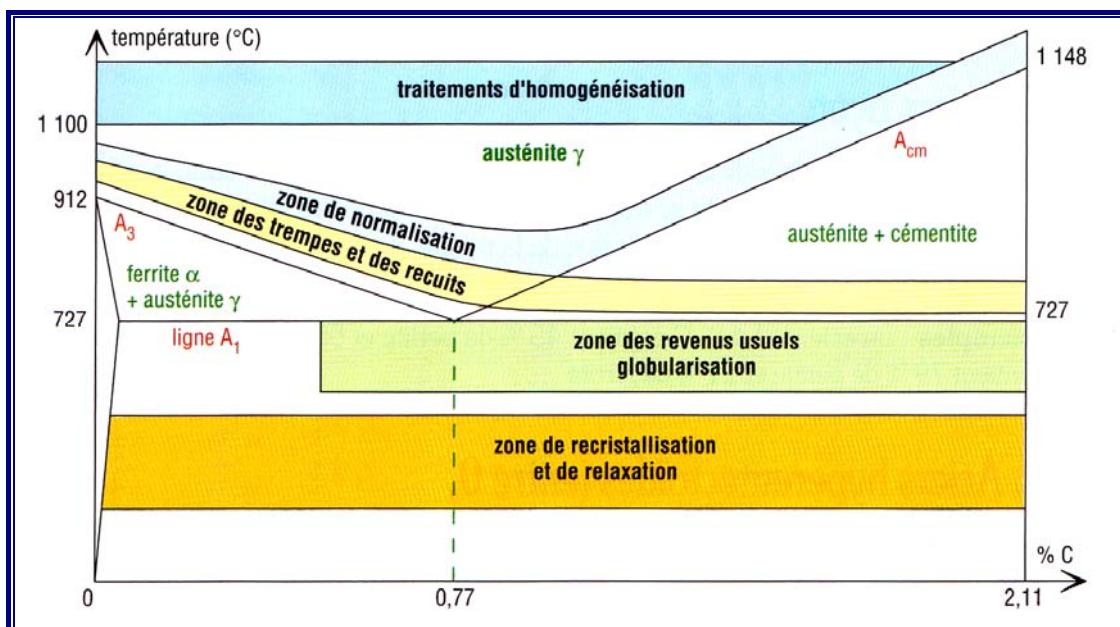
2. Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone (grossissement x 400).

IV - Traitements thermiques dans la masse

La structure et les propriétés mécaniques (R_r , R_e , H , $A\%$, K) des aciers peuvent être modifiées par un chauffage suivi d'un refroidissement à durée contrôlée. Ce sont les traitements thermiques dans la masse trempes, revenus et recuits. Les transformations sont effectuées près des lignes A_1 , A_3 et A_{cm} du diagramme fer carbone.



3. Dans le cas des traitements thermiques dans la masse (trempe, revenu, recuit...), le traitement évolue de la surface jusqu'au cœur de la pièce.



4. Traitements thermiques des aciers et diagramme fer carbone ou fer cémentite (Fe – Fe₃C).

1. Trempe, ou durcissement par trempe

a) Principe

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations décrites dans les paragraphes précédents n'ont plus le temps de se réaliser.

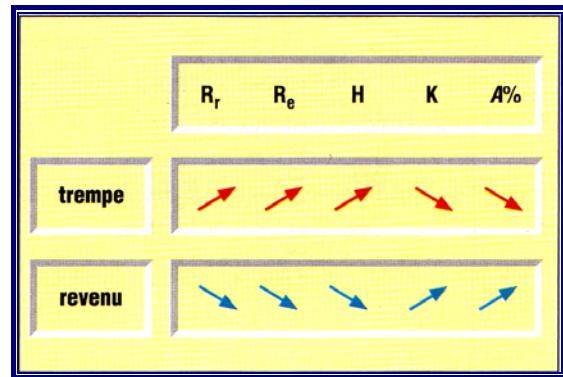
L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite. La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, HB =750, et très fragile). C'est le constituant de base des aciers trempés.

Procédé : on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénitisation suivi d'un maintien en température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (eau, huile...).

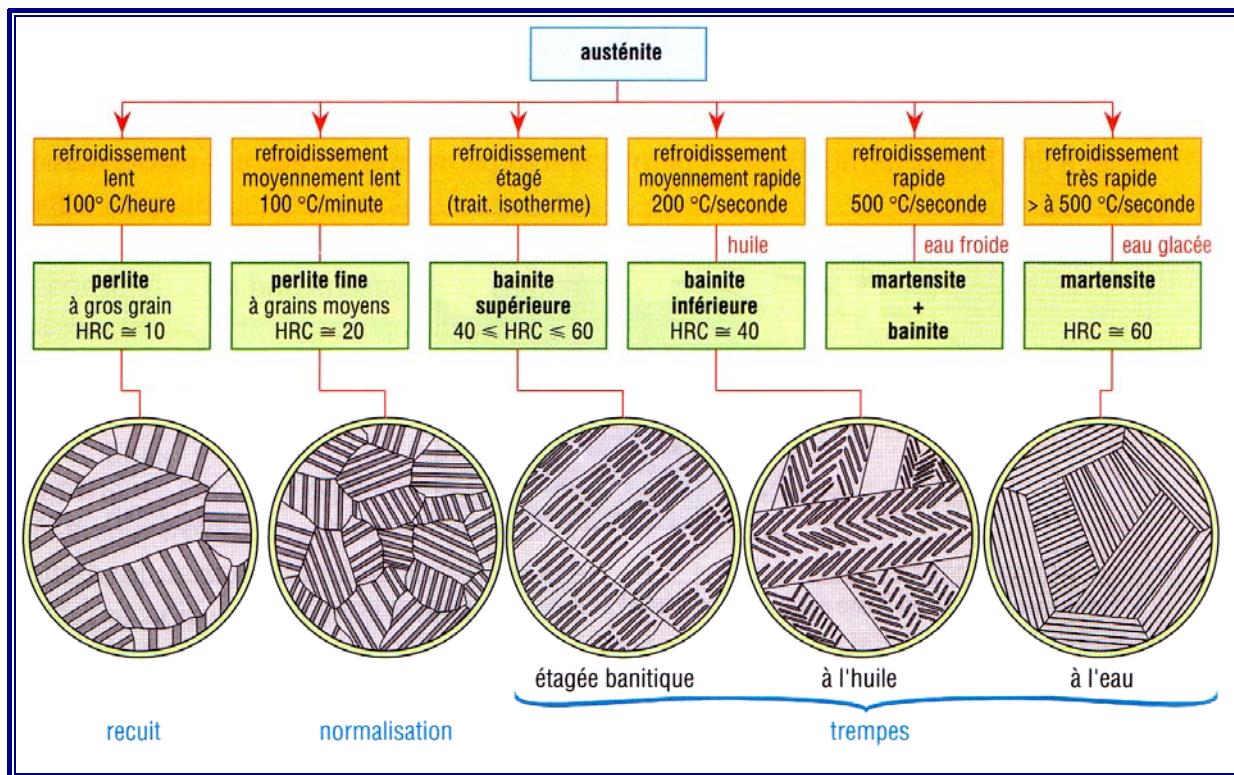
La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide.

Dans le cas contraire il y a formation d'autres constituants plus tendres : bainite, perlite...

Propriétés : elle augmente R_r , R_e et H mais diminue K et $A\%$. Elle amène aussi l'apparition de tensions internes génératrices de criques et de déformations.



5. Évolution des caractéristiques après trempe ou revenu.



6. Constituants des aciers suivant la vitesse de refroidissement cas de l'acier eutectoïde à 0,77 % C.

Hypertrempe : elle se produit chaque fois que la température de trempe est trop élevée. La conséquence est la persistance, après refroidissement, d'une grande quantité d'austénite résiduelle adoucissant l'acier.

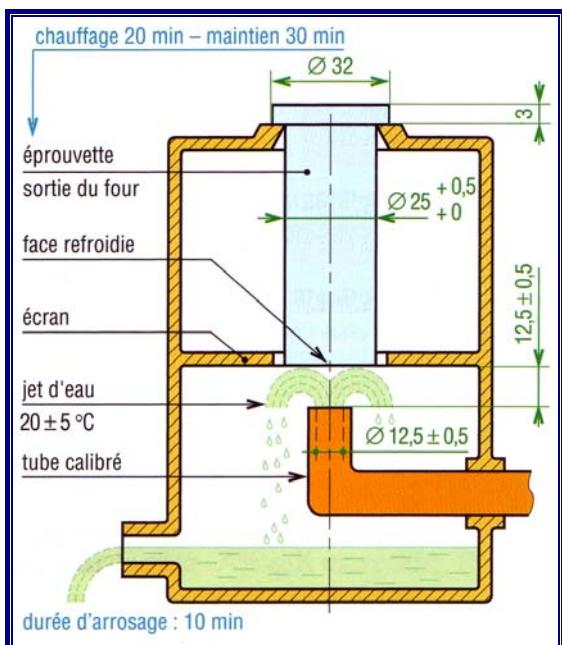
b) Trempes étagées

Si une trempe classique, refroidissement en une seule opération, est trop brutale (risques de déformations et de fissurations des pièces) on pratique une trempe étagée avec refroidissement en plusieurs étapes. Les trempes étagées martensitique et bainitique sont les plus utilisées.

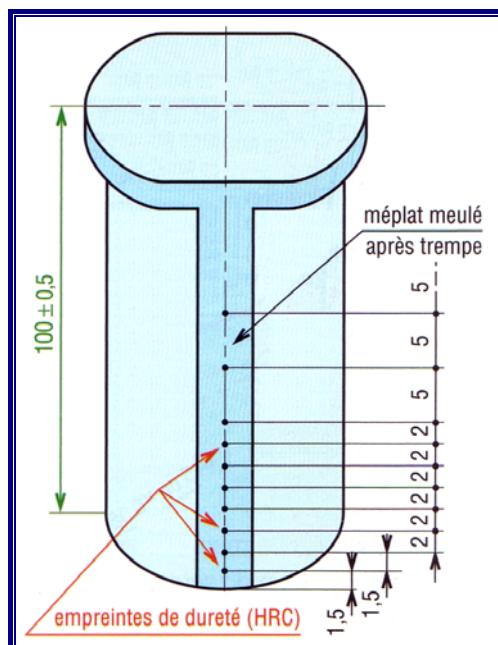
c) Recommandations pour la conception des pièces trempées

Eviter les arêtes vives, les brusques variations d'épaisseurs ou de sections (à l'origine de contraintes résiduelles, criques, fissures...). Ne pas perdre de vue que la transformation de l'austénite en martensite s'accompagne d'un accroissement de volume de 4 %.

d) Trempabilité



7. Essai Jominy de trempabilité. NE EN ISO 642.

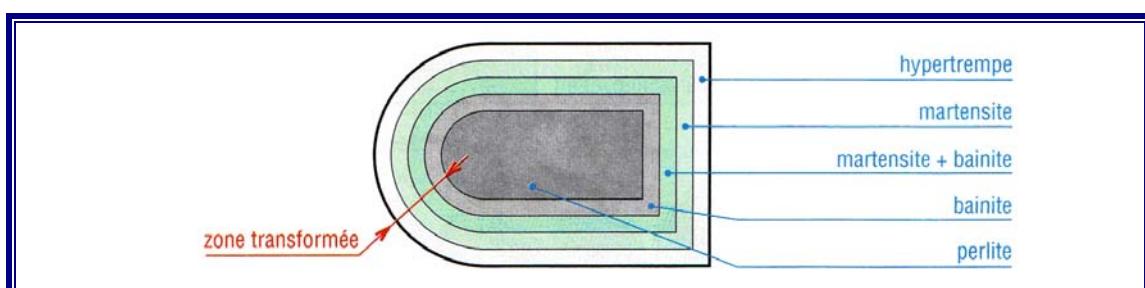


8. Éprouvette Jominy avec préparation et mesures, après trempe.

Elle est mesurée par l'essai normalisé Jominy.

Lorsque les pièces sont massives elles sont difficiles à refroidir rapidement dans leur totalité.

L'intérieur de la pièce, refroidi en dernier, plus lentement, est le plus difficile à tremper. Un acier a une bonne trempabilité s'il permet la trempe, même à coeur, des pièces massives.



9. Nature des constituants d'une pièce massive dans le cas d'une pénétration de trempe difficile.

Cas des aciers au carbone non alliés, de type C ou XC : leur trempabilité varie du médiocre au mauvais si le pourcentage de carbone (%C) diminue.

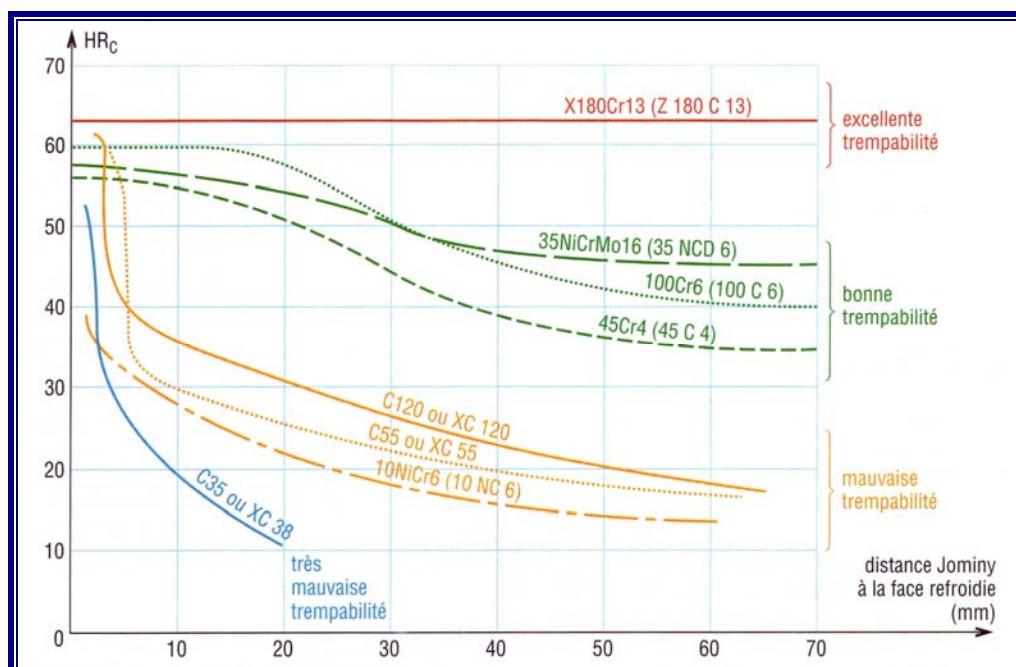
Entre 0,4 et 0,7 %C la pénétration de la trempe se limite à une profondeur de 20 mm environ. Ceux au-dessous de 0,35 %C ne sont pas considérés comme trempables.

Les pourcentages les plus favorables, de 0,35 à 0,7 %C, permettent une certaine dureté tout en conservant une ductilité et une résilience acceptables. Au-dessus de 0,7 %C les aciers, assez délicats à mettre en oeuvre, sont moins utilisés. Les refroidissements rapides créent des contraintes internes très élevées, causes de cernes, fissurations et déformations.

Les aciers XC sont plutôt utilisés pour des pièces « petites », de faibles volumes, ou minces.

Cas des aciers alliés : leur trempabilité est nettement supérieure aux précédents. Les éléments d'addition permettent, à résultat égal, de diminuer notablement les vitesses de refroidissement (vitesses critiques de trempe). Cette propriété favorise la pénétration de la trempe en profondeur. De plus, après un revenu, ces aciers peuvent avoir une bonne résilience, ce qui est impossible avec les aciers au carbone (de type C ou XC...).

Les éléments d'addition qui augmentent le plus la trempabilité sont : le bore, le manganèse, le molybdène, le chrome, le silicium, et le nickel.



10. Courbes de trempabilité de quelques aciers.

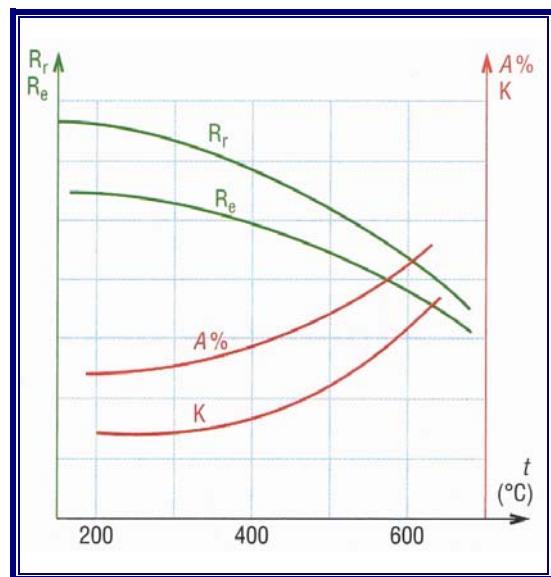
2. Revenu

a) Principe

Après trempe, la martensite, très dure et très fragile, est pratiquement inutilisable en l'état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques (R_t , R_e , H), on pratique un revenu.

Procédé : il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage, à température inférieure à 700 °C, suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent et contrôlé. Le traitement permet d'amener les caractéristiques mécaniques au niveau souhaité.

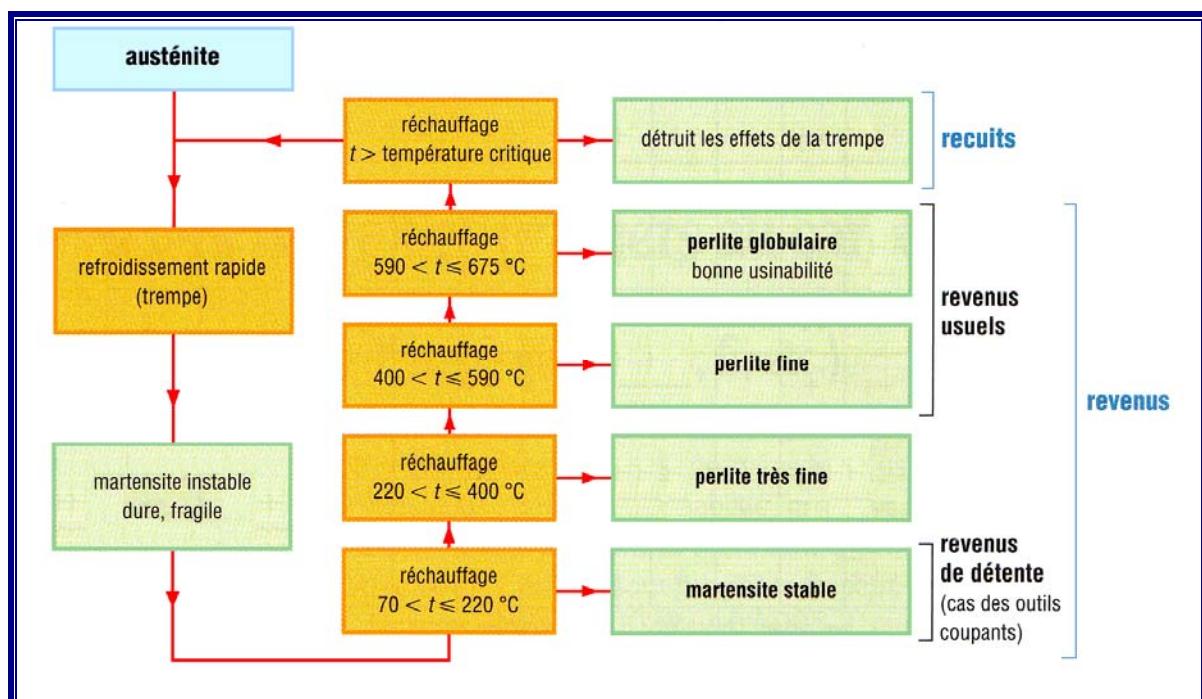
Propriétés : augmentation de K et de A% ; atténuation des contraintes internes. Inconvénients: diminution de H, de R_r et R_e . Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.



11. Évolution typique des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu.

b) Principaux revenus

Un réchauffage jusqu'à 220 °C élimine les contraintes internes et est pratiquement sans effet sur la dureté. Un accroissement de la température amènera un adoucissement de plus en plus grand du métal, une dureté plus basse et une plus grande ductilité. Les températures de revenu les plus usuelles sont comprises entre 500 et 675 °C.



12. Structure schématique des aciers après trempe et revenu.

3. Recuit

a) Principe

Son effet est inverse de celui de la trempe. Le métal est amené au maximum de ses caractéristiques de ductilité : A% et K maximales, R_r et H minimales. La structure obtenue, perlite et ferrite, présente une meilleure usinabilité.

Procédé : Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénitisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

b) Différents recuits

- Recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée.
- Recuit de régénération il affine et uniformise le grain du métal.
- Recuit de détente il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage.
- Recuit de recristallisation : pour les aciers forgés ou écrouis.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en faisant disparaître les constituants les plus durs.

Sur le plan industriel une même opération de recuit peut englober les caractéristiques des cinq cas précédents.

V - Influence des éléments d'addition

Ajoutés en quantité suffisante, ils augmentent plus ou moins fortement la trempabilité et ont également une influence sur les caractéristiques mécaniques (R_r, H, A%, K), la résistance à la corrosion, la soudabilité, la coulabilité, la forgeabilité, l'usinabilité, le magnétisme...

La solubilité, pourcentage de dissolution admissible, dépend de la structure du fer.

Symboles métallurgiques pages 10.

Aluminium : désoxydant, il diminue le grain et augmente légèrement la trempabilité.

Il est l'élément d'addition des aciers de nitruration.

Bore : améliore la trempabilité des aciers à pourcentage de carbone faible et moyen.

Chrome : élément qui augmente le plus la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

Cobalt : permet une grande dureté à chaud par durcissement de la ferrite.

Manganèse : neutralise la fragilité engendrée par les sulfures et augmente fortement la trempabilité.

Molybdène : augmente fortement la trempabilité, favorise un grain plus fin, neutralise en partie la fragilité due à la trempe, augmente la résistance et la dureté à chaud, la résistance à l'abrasion, la résistance à la corrosion des aciers inoxydables.

Nickel : renforce la résistance des aciers non trempés ou recuits, rend plus résilients les aciers ferritiques-perlitiques, surtout aux basses températures, rend austénitiques les aciers ayant un pourcentage de chrome élevé.

Phosphore : renforce la résistance des aciers à bas pourcentage de carbone.

Plomb : (0,15 à 0,35%) : améliore l'usinabilité.

Silicium : utilisé comme désoxydant, c'est l'élément d'alliage des aciers évocation électrique (diminution du magnétisme). Il améliore la résistance des aciers faiblement alliés et la trempabilité des aciers sans trace de graphite.

Soufre : considéré en général comme une impureté (formation de sulfure de fer entraînant des ruptures).

Tungstène : entraîne la formation de particules très dures et très résistantes à l'abrasion (acières à outil) et améliore la dureté et la résistance à température élevée. **Vanadium** : favorise un grain plus fin, augmente la trempabilité, s'oppose fortement à la détrempe pendant le revenu.

élément	symbole chimique	tremperabilité	durcissement à la ferrite	revenu ou détrempe	R _r et dureté	A % (ductilité)	K (résilience)	soudabilité	forgeabilité	usinabilité	magnétisme	solubilité	
												dans le fer α (en %)	dans le fer γ (en %)
chrome	Cr	++	+	-	++	-	+	-	-	+	++	∞	12,8 20 si 0,5 C
cobalt	Co	-	+++		+		+		+	++		75	∞
manganèse	Mn	+++	++		++	+	+	+	+			3	∞
molybdène	Mo	+++	+	-	++	+	+	+	+		+	3,5	3 ± 8 avec 0,3 C
nickel	Ni	++	+		+	+	+		+	-	-	10	∞
phosphore	P	+	++		+	-			+			2,8	0,5
silicium	Si	++	+		+	-		-	-	-	-	18,5	2 ± 9 avec 0,35 C
titane	Ti	++			+	+	+		+		+	6	0,75 1 avec ± 0,2 C
tungstène	W	+++		-	+	+	+			++	+	33	6 11 si 0,25 C
vanadium	V	+++	+	--	+	+	+	+	+			∞	1 4 si 0,2 C

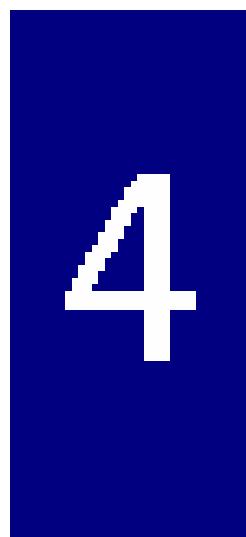
+++ : très favorable

++ : assez favorable

+ : favorable

- : négative

-- : très négative



ACIERS ET FONTES

OBJECTIFS

- Indiquer et décrire les principales familles d'acières et de fontes.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées (AFNOR).

Les aciers sont des matériaux contenant en masse plus de fer que tout autre élément et dont la teneur en carbone est inférieure à 2 % (ou 2,1 %), limite courante les séparant des fontes. La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'acières les aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6 % ; sauf 1,65 % pour Mn), les aciers inoxydables (10,5% de chrome minimum et 1,2 % de carbone maxi) et les autres aciers alliés.

De prix compétitif, mieux adaptées au moulage que les aciers, du fait d'une plus grande fluidité à chaud et de températures de fusion inférieures ($\simeq 1200$ °C contre 1500 °C), les fontes sont régulièrement utilisées. L'ordre des paragraphes prend en compte la désignation des matériaux.

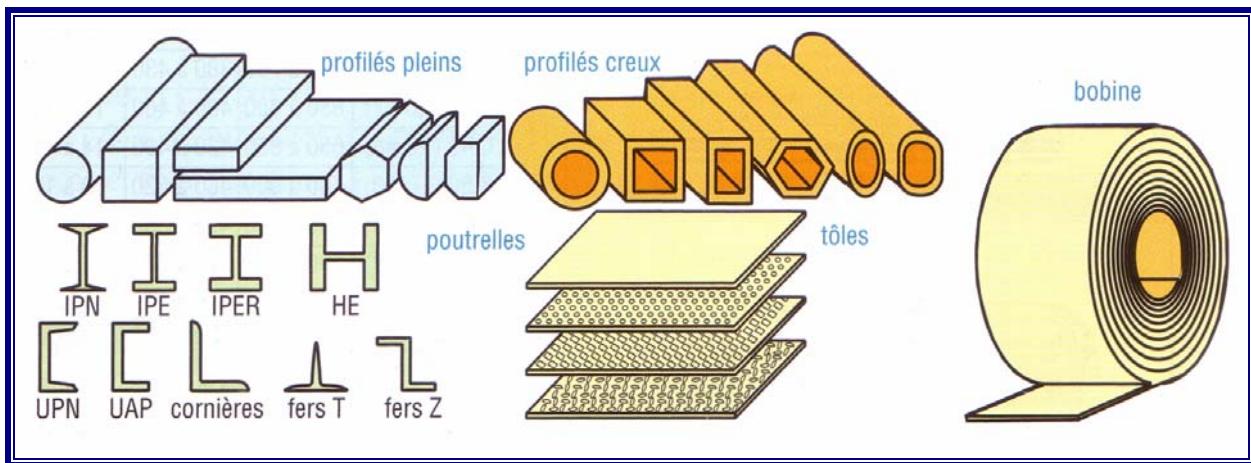
I - Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)

1. Aciers non alliés d'usage général (S, E, etc.)

Caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses (JR, JO, J2, K2...) et des variantes réservées à des usages particuliers (moulage, soudage...).

Propriétés spécifiées : ténacité, formabilité, grosseur de grain...

La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fin : prélaqués, galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Normes : NF EN 10027 A02-005-3, etc.



1. Laminés marchands.

Applications (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...): carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plate-forme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

a) Désignation normalisée

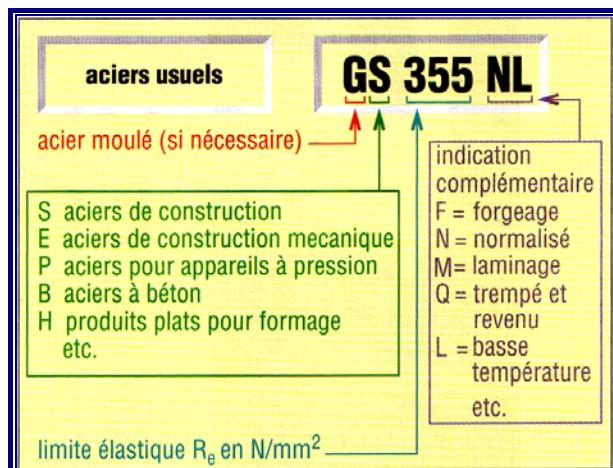
Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique

à la traction R_e en MPa ou N/mm². S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G.

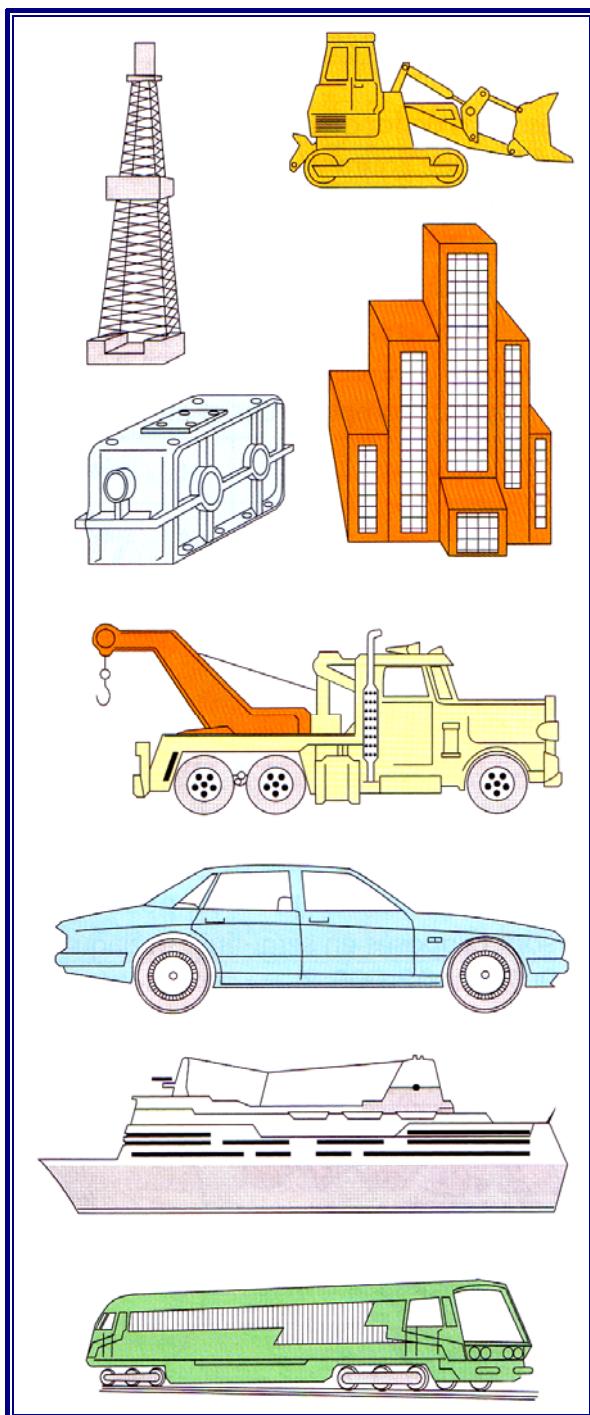
Exemple : GE 335, GS 235, etc.

b) Principales nuances normalisées

Remarques : les valeurs de R_t , R_e , A % et KV indiquées varient d'une qualité à l'autre, dépendent des procédés de fabrication, des traitements, des épaisseurs d'un produit à l'autre.



2. Désignations des aciers au carbone.



Principaux aciers non alliés (1 Mpa = 1 N/mm ²)				
nuances normalisées	R _r MPa	R _e MPa	A %	KV (J) mini
acières de construction				
S 185 (A 33)	290 à 540	175 à 185	8 à 18	
S 235 (E 24)	320 à 510	175 à 235	15 à 26	23 à 27
S 275 (E 28)	380 à 580	205 à 275	12 à 22	23 à 27
S 355 (E 36)	450 à 680	275 à 355	12 à 22	23 à 40
acières de construction mécanique				
E 295 (A 50)	440 à 660	225 à 295	10 à 20	27 à 39
E 335 (A 60)	540 à 770	255 à 335	6 à 16	27 à 39
E 360 (A 70)	640 à 900	285 à 360	3 à 11	27 à 39
pour cémentation				
C 20C (XC 18)	470 à 650	290 à 340	20 à 22	50
pour trempe + revenu et pour forgeage				
C 25 (XC 25)	500 à 700	320 à 370	19 à 21	45
C 30 (XC 30)	550 à 750	350 à 400	18 à 20	40
C 35 (XC 38)	600 à 780	380 à 430	17 à 19	35
C 40 (XC 42)	630 à 800	400 à 460	16 à 18	30
C 45 (XC 48)	650 à 850	430 à 490	14 à 16	25
C 50 (XC 50)	700 à 900	460 à 520	13 à 15	–
C 55 (XC 55)	750 à 950	490 à 550	12 à 14	–
C 60 (XC 60)	800 à 990	520 à 580	11 à 13	–
pour trempe superficielle				
C 40 (XC 42 TS)	dureté de la couche trempée ≈ 55 HR _C			

3. Exemple d'objets utilisant des aciers au carbone.

(Entre parenthèses ancienne désignation).

2. Aciers spéciaux, non alliés, de type C

Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes, ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité (Mn < 1 % ; Cr + Ni + Mo < 0,63 %).

a) Désignation

Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires (E = teneur en souffre, C = fromage à froid, S = ressort, D = tréfilage...).

Exemple : GC 35 E (0,35 % de carbone, G = acier moulé, E = teneur maxi en souffre).

b) Principales nuances normalisées

Les caractéristiques mécaniques varient selon les traitements et les dimensions (voir tableau p. 47).

- **Aciers à faible teneur en carbone (< 0,3 %)** : ils sont réservés à la cémentation et aux traitements de surface (catégorie des aciers "doux").
- **Aciers à teneur moyenne en carbone (0,3 à 0,5 %)** : ils sont utilisés pour les trempes et les revenus, dans le cas d'applications exigeant une plus grande résistance et une certaine tenue à l'usure (catégorie des aciers "mi-dur").

Applications : pièces moulées et forgées, arbres, axes, engrenages, visserie...

- **Aciers à haute teneur en carbone (> 0,5 %)** : ils sont employés pour des applications exigeant : grandes duretés, hautes résistances, tenue à l'usure. Ils ont tendance au gauchissement et aux déformations après trempe. Ils perdent leurs propriétés aux hautes températures. Ne durcissant pas en profondeur ils sont surtout utilisés pour des pièces « petites » en volume, ou minces.

Exemples de nuances : C 55 (XC 55) ; C 60 ; C 65 ; C 70 ; C 80 (XC 80).

Applications : pièces forgées, ressorts, lames, rasoirs, forets, matrices...

II - Aciers faiblement alliés, pour haute résistance

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5 % en masse (Mn 1 %). Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en l'état ou avec traitement.

1. Désignation normalisée

Pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000 (voir détails figure 4), plus au besoin des indications complémentaires.

Exemple : G 35 NiCrMo 16 (0,35 % de carbone ; 4 % de nickel et des traces < 1% de chrome et de molybdène, G acier moulé).

4. Désignation des aciers faiblement alliés.

2. Aciers de cémentation (% C < 0,2 %)

En plus de la cémentation, ils peuvent recevoir une trempe dans la masse : trempabilité fonction de la composition (Voir cémentation, chapitre 7 : Traitements de surface).

Classement, par résistances « sous-couche » croissantes : 10NiCr6, (20NiCrMo2–13NiCr14), (20NiCrMo7–20NiCrMo2), (16NiCrMo13–25MnCr5–20NiCr6).

10NiCr6 est un acier doux comparable à la nuance C22 mais en plus résilient.

3. Aciers pour trempe dans la masse

Ils permettent la trempe en profondeur des pièces massives, et sont beaucoup plus performants que les aciers C.

Classement par résistances croissantes possibles : 28Mn6, (20MnCr5–38Cr2–46Cr2–20NiCr6–20CrMo4), (41Cr4–30NiCr11–34CrMo4–41CrAlMo7) – (55Si7–45SiCrMo6), (42CrMo4–51CrV4–50CrMo4), (34CrNiMo6–31CrMo12–3CrNiMo8–36NiCrMo16).

Remarques : 20Mn5 est un acier mi-doux semblable au C25 en plus trempant. L'acier pour roulements 100Cr6 existe dans les variantes 100CrMn6, 100CrMo7.2, 100CrMnMo8, etc.

Principaux aciers faiblement alliés – NF EN 10083-2...										
nuances			caractéristiques mécaniques (1 daN/mm ² = 10 MPa)				pour cémentation	tremperabilité	taille des pièces	exemple d'utilisation
family	désignation	ancienne désignation	R _r (daN/mm ²)	R _e (daN/mm ²)	A% (daJ/cm ²)	KV (daJ/cm ²)				
chrome	38 Cr 2	38 C 2	60 - 95	35 - 55	14 - 17	3,5		+	P - M	②
	46 Cr 2	42 C 2	65 - 110	40 - 65	12 - 15	3,5		+	P - M	②
	34 Cr 4	34 C 4	70 - 110	46 - 70	12 - 15	4		++	P - M	②
	41 Cr 4	42 C 4	80 - 120	56 - 80	11 - 14	3,5		++	P - M	① ② ③ ⑩
	100 Cr 6	100 C 6	85 - 125	55 - 85	10 - 13	3,5		++	P - M	④ ⑤ HRc ≥ 62
nickel-chrome	10 Ni Cr 5-4	10 NC 6	60 - 115	42 - 62	10 - 12	8 - 10	●	+	P	aptitude croissance
	20 Ni Cr 6	20 NC 6	70 - 110	70 - 95	8 - 10	6 - 8	●	++	P	① ②
	13 Ni Cr 14	14 NC 11	80 - 145	65 - 90	8 - 10	7 - 8	●	+	M	③ ⑧
	30 Ni Cr 11	30 NC 11	70 - 110	45 - 70	12 - 16	7		++	M	
Ni + Cr + Mo	20 Ni Cr Mo 6-4	18 NCD 6-4	80 - 150	70 - 90	8 - 10	5 - 6	●	+++	G	① ② ⑧ ⑨
	20 Ni Cr Mo 2-2	20 NCD 2	75 - 155	60 - 95	8 - 11	5 - 7	●	++	M	① ②
	16 Ni Cr Mo 13	16 NCD 13	85 - 155	65 - 95	8 - 11	5 - 7	●	++	M	① ④
	34 Cr Ni Mo 6	35 NCD 6	80 - 140	60 - 100	9 - 13	4,5		+++	G	① ② ⑧
	36 Ni Cr Mo 16	35 NCD 16	100 - 145	80 - 105	9 - 11	4,5		++++	G	tremperable à l'air ① ② ⑧
	30 Cr Ni Mo 8	30 CND 8	90 - 145	70 - 105	9 - 12	4,5		++++	G	
chrome-molybdène	31 Cr Mo 12	30 CD 12	90 - 130	70 - 90	10 - 12	4,5		+++	G	pour nitruration
	20 Cr Mo 4	25 CD 4	60 - 100	40 - 70	12 - 16	4,5	●	++	M	soudabilité ② ③
	34 Cr Mo 4	35 CD 4	75 - 120	45 - 85	11 - 15	4,5		++	G	① ② ③ ⑩
	42 Cr Mo 4	42 CD 4	75 - 130	50 - 90	10 - 14	3,5		+++	G	① ② ③ ⑩
	50 Cr Mo 4	50 CD 4	80 - 130	55 - 90	9 - 13	3		+++	G	① ② ③
nuances diverses	51 Cr V4	50 CV 4	70 - 130	50 - 90	8 - 14	3		+++	G	⑤ ①
	41 Cr Al Mo 7-10	40 CAD 6-12	80 - 120	60 - 80	10 - 14	3		++	M	pour nitruration ⑥ ⑦
	28 Mn 6	20 M 6	50 - 75	35 - 45	19 - 21	4		+	P	soudabilité ② ⑦
	20 Mn Cr 5-5	20 MC 5	90 - 150	75 - 95	8 - 9	4 - 5	●	+	M	① ② ⑦ ⑧
	55 Si 7	55 S 7	70 - 170	50 - 130	6 - 13	4		++	P	⑤ ⑦
	45 Si Cr Mo 6	45 SCD 6	85 - 185	60 - 140	6 - 13	5		+++	P - M	⑤ ⑦
	13 Mn S 4	13 MF 4	78 - 118	54	9	4				pour décolletage
	35 Mn S 6	35 MF 6	88 - 108	74	9	3,5				

++++ : très forte

+++ : forte

++ : moyenne

+ : limitée

P : petite (Ø ≈ 50)

M : moyenne (Ø ≈ 100)

G : grosse (Ø ≈ 200)

① engrenage

② arbres, axes, tiges, leviers, fusées

③ boulonnnerie haute résistance

④ roulements

⑤ ressorts

⑥ pièces de frottement

⑦ pièces d'usures

⑧ pièces de sécurité, résistance aux chocs

⑨ basses températures

⑩ pour trempe superficielle

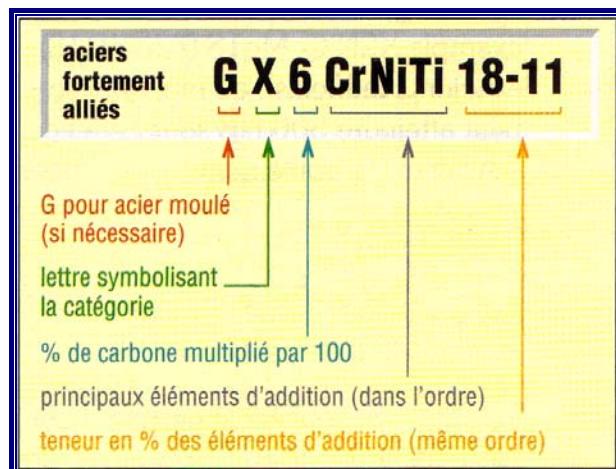
III - Aciers fortement alliés

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable...). Pour ces aciers au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5 % en masse.

1. Désignation

Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. Seule différence : pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni 10, ni 4, ...).

Exemple : GX 6CrNiTi 18-11 (0,06 %C ; 18 % de chrome ; 11 % de nickel et des traces de titane (< 1%), G pour acier moulé).



5. Désignation des aciers fortement alliés.

2. Aciers inoxydables

Famille très importante, caractérisée par une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud, au fluage et subdivisée suivant la teneur en nickel (2,5 %).

a) Aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers, les plus utilisés, sont les plus résistants à la corrosion (Ni 7 %).

Leurs caractéristiques sont : tenue aux températures élevées et à l'écaillage ; ductilité (A % élevé) ; résilience ; faciles à forger et à souder ; usinabilité médiocre. Ils peuvent être durcis par corroyage (écrouissage) mais pas par trempe. Leur degré de dilatation est élevé et leur conductibilité thermique assez basse.

Nombreuses nuances.

Applications (chimie, alimentaire, transports, nucléaire...) : pièces embouties, chaudronnées, cuves, réservoirs, armatures, conduites, vannes, visserie,...

Aciers inoxydables – extrait NF EN 10088				
nuances	Re _{0,2} (daN/mm ²)	R _r (daN/mm ²)	A %	KV (J)
(état adouci)		ferritiques		
X2CrNi12	25-28	45-60	20	-
X6Cr13	22-24	40-63	20	-
X6Cr17	24-26	40-63	20	-
X6CrMo17-1	26-28	45-66	18	-
(état adouci)		austénitiques		
X2CrNi19-11	18-22	46-68	45	90
X5CrNi18-10	19-23	50-75	45	90
X6CrNiTi18-10	19-22	50-72	40	90
X5CrNiMo17-12-2	20-24	50-70	40	90
X6CrNiMoTi17-12-2	20-24	50-70	40	90
X2CrNiMoN17-13-5	27-29	58-80	35	90
(état traité)		martensitiques		
X12Cr13	40-45	55-85	15	25
X20Cr13	45-60	65-95	12	20
X30Cr13	60-65	80-100	10	20
X3CrNiMo13-4	65-80	78-110	12	50
(état traité)		durcis par précipitations		
X5CrNiCuNb16-4	79	96-116	12	40
X5CrNiMoCuNb14-5	86	99-120	10	40

b) Aciers inoxydables ferritiques

Ils sont toujours ductiles, ne durcissent ni par trempe ($C < 0,08 \%$) ni par écrouissage : ils sont faciles à étirer, former, plier, forger, rouler ($Ni < 1 \%$).

Propriétés : les plus économiques, usinabilité médiocre, soudabilité moyenne ; peu résilients et faible résistance à la rupture (R_f) sous températures élevées.

Applications : équipements ménagers, décoration intérieure, automobiles, mobiliers...

c) Aciers inoxydables martensitiques ($0,08 \leq C \leq 1 \%$)

Résistent aux chocs, durcissent par trempe, sont soudables à chaud, faciles à forger, ont une bonne usinabilité et de bonnes caractéristiques mécaniques à température élevée ($Ni < 7 \%$), et résistent moins à la corrosion que les précédents.

X30Cr13 existe en X12Cr13, X20Cr13, X39Cr13, X46Cr13 et X12CrS13.

Applications : composants divers (toutes industries), couteaux, ressorts...

d) Aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Comme les martensitiques en plus résistants à la corrosion.

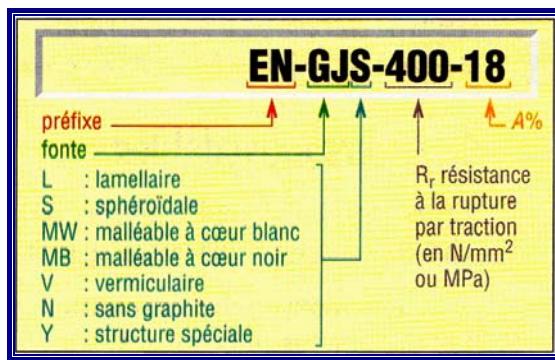
3. Autres familles

- Aciers à outils : aciers rapides ; exemples : X160CrMoV12 (Z160CDV12) ; HS 6-5-3-8.
- Aciers réfractaires : pour hautes températures ; exemples : X12NiCrSi35–16, X8CrNi25–11 (austénitiques) ; X10CrAlSi13, X18CrN28 (ferritiques)...
- Aciers Maraging : très hautes résistances pour l'aéronautique, R_f proche de 200 daN/mm² ; exemple : X2NiCoMo18 (Z2NKD18).
- Aciers Hadfields : au manganèse ; très grande résistance à l'usure la dureté superficielle peut atteindre 500 HB sous l'effet des chocs ; exemple X120Mn12 (Z120M12).
- Aciers pour roulements, pour appareils à pression...

IV - Fontes

Leur grande coulabilité permet d'obtenir des pièces de fonderie aux formes complexes.

A cause du pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent, entre 2 et 4 %, elles sont en général assez fragiles, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) et difficilement soudables.



6. Désignation des fontes NF EN 1560.

1. Fontes à graphite lamellaire EN-GJL (ex. « FGL »)

Les plus économiques, les plus utilisées, ce sont les fontes de moulage par excellence. Le carbone se présente sous forme de fines lamelles de graphite qui lui donne une couleur « grise ».

Propriétés : bonne coulabilité ; bonne usinabilité grande résistance en compression et grandes capacités d'amortissement des vibrations. Norme NF EN 1561.

Applications : bâtis de machine, supports, carters, blocs-moteurs...

2. Fontes à graphite sphéroïdal EN-GJS (ex. « FGS »)

Ce sont les plus utilisées après les fontes à graphite lamellaire, obtenues par addition de petites quantités de magnésium juste avant moulage ; le graphite s'agglomère pendant le traitement sous forme de nodules ou sphères. Norme NF EN 1563.

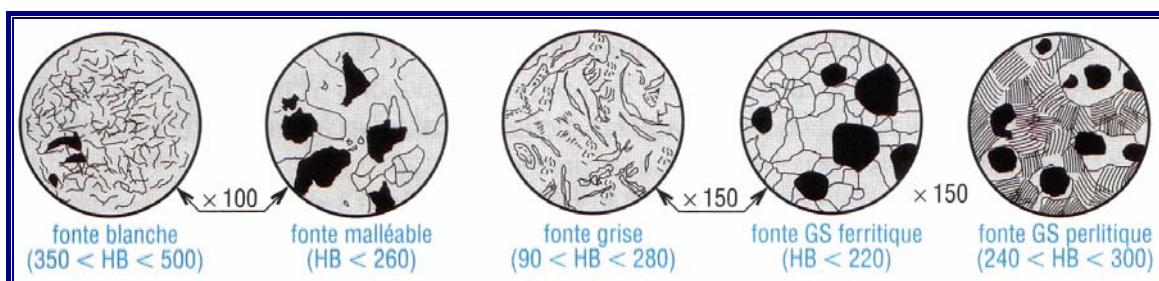
Propriétés : ductilité, résilience et usinabilité.

Applications : vilebrequins, arbres de transmission, pièces de voirie, tuyauteries...

3. Fontes malléables EN-GJMW et GJMB (ex « FMB et FMN »)

Elles sont obtenues par malléabilisation de la fonte blanche (paragraphe 4) – sorte de recuit – et ont des propriétés mécaniques voisines de celles de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables.

Applications : carters, boîtiers... NF EN 1562.



7. Microstructures des fontes usuelles.

4. Autres familles

Fontes blanches (FB) : à base de perlite et de cémentite (carbures Fe_3C), elles sont très dures, fragiles, résistantes aux frottements, à l'abrasion et aux températures élevées. Difficiles à usiner, les applications sont limitées.

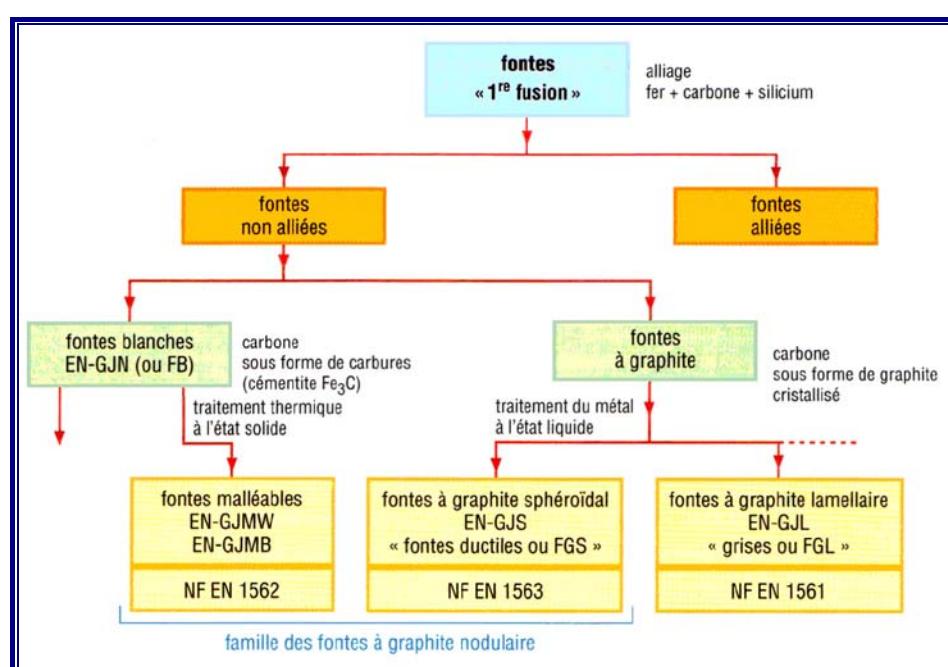
Fontes alliées : elles peuvent être à graphite lamellaire, sphéroïdal ou blanches (EN-GJN) et sont destinées à des usages particuliers.

Principaux éléments d'addition : nickel, cuivre, chrome, molybdène et vanadium.

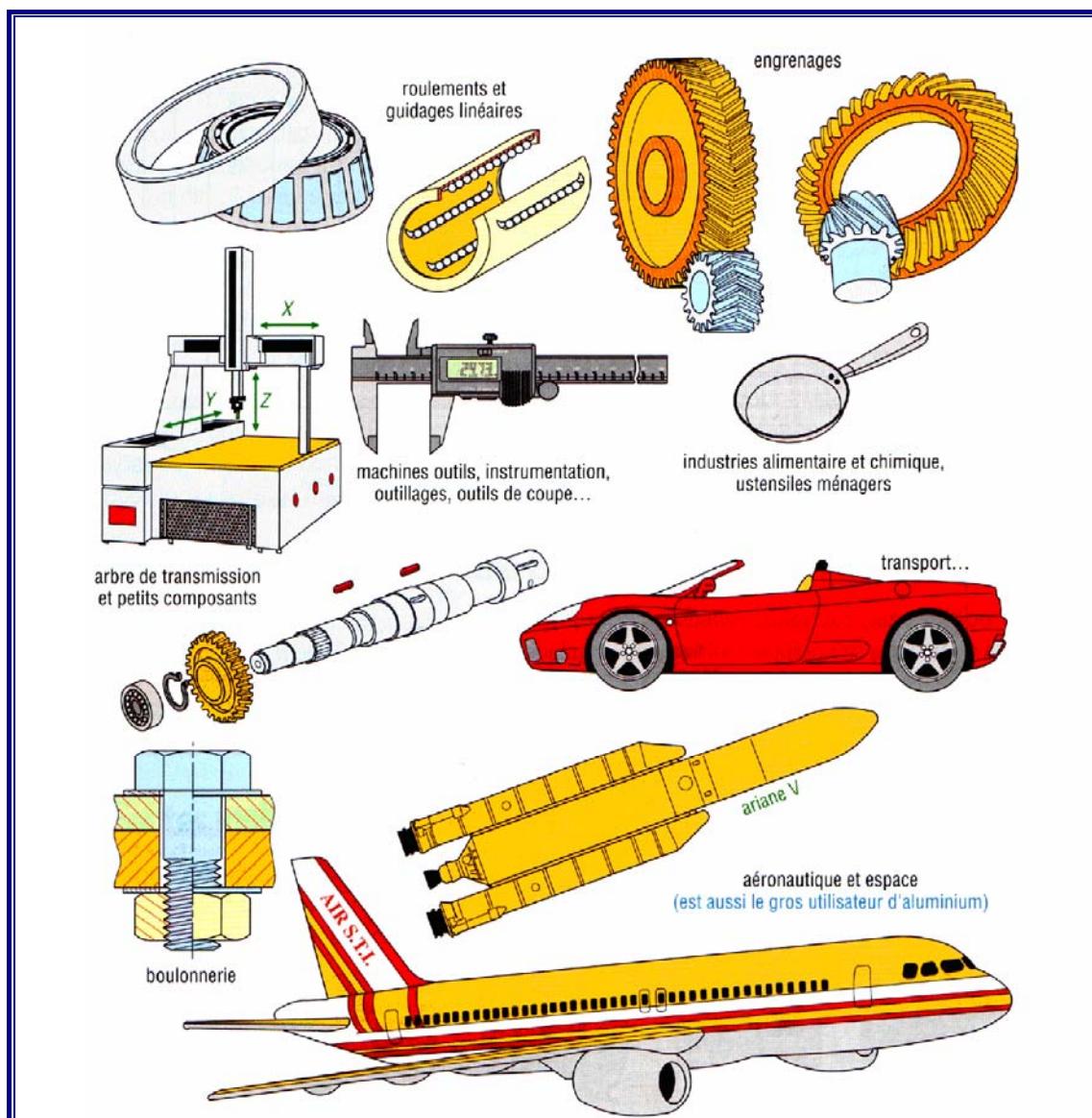
Ces éléments contrôlent plus ou moins la formation du graphite et développent des propriétés particulières.

Fontes alliées					
	éléments d'addition	matrice	HB	A%	propriétés caractéristiques
GJL ou GJS	Ni - Mo (Cr)	bainite 350	250 350	1-2	résistance mécanique résistance à l'usure
	Ni - Cr (Mo)	martensite 500	350	< 1	capacité d'amortissement
	Ni-Si ou Ni-Si (Cr)	austénite 250	120 250	12-25	résilience résistance aux hautes et basses températures
	Si ou Si - Mo	ferrite 340	180 340	1-10	résistance à l'oxydation et déformations à $T^{\circ}C$
GJN («FB»)	Ni - Cr ou Cr (11 à 28 %)	carbures martensite austénite 800	450 800	-	résistance à l'abrasion et à l'oxydation
	Cr (28 à 34 %)	ferrite 500	200 500	-	résistance aux températures élevées et à la corrosion

Principales fontes					
désignation normalisée	R_e (daN/mm ²)	R_t (daN/mm ²)	E (GPa)	HB dureté	A%
fontes à graphite lamellaire					
EN-GJL 150	10	15	80	160	0,8
EN-GJL 200	13	20	100	190	à
EN-GJL 250	17	25	110	210	0,3
EN-GJL 300	20	30	120	230	↓
EN-GJL 350	23	35	130	260	
EN-GJL 400	26	40	140	290	↓
fontes à graphite sphéroïdal					
EN-GJS 400-15	25	40	165	170	15
EN-GJS 500-7	32	50	↑	210	7
EN-GJS 600-3	37	60	168	230	3
EN-GJS 700-2	42	70	↓	260	2
EN-GJS 800-2	48	80	↓	300	2
EN-GJS 900-2	60	90	170	330	2
cœur blanc EN-					
fontes malléables					
GJMW 360-12	19	38	↑	200	12
GJMW 400-10	22	40	↑	220	5
GJMW 450-7	26	45	↑	220	7
cœur noir EN-					
GJMB 350-10	20	35	↑	150	10
GJMB 380-18	25	38	↑	150	18
GJMB 450-6	27	45	170	180	6
GJMB 550-4	34	55	↑	210	4
GJMB 650-2	43	65	↑	240	2



éléments (teneur en %)	Principales fontes : teneur en %				
	fontes à graphite lamellaire (EN-GJL)	fontes à graphite sphéroïdal (EN-GJS)	fontes malléables		fontes blanches (EN-GJN)
carbone	2,5 – 4,0	3,0 – 4,0	fontes à cœur noir (EN-GJMB)	fontes à cœur blanc (EN-GJMW)	1,8 – 3,6
silicium	1,0 – 4,0	1,8 – 2,8	0,9 – 1,7	0,6 – 0,9	0,3 – 2,6
manganèse	0,2 – 1,0	0,1 – 1,0	0,25 – 0,65	0,2 – 0,45	0,2 – 1,5
soufre	0,02 – 0,1	< 0,03	0,06 – 0,25	0,08 – 0,2	0,06 – 0,2
phosphore	0,04 – 1,0	< 0,10	0,08 – 0,25	0,05 – 0,2	0,06 – 0,18
structure dominante de la matrice	<ul style="list-style-type: none"> – ferrite – perlite + ferrite – perlite – perlite + carbures 	<ul style="list-style-type: none"> – ferrite – perlite + ferrite – perlite + bainite – perlite + ferrite + martensite 	ferrite	ferrite	<ul style="list-style-type: none"> – perlite – cémentite
			perlite pour la structure perlitique MP		



8. Exemple d'objets utilisant des aciers faiblement et fortement alliés ainsi que des fontes alliées.



MÉTAUX NON FERREUX

5

OBJECTIFS

- Indiquer et décrire les caractéristiques des principaux métaux non ferreux et de leurs alliages.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées (AFNOR).

Les principales familles, avec leurs alliages sont l'aluminium, le cuivre, le magnésium, le zinc, le titane et le nickel.

La plupart de ces matériaux sont commercialisés sous plusieurs formes ou dans des états métallurgiques différents (brut, recuit, écroui, durci), l'utilisateur choisissant l'état de livraison qui lui convient.

I - États métallurgiques

Les états métallurgiques, « ou de livraison », sont normalisés pour certains alliages.

Leur désignation est effectuée par une lettre (F, O, H, W ou T) suivi par un ou plusieurs chiffres. Le premier chiffre indique un cycle de traitements thermiques ou mécaniques (écrouissage...), les chiffres suivants précisent les variantes possibles du cycle.

Les remarques sont les mêmes dans le cas des pièces moulées.

Normes : NF EN 515 ; NF EN 1173 ; NF A 57-702...

Exemple : EN AC [Al Si 7 Mg] Y33 (A-S7G moulé en coquille, trempé et revenu).

États métallurgiques de base		Subdivisions de l'état T	
F = État brut de fabrication O = État recuit H = État écroui T = Traitement thermique autre que F, O ou H W = Pour Al, mis en solution (trempé)		aluminium et alliages	
		T3 = mise en solution + écroui + mûri T4 = mise en solution + mûri T5 = refroidi (après transf. à chaud) + revenu T6 = mise en solution + revenu T8 = mise en solution + écroui + revenu T10 = refroidi (après transformation à chaud) + revenu + écroui	
États de livraison des produits non ferreux moulés			
symbole	procédé d'obtention	Cuivre et alliages NF EN 1173	
Y0	Non défini	A : allongement (fil, EN ... -Cu-Of-A007)	
Y2	Moulage au sable	B : limite de flexion (bande EN 1654-CuSn8-B410)	
Y3	Moulage en coquille	D : brut d'étirage sans spécification (tube EN ...-Cu-ETP-D)	
Y4	Moulage sous pression	G : grosseur du grain (bande EN 1652-CuZn37-G020)	
Y5	Par frittage	H : dureté Brinell ou Vickers (tôle EN 1652-CuZn37-H150)	
Y7	En coulée continue	M : brut sans spécification (barre creuse EN 12168-CuZn36Pb3-M)	
Y8	Par centrifugation	R : résistance à la traction (barre EN 12164-CuBe2R1200)	
Y9	Suivant prescriptions	Y : limite élastique à 0,2 % (bande EN 1654-CuZn30-Y460)	
symbole	traitement	Subdivisions de l'état H	
0	Aucun traitement	état niveau de dureté	écroui seul (H1)
1	Recuit	écroui recuit (H2)	écroui stabilisé (H3)
2	Trempé	1/4 dur	H12
3	Trempé + revenu	1/2 dur	H14
4	Trempé + mûri	3/4 dur	H16
5	Stabilisé	4/4 dur	H18
6	Trempé et stabilisé		H22
9	Suivant prescriptions		H24
			H26
			H28
			H32
			H34
			H36
			H38

II - Aluminium et alliages

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les plus utilisés juste après les fontes et les aciers. Normes NF EN 485, 515, 573...

1. Principales caractéristiques

- Bas point de fusion (658 °C) ; ductilité élevée (A% 40%) assez léger (densité 2,7) bonne conductivité électrique ; bonne conductibilité thermique (5 fois celle des aciers) coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers, propriétés réfléchissantes.
- Bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports, comme l'aéronautique, par exemple.
- Résistance à la corrosion élevée. Le métal se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice, les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.
- Résistance mécanique : elle peut être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).
- Inconvénients : faibles résistances à l'usure et à la fatigue.

2. Mise en oeuvre

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés laminage, moulage, forgeage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres... L'élasticité élevée peut gêner certains usinages.

Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage.

La soudabilité dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage. Revêtements décoratifs et protecteurs par anodisation, nombreux procédés (EN 12373).

3. Traitements thermiques

Ils sont tout à fait différents de ceux des aciers. Après trempe, le durcissement est obtenu par vieillissement naturel, ou maturation, à température ambiante ou par revenu à température élevée.

Les alliages avec le cuivre, le silicium, le zinc et ceux avec le magnésium plus le silicium sont trempant ; ils sont dits avec durcissement structural.

L'aluminium pur, les alliages avec le manganèse et le magnésium ne sont pas trempants ; ils sont dits sans durcissement structural.

4. Aluminium et alliages corroyés

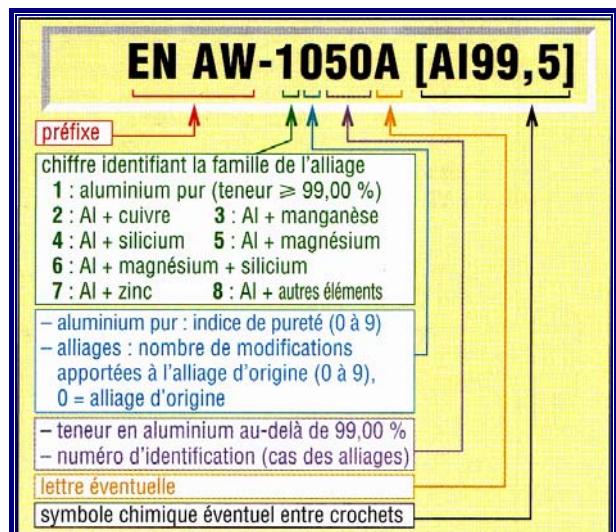
Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant (barres, profilés, tôles...).

Désignation (norme internationale) :

elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW – comme préfixe (A pour aluminium, W pour corroyé), éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets (fig. 1).

Exemple : EN AW-5086 [Al Mg 4] est un alliage d'aluminium avec 4% de magnésium

EN AW-1050A [Al 99,5] est un aluminium pur à 99,5 %.



1. Désignation des produits laminés - NE EN 573.

Aluminium et alliages : produits laminés (extrait NF EN 485-2)													
nuances		état métallurgique	caractéristiques mécaniques				résistance à la corrosion						
			R _r (daN/mm ²) mini	R _e (daN/mm ²) mini	A % maxi	E (daN/mm ²)	aptitude à l'anodisation	soudabilité à l'arc	soudabilité aux gaz + brasage	usinabilité	aptitude au travail à froid		
sans traitements thermiques (sans durcissement structural)	EN AW-1050A[Al 99,5] (1050A)	O	6,5	2	35	6 700	++	+++	+++	+++	-	+++	① ③ ⑤ ⑨
		H14	10,5	8,5	6							à	
		H18	14	12	2							+	
	EN AW-1070A[Al 99,7] (1070A et 1080A)	O	6	1,5	35		++	+++	+++	+++	-	+++	① ⑤ ⑨
		H14	10	7	7							à	
	EN AW-1080A[Al 99,8] (1070A et 1080A)	H18	12,5	10,5	2		++	+++	+++	+++	-	à	
		H18	15	13	2							+	
	EN AW-1100[Al 99,0Cu] (1100 et 1200)	O	7,5	2,5	33		++	+++	+++	+++	-	+++	① ⑫
		H14	11,5	9,5	6							à	
		H18	15	13	2							+	
	EN AW-3003[AlMn1Cu] (3003)	O	9,5	3,5	24		++	++	+++	+++	+	+++	① ③ ⑤ ⑥
		H14	14,5	12,5	5							++	
		H18	19	17	2							+	
avec traitements thermiques (avec durcissement structural)	EN AW-5005[AlMg1] (5005)	O	10	3,5	24	7 000	+++	+++	+++	+++	+	+++	① ⑤ ⑥ ⑫
		H14	14,5	12	5							+	
		H18	18,5	16,5	2							+	
	EN AW-5052[AlMg2,5] (5052)	O	17	6,5	19		+++	+++	+++	+++	+	+++	① ⑤ ⑥ ⑫
		H34	23	15	5							+	
		H38	27	21	3							+	
	EN AW-5086[AlMg4] (5086)	O	24	10	17		+++	++	+++	+++	++	+++	② ⑦ ⑩
		H22	27,5	18,5	10							+	
		H24	30	22	8							+	
	EN AW-2014[AlCu4SiMg] (2014)	O	22	14	16		-	+	++	+	++	++	② ⑦ ⑧
		T4	40	25	14								
		T6	44	39	7								
	EN AW-2017A[AlCu4MgSi] (2017)	O	22	14	13		-	++	++	+	++	++	② ④ ⑦ ⑧
		T4	39	25	15								
	EN AW-2024[AlCu4Mg1] (2024)	O	22	14	13		-	+	++	+	++	++	
		T4	43	28	14								
avec Al + zinc	EN AW-6061[AlMg1SiCu] (6061)	O	15	8,5	19	7 000	++	+++	+++	+++	+	++	⑤ ⑦ ⑩ ⑪
		T4	21	11	18							à	
		T6	29	24	10							+	
	EN AW-6082[AlSi1MgMn] (6082)	O	15	8,5	19		++	+++	+++	+++	+	++	⑤ ⑦ ⑩ ⑪
		T4	20,5	11	15							à	
		T6	31	26	10							+	
	EN AW-7020[AlZn4,5Mg1] (7020)	T4	32	21	14		++	++	++	++	++	++	② ⑥ ⑦
		T6	35	28	10							+	
	EN AW-7075[AlZn5,5MgCu] (7075)	O	28	15	10		+	++	+	+	++	++	② ④ ⑧
		T6	54	46	8							+	

(entre parenthèses : ancienne désignation) — R_r, R_e et A% varient avec la forme et l'épaisseur des profilés.

+++ : excellente

① : chaudronnerie, emboutissage

⑦ : mécanique, transport

++ : bonne

② : pièces forgées

⑧ : aéronautique

+ : moyenne

③ : pièces filées : boîtes, aérosols ...

⑨ : décoration

- : faible

④ : boulonnnerie

⑩ : marine

— : bâtiment

⑤ : chimie, alimentaire

⑪ : emballage

— : bâtiment

⑥ : bâtiment

⑫ : ustensiles de cuisine ...

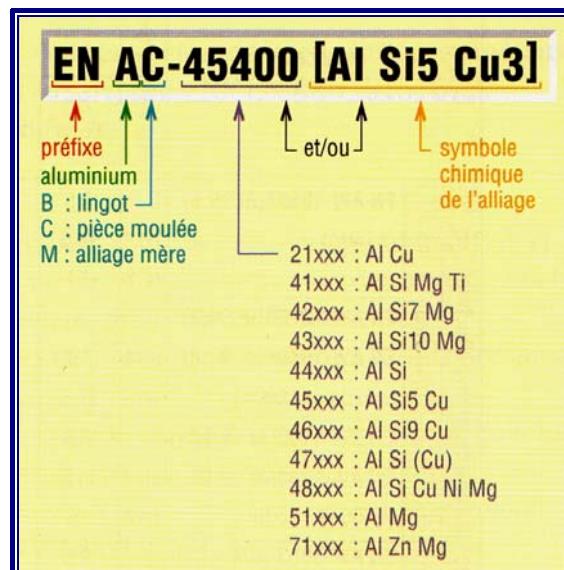
5. Aluminium et alliages pour la fonderie

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire.

Inconvénient grand retrait au moulage (3,5 à 8,5 % en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce.

Désignation : préfixe EN espace ; lettre A pour aluminium ; lettre B ou C (pièce moulée) ou M tiret ; 5 chiffres donnant la composition et/ou les symboles chimiques de l'alliage ordonnés par teneurs décroissantes.

Exemple : EN AC – 45400 ou fig. 2 ou EN AC – AlSi5Cu3 pour un alliage avec 5 % de silicium et 3 % de cuivre.



2. Désignation des produits de fonderie
NF EN 1780.

nuances	mode de coulée	caractéristiques mécaniques			aptitude au moulage	aptitude à l'étanchéité	résistance à la corrosion	usinabilité	soudabilité	aptitude à l'anodisation	exemples d'emploi
		R _r (daN/mm ²)	R _s (daN/mm ²)	A %							
EN AC-AISi12Cu NiMg (48000)	Y35	20	18	< 1	+++	+++	+	++	+++	+	travail à chaud, pistons
	Y36	28	24	< 1							
EN AC-AISi7Mg0,6 (42200)	Y26	25	21	1	+++	++	++	++	++	+	① haute résistance
	Y36	32	24	3							
EN AC-AlCu4MgTi (21000)	Y24	30	20	5	+	+	+	+++	+	++	① haute résistance
	Y34	32	20	8							
EN AC-AISi5Cu3Mn (45200)	Y26	23	20	< 1	+++	++	+	+++	++	+	① ②
	Y36	28	23	< 1							
EN AC-AISi12 (44200)	Y20	15	7	5	+++	+++	++	+	+++	+	① ③
	Y30	17	8	6							
EN AC-AISi7Mg (42000)	Y26	22	18	1	+++	++	++	++	++	+	① ③
	Y36	26	22	1							
EN AC-AlZn5Mg (71000)	Y21	19	12	4	+	+	++	+++	++	++	① ③ ⑤ ⑥
	Y31	21	13	4							
EN AC-AlMg5	Y20	16	9	4	+	+	++	+++	++	+++	①
EN AC-AISi8Cu3	Y40	24	14	1	++	++	+	++	++	+	② très utilisé
EN AC-AISi9	Y40	22	12	2	+++	+	++	+	+	+	④ ① *
EN AC-AISi12	Y40	24	13	1	+++	+	+	+	+	+	④ ①
EN AC-AISi12Cu1	Y40	24	14	1	+++	+	+	++		+	① ①
EN AC-AlMg9	Y40	20	13	1	+	+	+++	+++	++	++	⑥

Y20 : moulage sable ; Y30 : moulage coquille ; Y40 : moulage sous pression (page 169). * Très utilisé.

+++ : excellente
++ : bonne
+ : moyenne

① : pièces mécaniques diverses
② : pièces mécaniques complexes
③ : alimentaire, chimie, robinetterie

④ : appareils ménagers
⑤ : bâtiment et travaux publics
⑥ : marine

III - Cuivre et alliages

Il existe plus de 200 alliages de cuivre. Les principales familles sont : les laitons (Cu + Zn), les bronzes (Cu + Sn), les cupronickels (Cu + Ni), les cupro-aluminums (Cu + Al) et les maillechorts (Cu + Ni + Zn).

cuivre + étain	=	bronze
cuivre + zinc	=	laiton
cuivre + aluminium	=	cupro-aluminium
cuivre + nickel	=	cupronickel
cuivre + nickel + zinc	=	maillechort

3. Principaux alliages du cuivre.

alliages de cuivre	Cu Zn 27 Ni 18
symbole chimique du métal de base	
principaux éléments d'addition (dans l'ordre)	
teneur en % des éléments d'addition (dans le même ordre)	

4. Désignation des alliages du cuivre.

1. Principales caractéristiques du cuivre

Plus lourd que l'acier, de densité 8,9 fond à 1 083 °C ; grande résistance à la corrosion ; plasticité ou ductilité élevée (A % jusqu'à 50 %) ; grande conductivité électrique qui le rend indispensable dans les industries électriques et électroniques ; grande conductibilité thermique (atout pour la transmission de la chaleur) couleur rouge plus ou moins foncée devenant « jaune » avec addition de zinc.

Les cuivres et les alliages ne peuvent pas être traités thermiquement, sauf ceux au béryllium. Cependant, la résistance (R_r) peut être augmentée par écrouissage à froid et la ductilité restaurée par un revenu. La trempe augmente la plasticité (cas inverse des aciers).

2. Cuivres purs

Le cuivre utilisé pur (usages électriques, thermiques, chaudronnerie...) est soit un cuivre affiné (endurant, plus fragile, plus cassant), soit un cuivre désoxydé ou débarrassé de toute trace d'oxygène (moins fragile et très haute conductivité).

type	taux d'écrouissage (%)	R_r (daN/mm ²)	R_e (daN/mm ²)	A %	HB
recuit	0	23	7	45	50
1/4 dur	10	27	21	25	70
1/2 dur	25	30	25	14	87
4/4 dur	50	35	32	6	

6. Caractéristiques du cuivre pur.

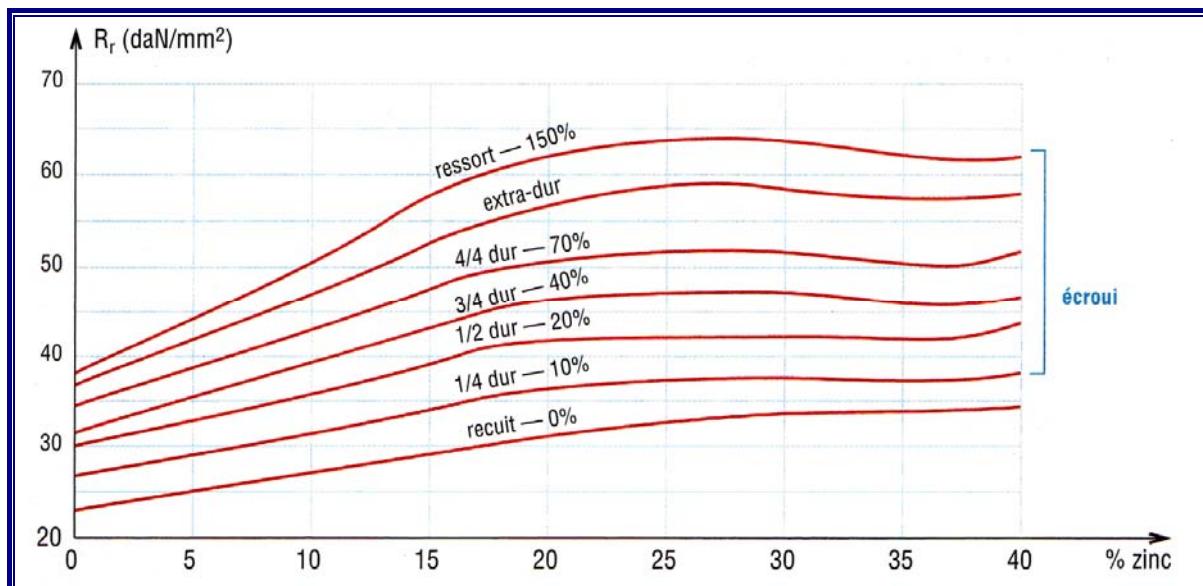
Désignations des cuivres purs, non alliés Symbole Cu + tiret de séparation + lettres d'indication	
Cu – ETP	= affiné électrolytiquement, non désoxydé, à conductivité garantie
Cu – FRHC	= affiné thermiquement, non désoxydé, à conductivité garantie
Cu – F RTP	= affiné thermiquement, à conductivité non garantie
Cu – DHP	= affiné thermiquement ou électrolytiquement, à fort phosphore résiduel
Cu – DLP	= affiné thermiquement ou électrolytiquement, à faible phosphore résiduel
Cu – OF	= désoxydé
Cu – OFE	= désoxydé, à haute pureté

3. Laitons

C'est la famille la plus utilisée. L'addition de zinc (jusqu'à 42 %) diminue le prix de base, augmente R_r et A%, ce qui favorise l'emboutissage (A % = 60 % avec 31 % de Zn), et diminue la température de fusion, ce qui facilite le moulage.

Une addition supplémentaire de plomb, de 2 à 3 %, augmente considérablement l'usinabilité. Les laitons ainsi obtenus (laitons de décolletage) servent de référence pour évaluer l'usinabilité des autres matériaux.

Alliages de cuivre : produits laminés						Alliages de cuivre : produits de fonderie							
nuances	état métall.	R_r daN/mm ²	A%	HV	emplois	nuances	état métall.	R_r daN/mm ²	R_e daN/mm ²	A%	emplois		
laitons	Cu Zn 10 (CW 501 L)	H11	27 - 34		67 - 95 118 - 135	(1)	cupro-aluminiums	Cu Al 10 Fe 2 (CC 331 G)	Y 20	50	18	18	
		H14	39 - 45			(2)		Y 30	65	25	20	(6) (5) (7)	
	Cu Zn 33 (CW 506 L)	H11	33 - 40	64	85 - 120	(3)		Cu Al 10 Ni 5 Fe 5 (CC 333 G)	Y 20	63	25	12	(8)
		H14	47 - 54	7	140 - 160	(4)			Y 30	60	30	7	(6)
	Cu Zn 40 (CW 509 L)	H11	36 - 43		105 - 135	(5)		Cu Sn 12 (CC 483 K)	Y 20	24	13	5	(1) (3)
		H14	51 - 59		150 - 175	(6)			Y 30	27	15	3	
	Cu Zn 39 Pb 2 (CW 612 N)	H12	40 - 50		135 - 160	(7)		Cu Sn 5 Pb 5 Zn 5 (CC 491 K)	Y 20	20	9	12	(1) (2) (5)
		H14	50 - 60	2 - 20	150 - 180	(8)			Y 70	25	10	12	
	Cu Zn 40 Pb 3 (CW 617 N)	laitons de décolletage	37 - 50	4 - 22		(5)		Cu Pb 20 Sn 5 (CC 497 K)	Y 20	15	6	5	(1) (4)
	Cu Zn 36 Pb 3 (CW 603 N)		32 - 45	7 - 28		(5)			Y 30	18	8	7	
bronzes	Cu Sn 6 P (CW 452 K)	O	33 - 42	50	90 - 120	(6)	laitons	Cu Zn 19 Al 6	Y 20	75	50	8	(6) (7)
		H14	62 - 70	5	190 - 220	(7)			Y 20	18		12	(2)
	Cu Sn 3 Zn 9 (CW 454 K)	O	31 - 40	40	75 - 105	(8)		Cu Zn 20	Y 20				
		H14	61 - 66	4	190 - 210	(9)			Y 30			12	
maillechorts	Cu Sn 4 Zn 4 Pb 4 (CW 456 K)	H12	40 - 46	25	125 - 155	(10)		Cu Zn 40	Y 30			8	(2) (5)
		H14	50 - 60	3	160 - 195	(11)			Y 30				
	Cu Ni 10 Zn 27 (CW 401 J)	H11	42	27	105	(12)			Y 30				
	Cu Ni 18 Zn 20 (CW 409 J)	H14	58	5	180								
	Cu Be 2 (CW 101 C)	-	14 à 120	2 à 35	90 à 330	haute résist.							
(1) bijouterie, quincaillerie (2) douilles, lustrierie, musique (3) serrurerie, orfèvrerie, lustrierie (4) engrenages, horlogerie			(5) pièces décolletées (6) ressorts (7) visserie (8) joints, membranes			(1) pièces frottantes (2) pièces courantes, robinetterie (3) robinetterie haute pression (4) coussinets			(5) chimie : robinets (6) hélices mer, turbines, engrenages (7) pièces méca. de résistance (8) roue et vis sans fin				

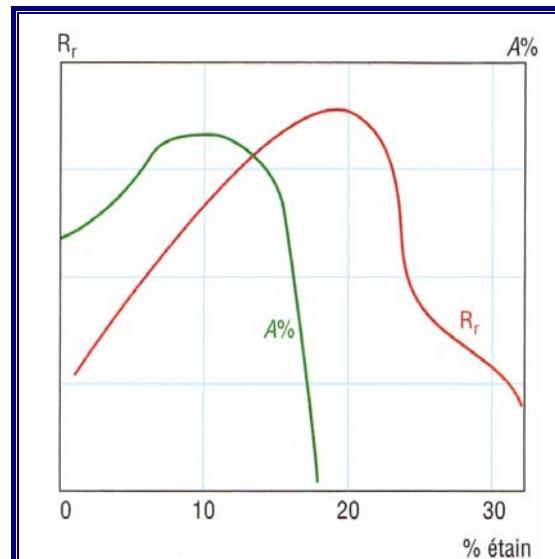


7. Caractéristiques mécaniques des laitons en fonction du pourcentage de zinc.

4. Bronzes

- L'étain (addition de 4 à 22 %) a un rôle comparable au zinc mais avec une action plus forte ; il est plus coûteux.
- Une addition de phosphore ($P < 1\%$) améliore les caractéristiques mécaniques, les propriétés antifriction, l'aptitude au moulage et a un rôle désoxydant. Les bronzes phosphoreux constituent le groupe le plus important.
- L'addition de plomb (Pb) améliore l'usinabilité et l'addition de zinc diminue le prix de revient (bronzes chrysocèles).

Propriétés : résistance à la corrosion qualités frottantes aptitude au moulage. Les bronzes se travaillent moins bien que les laitons (usinage, emboutissage,...) mais donnent des moules plus sains.



8. Caractéristiques mécaniques du bronze.

5. Cupro-aluminums ou « bronzes d'aluminium »

Surtout utilisés en fonderie, l'addition d'aluminium (entre 10 et 11 %) donnent des alliages ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne résistance à la corrosion ; ils sont souvent utilisés avec une addition de fer.

6. Cupronickels

De couleur « argent » à partir de 20 % de nickel, très malléables, l'addition de nickel améliore les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion et la résistivité électrique. Utilisations pièces de monnaie ($\approx 25\%$ Ni), tubes de condenseurs (30 % Ni), résistances électriques (constantan 45 % Ni).

7. Mallechorts

Moins coûteux que les cupronickels, on peut les considérer comme des laitons avec addition de nickel. Meilleures résistances à la corrosion et mécanique que les laitons.

Utilisations : articles ménagers, pièces d'orfèvrerie et de décoration, appareillages électriques...

IV - Magnésium et alliages

Le magnésium est rarement utilisé à l'état pur. L'addition d'aluminium améliore la résistance (R_t) et la fluidité à chaud ; le zinc favorise la plasticité et l'aptitude au moulage ; le thorium (Th) augmente les propriétés à température élevée et le zirconium (Zr) la plasticité et la résistance à l'oxydation. Désignation (NF EN 1754) analogue aux aluminiums (M à la place de A).

Principales caractéristiques :

Assez « léger » (densité 1,8) ; rapport résistance/poids élevé et grande capacité d'amortissement (réduit les bruits et les vibrations).

Les alliages résistent à la corrosion atmosphérique (craignent l'humidité), peu aux acides, bien aux bases, alcalins et solvants et ne résistent pas en eau de mer. Ils sont facilement usinables (attention à l'inflammation des copeaux), moulables, forgeables, soudables (TIG, résistance) et rivetables. Veiller à la corrosion galvanique des assemblages multimétaux.

Utilisations : pièces diverses pour l'aviation, l'automobile, outillage électroportatif, équipement de bureau, audiovisuel, petit électroménager...

Alliages de magnésium (fonderie), de titane et de zinc							
base	nuances	mode de coulée	caractéristiques mécaniques			observations	
			R _f (daN/mm ²)	R _e (daN/mm ²)	A %		
magnésium EN MC-	MgAl6Zn3 (G-A6Z3)	Y20	16-20	8-10	3-6	pièces courantes; bonne coulabilité à 450 °C	bonne usinabilité densité $d = 1,81$
	MgAl9Zn (G-A9Z)	Y20	16	8	2	carter, roues, pièces aéronautiques	
		Y24	23	11	7	fusion à 470 °C	
		Y30	17-22	9-12	2-5		
titane	MgZn5Th2Zr	Y25	24-28	15-18	5-12	carter complexes, tous types de moulages ; $d = 1,87$; fusion 520 °C	haute capacité d'amortissement chimie aéronautique espace
	MgZr	Y25	16	5	15	machines d'essais, bureautique ; $d = 1,75$	
	T-A5E ou TiAl5Sn	T5	90	80	20	malléabilité élevée ; pièces forgées	
	T-A6V ou TiAl6V	T3	115	105	12	le plus utilisé ; pièces de structure d'avion, visserie	
zinc	T-A6V6E ou TiAl6V6Sn	T1	105	95	12	variante du T-A6V	résistance et dureté
		T3	125	111	10	traitements thermiques possibles	
	Z-A4 (zamak 3) ZnAl4 ou ZP3	Y4	28	20	10	carter, poignées, carburateurs, micromécanique	
	Z-A4U1 (zamak 5) ZnAl4Cu1 ou ZP5	Y4	33	25	5	bagues, engrenages... fusion à 380 °C	pièces de frottement
	Z-A4U3 (zamak 2) ZnAl4Cu3 ou ZP2	Y4	36	27	5	variante plus dure	

Entre parenthèses : ancienne désignation. Y4 : moulage sous pression (page 57).

V – Zinc et alliages

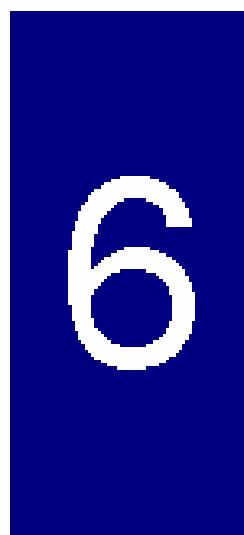
Principales nuances : zamaks (2, 3, 5) et kayems (1 et 2) pour l'industrie.

Désignations (NF EN 12844) : ZP3, ZP5, ZP2, ZP6, ZP8, ZP12, ZP27, ZP16 pour pièces moulées.

Principales caractéristiques : assez lourd (densité 7,13) ; basse température de fusion (420 °C) et bonne résistance à la corrosion.

La mise en oeuvre des alliages est facile en fonderie (basse température de fusion et retrait très faible). Il est possible de réaliser des pièces robustes à parois minces très complexes avec des tolérances serrées (0,01 à 0,1 mm), sans reprise d'usinage et sous des cadences très élevées (moulage en coquille sous pression des zamaks). Nombreux traitements de surface.

Utilisations : zamaks (ou nuances ZP) pour la fonderie (carburateurs, boîtiers...), zinc laminé pour le bâtiment (couverture...), poudres et revêtements de zinc contre la corrosion (métallisation, galvanisation, zingage, shérardisation, peintures...).



MATIÈRES PLASTIQUES ET ÉLASTOMÈRES

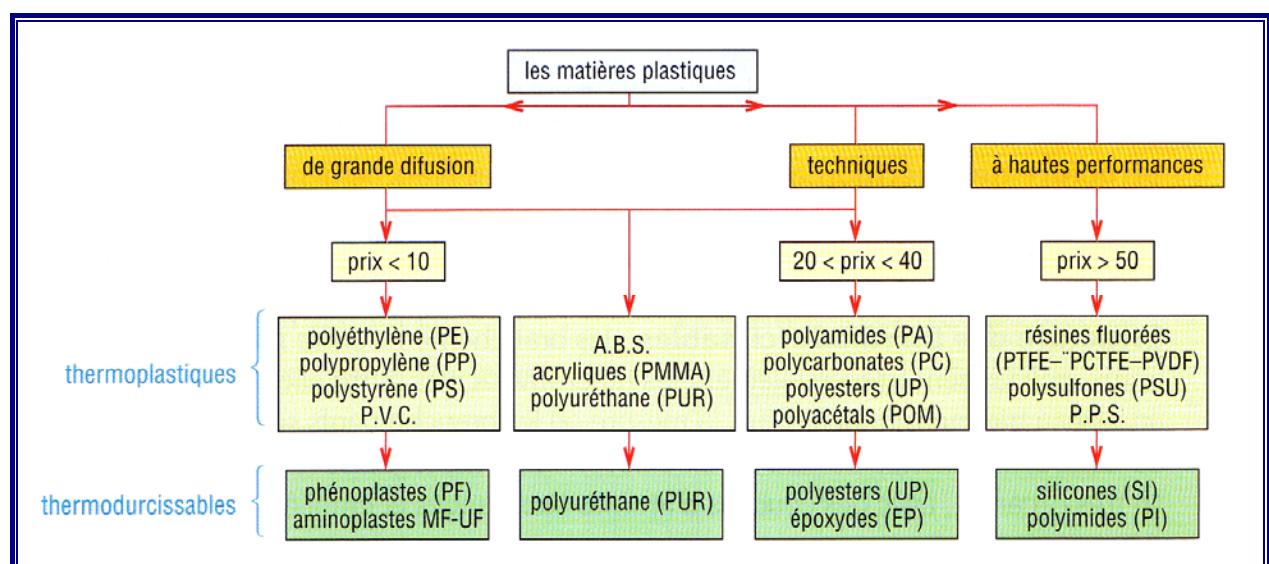
OBJECTIFS

- Indiquer les propriétés et décrire les caractéristiques des principales familles de matières plastiques et d'élastomères.
- Retenir les désignations et les principales nuances normalisées.

Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XX^e siècle et sont présentes partout : automobile, aéronautique, biens de consommation et d'équipement, bureautique, audiovisuel, emballages,...

La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Il existe également des composés naturels utilisés dans la fabrication des matières plastiques : poix, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne...



1. Principales matières plastiques.

I - Propriétés générales et structures

1. Principales caractéristiques

Faible densité (0,9 à 2,2), bonnes qualités d'isolation électrique et thermique, bonne résistance à un grand nombre de produits chimiques, pas d'oxydation comme certains métaux et ont un rapport volume/prix intéressant.

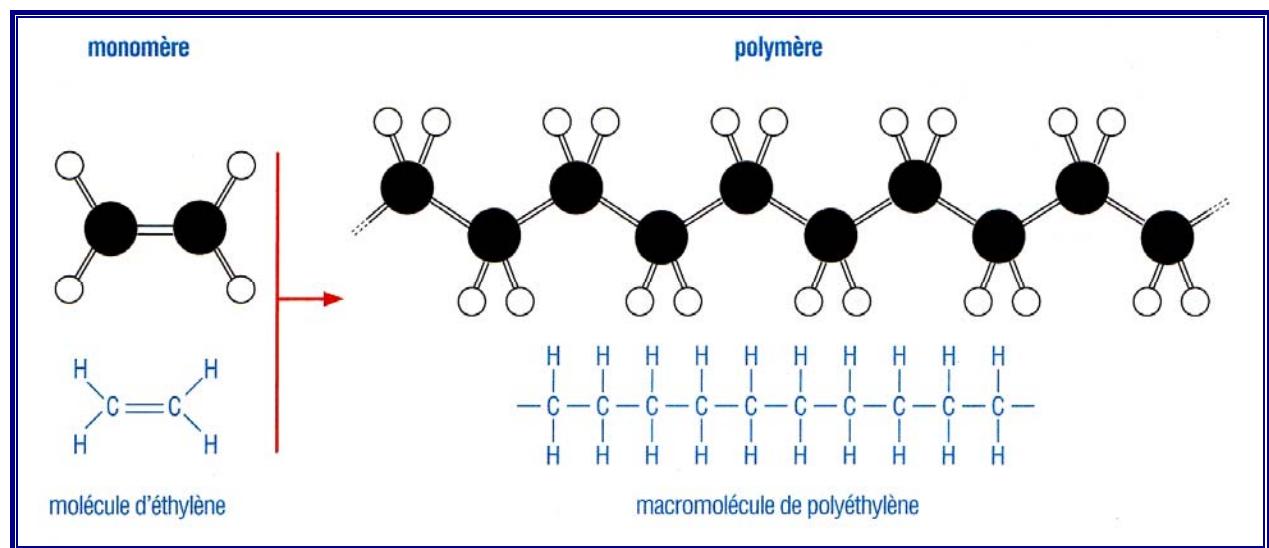
Inconvénients : parfois inflammables ; sensibles aux rayons ultra violets ; à l'humidité et non facilement recyclables.

2. Structures moléculaires

Les plastiques, ou « polymères », sont élaborés par synthèse chimique (construits chimiquement) à partir de molécules de base, appelées monomères.

Monomères : ce sont les unités chimiques de base, ou molécules, des matières plastiques. Ils sont construits autour des atomes de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), chlore (Cl), soufre (S), fluor (F)...

Polymères : sous l'action de la pression, de la chaleur et d'un catalyseur, les molécules, ou monomères, se regroupent entre elles pour former de longues chaînes appelées polymères, ou macromolécules. Une macromolécule peut contenir de plusieurs centaines à plusieurs millions de monomères.



2. Structure moléculaire du polyéthylène.

Polymérisation : l'opération chimique liant les monomères entre eux, pour obtenir un polymère, est appelée polymérisation.

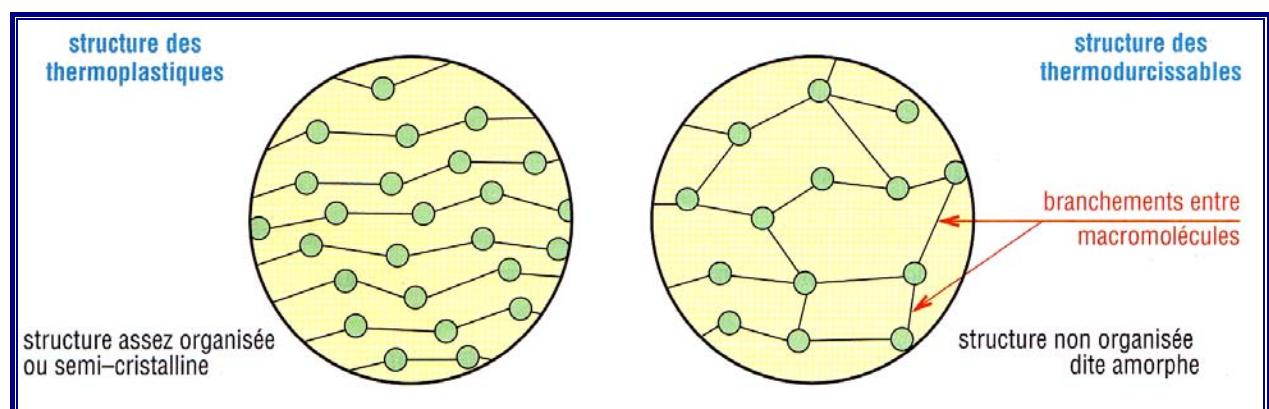
Copolymérisation : lorsque deux ou plusieurs polymères, de même nature ou non, sont liés entre eux chimiquement (branchements) l'opération est appelée copolymérisation.

Structure des thermoplastiques : le nombre des branchements entre macromolécules est faible ; celles-ci restent linéaires et séparées après moulage.

La structure obtenue, très serrée (forces élevées entre molécules et atomes) est semi-cristalline, bien organisée et proche de celle des métaux.

Structure des thermodurcissables : les branchements entre macromolécules, très nombreux, solidarisent irréversiblement les macromolécules entre elles (copolymérisation créant un réseau tridimensionnel). Dans la mesure où les branchements se font de manière aléatoire, au hasard, le matériau obtenu est dit amorphe ou « désorganisé », différent d'un réseau cristallin très organisé, avec des couches d'atomes bien rangés et empilées les unes sur les autres.

Remarques : certains plastiques, comme le polyester, existent dans les deux structures, thermodurcissable et thermoplastique.



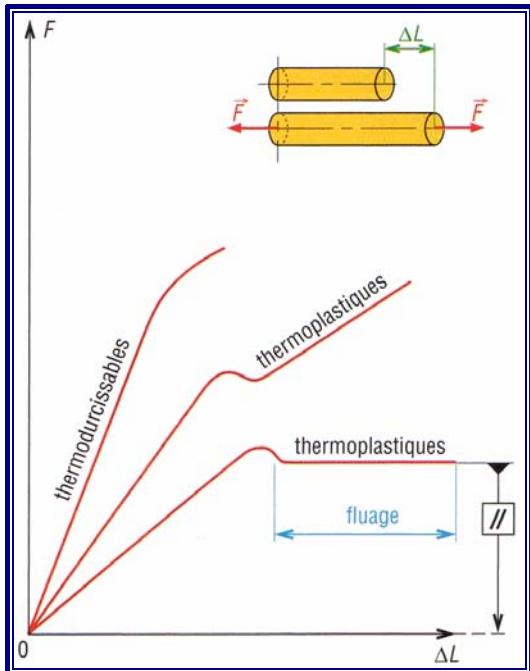
3. Structure des matières plastiques.

3. Propriétés mécaniques

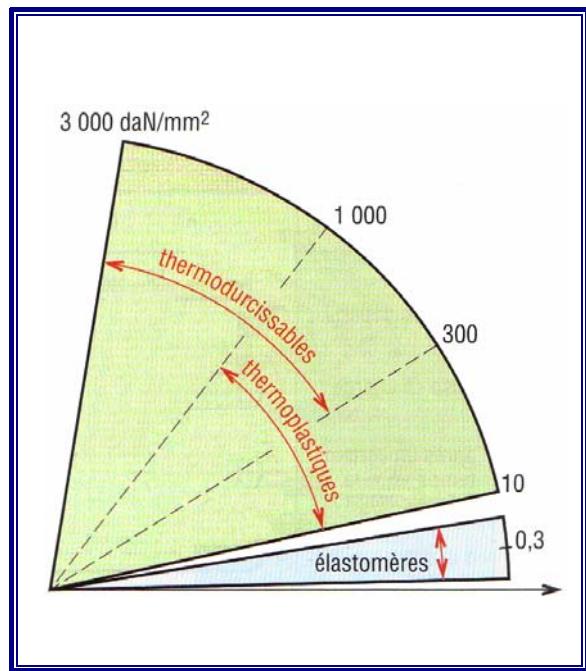
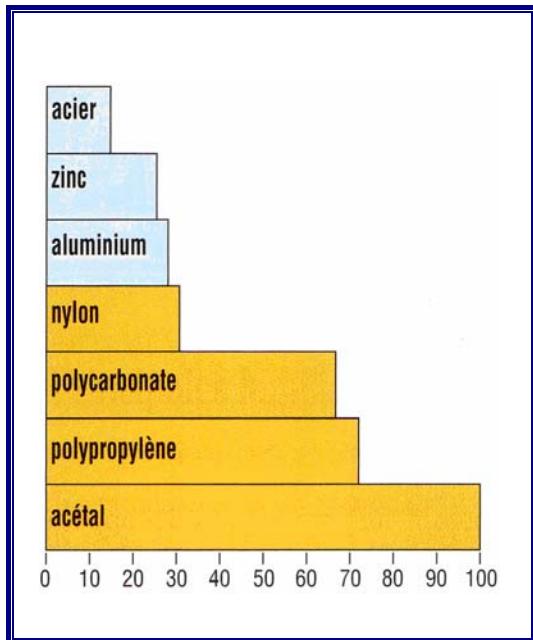
Le comportement mécanique des plastiques est différent de celui des métaux. Il dépend de la structure, de la composition, du mode de fabrication, de la forme de la pièce, de la température, du temps et de l'humidité.

Le pourcentage d'allongement ($A\%$) est plus faible pour les thermodurcissables ($< 1\%$, se déforment peu avant rupture, sont plus fragiles et plus sensibles aux chocs) qui présentent aussi, en général, une dureté plus élevée.

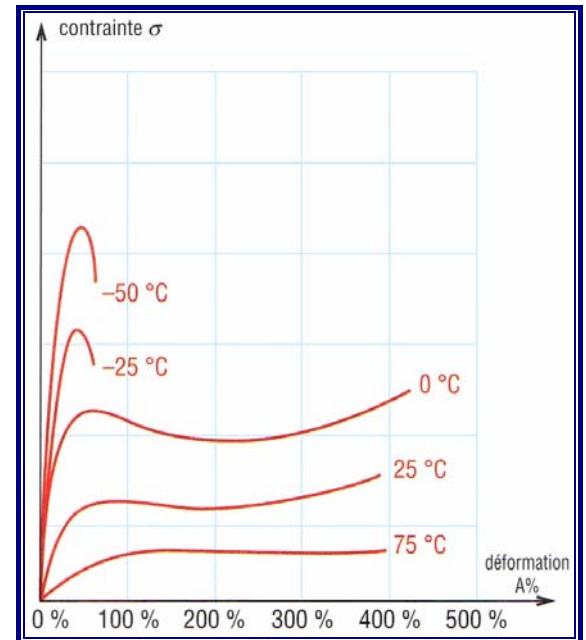
La résistance en compression est souvent plus élevée que la résistance en traction : 50 à 100 % pour les thermoplastiques, parfois plus de 100 % pour les thermodurcissables. Sous charge, les plastiques se déforment instantanément dans un premier temps, comme un ressort, puis, contrairement au ressort, continuent à se déformer progressivement au cours du temps (« déformation retardée »). C'est le fluage, sorte d'écoulement très visqueux qui dure autant que la charge.



4. Phénomène de fluage au cours du temps.

5. Valeurs de E , module d'élasticité longitudinal.

6. Comparaison des dilatations thermiques entre métaux et plastiques.



7. Comparaison des courbes contraintes /déformation du polyéthylène.

4. Phénomène de fluage

Le fluage est l'une des caractéristiques essentielles des matières plastiques. Il peut être mis en évidence par un essai de traction.

A la mise en charge de l'éprouvette, un allongement dL_0 se produit instantanément. Si la charge (F) est maintenue, l'éprouvette continue progressivement de s'allonger au cours du temps (allongement retardé).

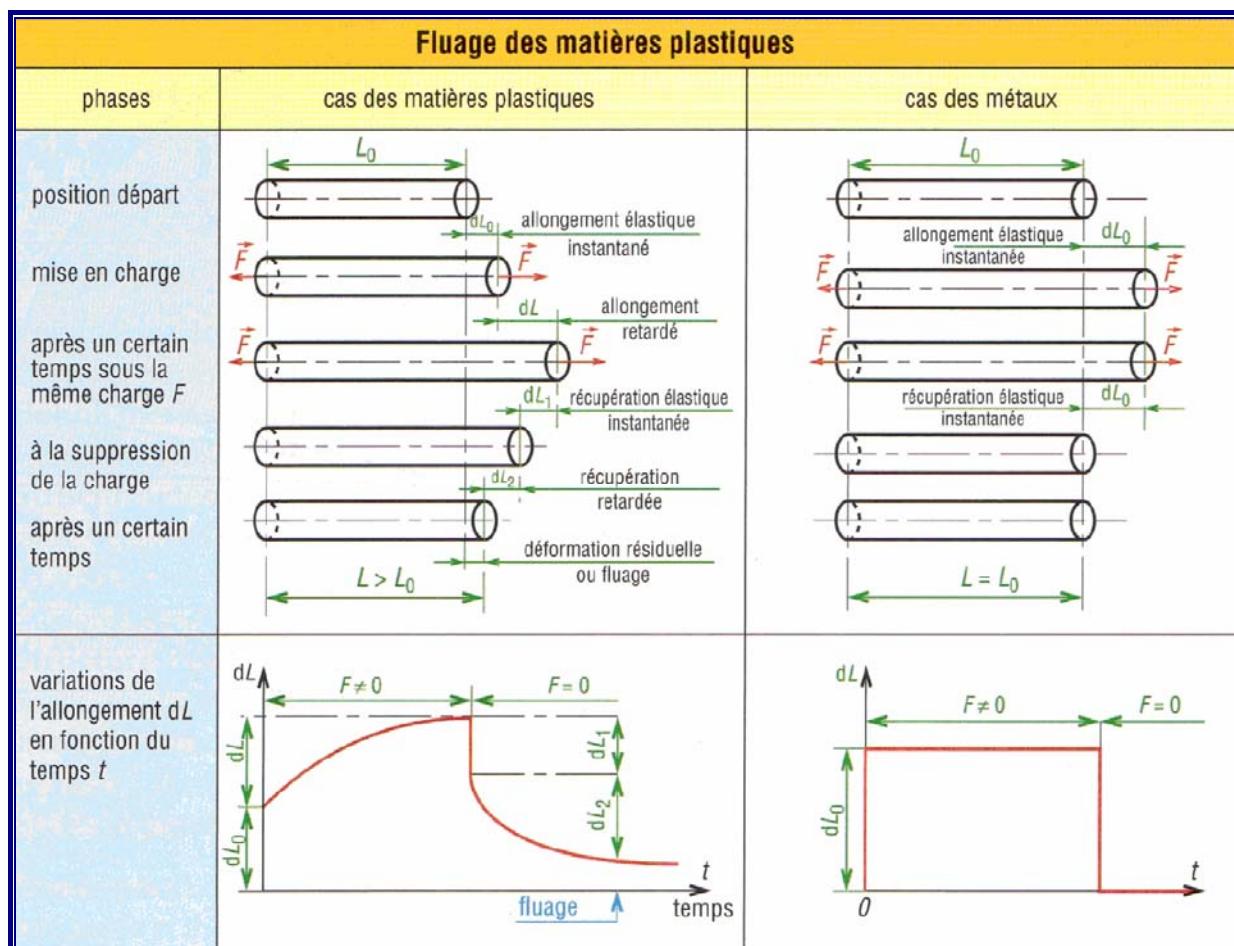
Plus la température est élevée, plus le phénomène est accentué.

Si la charge F est supprimée, le phénomène s'inverse, l'éprouvette récupère rapidement une partie de l'allongement réalisé (récupération instantanée), puis progressivement et plus lentement une autre partie (récupération retardée).

La déformation résiduelle qui subsiste mesure le fluage.

La destruction des liaisons, le glissement entre les macromolécules, le frottement interne retardant les déformations sont les principales causes du fluage. Le phénomène apparaît également pour des métaux travaillant sous charge à de hautes températures (fours, moteurs, réacteurs...).

Remarque : les fibres de renforcement (verre, kevlar, carbone...) permettent de corriger le phénomène de fluage (Voir chapitre 1, généralités matériaux, paragraphes composites).



8. Principe du fluage, comparaison avec les métaux se déformant élastiquement.

II - Thermoplastiques

C'est de loin la famille la plus utilisée ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables. Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

1. Propriétés principales

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine.

Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.

Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensibles aux ultraviolets électrostatiques, qui « attirent les poussières » ; pas toujours agréables au toucher.

2. Principales familles

(Figure 1 : principales matières plastiques.)

a) Thermoplastiques de grande diffusion

À eux seuls, ils représentent de 70 à 80 % du total des plastiques mis en oeuvre. On y trouve les polyéfines (polyéthylène, polypropylène), le polystyrène et les PVC (polychlorure de vinyle). Remarque les ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène) et les acryliques (polyméthacrylate de méthyle) sont, par leur prix et leur diffusion, à mi-chemin entre les précédents et les plastiques techniques.

b) Thermoplastiques techniques

Les polyamides, proche du nylon textile, sont les plus utilisés du groupe ils comportent de nombreuses variantes, de bonnes caractéristiques mécaniques, et une bonne tenue aux températures.

Les polycarbonates sont transparents et résistants aux chocs (verres correcteurs, vitrage anti-effraction...).

Les polyesters, voisins des fibres textiles polyesters, sont transparents et imperméables aux gaz (applications voisines des polyamides).

Les polyacétals résistent à la fatigue, à l'eau et aux solvants (lave-linge, lave-vaisselle...).

c) Thermoplastiques hautes performances

Plus coûteux, ils sont caractérisés par leur résistance à la chaleur et par des propriétés électriques élevées. Les résines fluorées (PTFE, PCTFE, PVDF) sont les plus classiques elles résistent à presque tous les agents chimiques, ne vieillissent pas, ne brûlent pas, ont de bonnes qualités frottantes. Les polysulfones et les polysulfones de phénylène (PPS), plus récents, transparents, allient résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées.

Principales matières plastiques																	
			symbole	(1) aspect	densité	températures limites (°C)	caractéristiques mécaniques				résistance chimique		solvants	huiles	usinage	moulage	exemples d'emploi
							R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A% chocs 70D entailles	acides (2) forts faibles	bases alcalis (2) forts faibles						
							(2)	(2)	(2)	(2)	(2)						
thermoplastiques	polyéthylène	basse densité	PE-LD	TRL-0Q	0,92	100	0,5-3	20-40	200-600	ne casse pas	F B B B	B B B B	① ②				
		haute densité	PE-HP	TRL-0Q	0,96	120	2-4	80-180	20-80		F B B B	B B B B	③ ④				
	polypropylène		PP	TRP-0Q	0,91	130	3-5	140-200	250-600	7-25	F B B B	B B B B	① ③	⑥			
	polychlorure de vinyle	rigide	PVC	TRP-0Q	1,38	70	4-6	150-350	5-80	2-100	B B B B	S B B B	① ③	①			
				TRP-0Q	1,20	70	1-3	1-4	150-450								
	polystyrène		PS	TRL-0Q	1,05	80	3-5	200-320	5-75	3-20	F B B B	S B F B	① ②	③ ⑤			
	ABS*		ABS	TRL-0Q	1,10	110	1,7-6	200	10-50	10-50	F B B B	S B B F	① ②	③			
	poly (méthacrylate de méthyle)		PMMA	TRP-0Q	1,20	85	5-8	220-320	4-10	2-3	F B S F F	B B S	② ③	⑤ ⑥			
	acétate de cellulose		CA	TRP-0Q	1,30	90	3-6	80-250	20-50	6-45	S F F F	B B B B	① ②	③ ⑤			
	polyamide		PA	TRP-0Q	1,15	160	5-10	90-280	15-300	3-50	S B B B	B B B B	① ③	④			
thermodurcissables	polycarbonate		PC	TRP-0Q	1,20	130	5-7	240	80-120	65-100	F B S F F	B B B B	① ②	⑤			
	polyoxyméthylène		POM	TRL-0Q	1,40	90	6-7	300	35-75	5-15	S B F F B	B B B B	① ③	④			
	polytétrafluoroéthylène		PTFE	OQ	2,20	+260 -200	2-4	35-80	250-500	16	B B B B	B B B B	-	④ ⑥			
	phénoplastes**		PF	TRP-0Q	1,3	190	3-6	270-480	750		S F S S S	B B	① ②				
	polyesters		UP	TRP-0Q	1,2	190	5-15	280-400	250-1500	8-100	S F S F F	F B	② ③				
thermodurcissables	polyépoxydes		EP	TRL-0Q	1,5	280	2-12		250	2-50	F B F B B	B B B B	② ③	⑥			
	polyimides		PI		1,6	250	2-4		750		B B B B	B B B B	① ⑦				
	silicones		SI	OQ	1-2	230	1				F B F F F	F F F B	⑦				

(1) TRL : translucide
TRL : transparent
OQ : opaque

(2) B : bon
F : faible à moyen
S : mauvais (soluble)

(3) ① : pièces mécaniques (engrenages, cames, rotors)

② : petits carters, boîtiers, jouets, petit outillage

③ : grands bâts, cuves, containers, réservoirs, coques

④ : pièces de frottement (coussinets, paliers, glissières)

⑤ : pièces pour l'optique (vitres, luminaires, diffuseurs)

⑥ : applications chimiques, thermiques

⑦ : enrobage, étanchéité, isolant

* acrylonitrile styrène acrylate
** résine phénol formaldéhyde

III - Thermodurcissables

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

Au moment de la mise en oeuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur (comparable à la cuisson du blanc d'oeuf).

1. Propriétés principales

Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ($> 200^{\circ}\text{C}$), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.

Inconvénients : mise en oeuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas de moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

2. Principales familles

- Les phénoplastes (PF) noirs ou bruns (« bakélite ») et les aminoplastes blancs ou crème (urée formaldéhyde UF, mélamine-formol MF) sont les plus courants et les moins coûteux.
- Les époxydes (EP), les polyesters (UP) et les polyuréthannes (PUR) peuvent être classés dans le groupe des plastiques techniques.
- Pour les hautes performances, plus coûteux, on a les polyamides PF, qui conservent leurs propriétés mécaniques et électriques au delà de 300°C , et les silicones SI, qui résistent à la chaleur et ont des propriétés mécaniques élevées.

IV - Elastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celles du caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

Applications : pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussures...

1. Principales caractéristiques

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre ($A\%$ très élevé, jusqu'à 1 000 %). A l'opposé le module d'élasticité longitudinal E reste très petit ($< 10 \text{ N/mm}^2$: près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.

2. Caoutchoucs vulcanisés (réticulés)

Ce sont les plus traditionnels. La vulcanisation consiste à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer la résistance tout en maintenant l'élasticité. Ils peuvent être extrudés ou moulés. Principales nuances caoutchouc naturel, nitrile (NBR), butyl, chloroprène, EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène-butadiène), Fluorés (FPM).

Principaux élastomères vulcanisés						
		caoutchouc naturel NR	butadiène styrène SBR	acrylonitrile butadiène NBR	butyl IIR	chloroprène (néoprène) CR
propriétés mécaniques	traction	+++	++	++	0	++
	déchirement	++	+	0	0	+
	abrasion	+++	++	++	+	++
	compression	++	++	+++	+	+
	résilience	+++	++	0	0	++
	flexion	++	++	++	++	0
résistance au vieillissement	ozone-intempéries	+	+	+	++	+++
	chaleur	+	+	+	++	+++
	froid	+++	++	0	+	+++
	flamme	0	0	0	0	++
résistance chimique	huiles	0	0	+++	0	0
	solvants	0	0	+++/0	0/+	0
	eau	++	++	++	++	+++
	imperméabilité aux gaz	+	+	++	+++	+
	acides faibles	++	++	+	+++	++
	acides forts	+	+	0	+++	+

3. Caoutchoucs thermoplastiques

Plus récents, ils ont les qualités des élastomères vulcanisés haut de gamme avec en plus la simplicité de mise en oeuvre des plastiques thermoplastiques (moulage par injection, pas de vulcanisation).

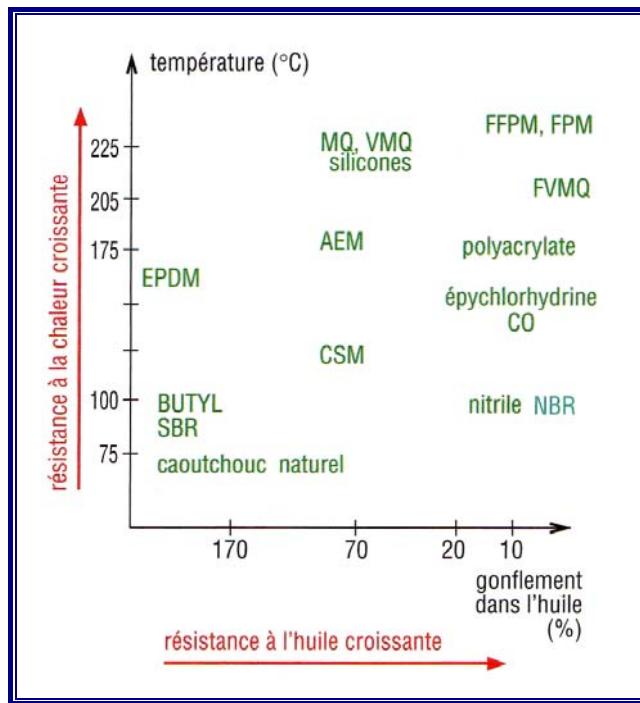
Principales nuances :

Polyuréthane (AU) : grande dureté, résistance à l'abrasion et au déchirement, faible tenue à la chaleur et à l'humidité.

Polyacrylates (ACM) : résistance aux températures, à l'huile et à l'ozone de l'air, faible tenue à l'eau, acides et bases.

Silicones (VMQ et PVMQ) : résistent aux hautes et basses températures tout en conservant une bonne résistance mécanique, mais tenue moyenne à l'huile.

Fluorosilicones (FMQ) : mêmes caractéristiques que les silicones avec une meilleure résistance à l'huile.



11. Résistance à l'huile et à la chaleur des principaux élastomères.

Remarques : les élastomères fluorés présentent une des meilleures résistances à la chaleur, aux hautes températures et aux fluides, particulièrement dans l'air et dans l'huile.

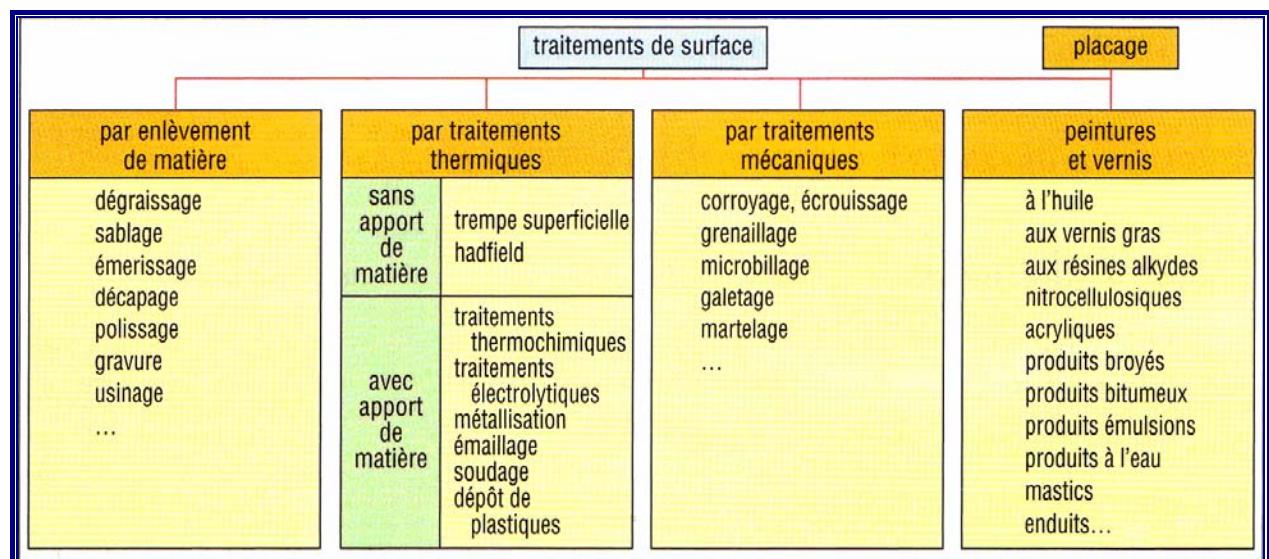


TRAITEMENTS DE SURFACE

OBJECTIFS

- Indiquer les principaux traitements de surface et donner les caractéristiques des traitements thermiques de surface, des traitements électrolytiques, de la métallisation...
- Fournir des éléments sur les peintures et les vernis.

Les traitements de surface sont utilisés pour modifier les caractéristiques de la surface d'une pièce dans le but de lui donner des qualités nouvelles : améliorer les propriétés mécaniques (dureté, frottement, résistance à l'usure, au grippage, à la fatigue...), la résistance à la corrosion, l'esthétique et certains comportements (conductivité électrique, réflexion de la lumière, conduction de la chaleur, isolation thermique ou aux rayonnements...).



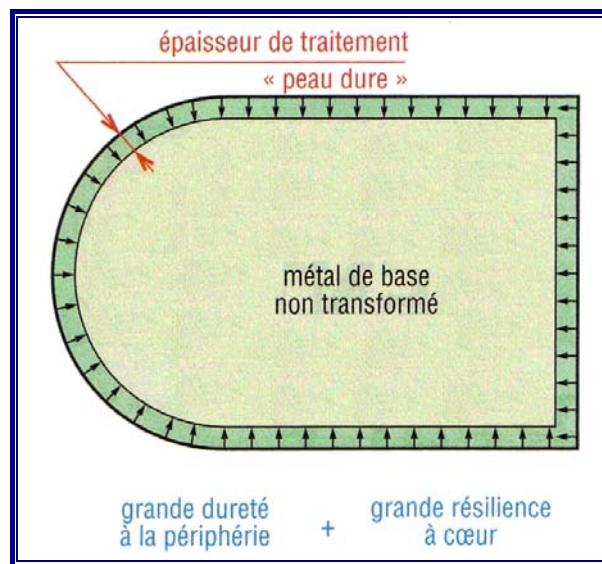
1. Traitements de surface.

I. Traitements thermiques de surface

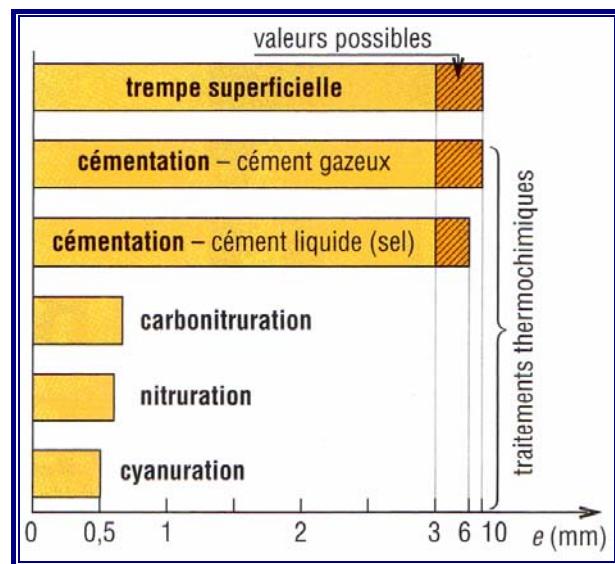
Les traitements se développent de la surface vers l'intérieur de la pièce sur une couche de faible épaisseur.

Le plus souvent ces traitements sont des durcissements superficiels permettant de conserver à coeur les propriétés du métal de base, avec une ductilité et une résilience plus élevées : « peau dure et coeur tendre ».

Ils évitent l'emploi d'acières fortement alliés en rendant possible l'utilisation d'acières moins coûteux comme certains C et certains aciers faiblement alliés.



2. Principe des traitements de surface.



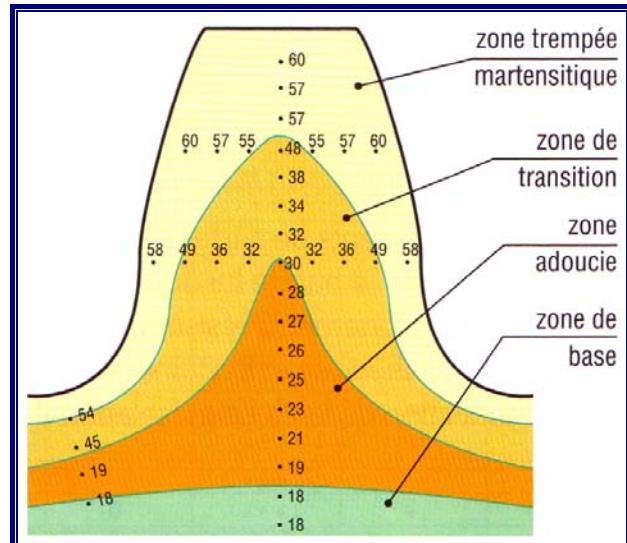
3. Épaisseurs traitées possibles suivant le procédé.

1. Trempe superficielle

C'est une trempe réalisée uniquement en surface. Le chauffage est effectué par induction (traitements locaux, formes irrégulières cames, dents...) ou au chalumeau (grandes pièces) et le refroidissement par aspersion ou immersion. Le procédé est bien adapté à la fabrication en série : portées de vilebrequin, arbres à cames, dents d'engrenage...

Matériaux utilisés :

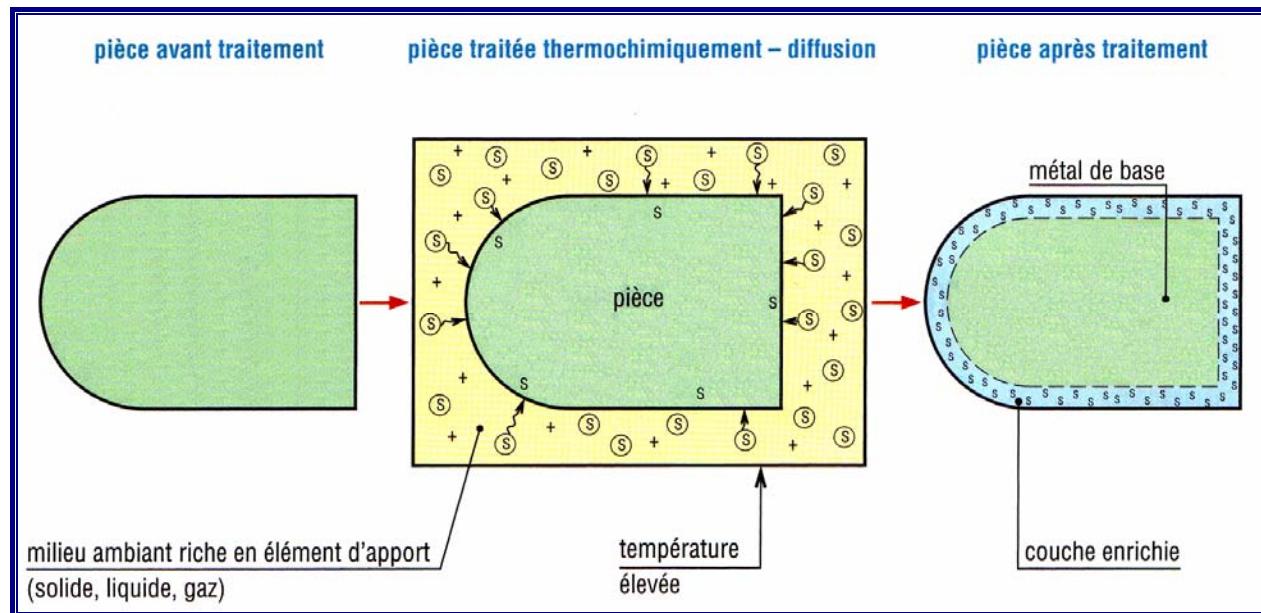
- acières : 3C42 (XC42), 35CrMoS4, 42CrS4, 42CrMoS4, 45MnS4, 52MnS4...
- fontes : FGL300, FGS600-3, S. N35 ...



4. Évolution de la dureté (HRC) d'une dent d'engrenage trempée superficiellement par induction.

2. Traitements thermochimiques

Les traitements sont obtenus avec apport en surface par diffusion chimique, sous l'action de la chaleur, d'un ou plusieurs éléments d'addition comme le carbone, l'azote, le soufre...

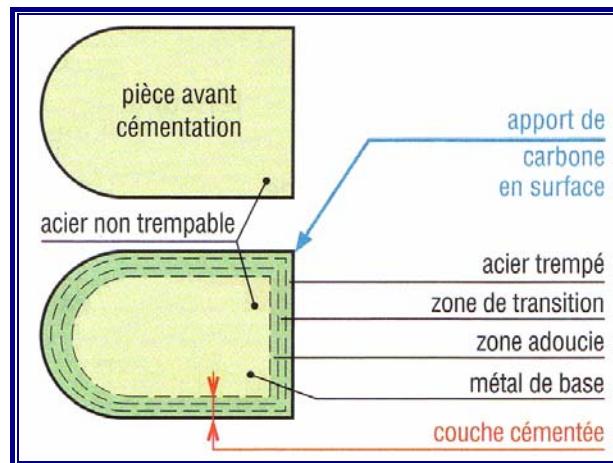


5. Principe des traitements thermochimiques.

a) Cémentation

Traitements le plus classique, il consiste en un apport de carbone dans la surface de la pièce, suivi d'un durcissement par trempe. Pendant le traitement, la pièce est maintenue en contact avec un corps, solide, liquide ou gazeux, riche en carbone. L'enrichissement de la surface en carbone rend possible la trempe des aciers utilisés, non trempables au départ.

Duretés atteintes : 800 à 850 HV.



6. Principe de la cémentation.

Aciers utilisés : 2C10, 2C22 (températures de cémentation élevées ≈ 925 °C) 10NiCr6, 16NiCr6, 20 NiCr6, 18NiCrMo6, 16MnCr5, 20MnCr5, 18CrMo4 (températures plus basses et caractéristiques à cœur supérieures)...

Inconvénient : les pièces traitées ont tendance à se déformer et à gauchir.

Procédés dérivés : shérardisation (apport de zinc protégeant contre la corrosion), calorisation (apport d'aluminium, utilisé en décoration)...

b) Nitruration

Elle donne une plus grande dureté que la cémentation et amène moins de risques de déformations et de gauchissement des pièces traitées.

Elle est obtenue par diffusion d'azote en surface (pièce en contact avec de l'ammoniaque craquée NH_3 vers $560\text{ }^{\circ}\text{C}$), suivi d'un refroidissement lent.

Le durcissement n'est pas obtenu par trempe superficielle mais par formation de nitrures (fer, chrome et aluminium). Duretés atteintes : 1 100 à 1 200 HV.

Matériaux utilisés : aciers faiblement alliés (généralement trempés et revenus à coeur) 32CrMoV9, 32CrMoV12-10, 34CrAlNi7...

Inconvénients : coût élevé de l'équipement et mise en oeuvre plus délicate que les autres procédés.

c) Carbonitruration

Le traitement est un mélange de cémentation et de nitruration. Il y a apport, en surface, de carbone et d'azote par chauffage dans une atmosphère gazeuse, entre 600 et $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'opération est généralement suivie par une trempe, parfois par un refroidissement lent avec 15% d'ammoniaque, la trempe n'est pas nécessaire ; elle l'est avec 1 %. Duretés atteintes : 900 à 950 HV.

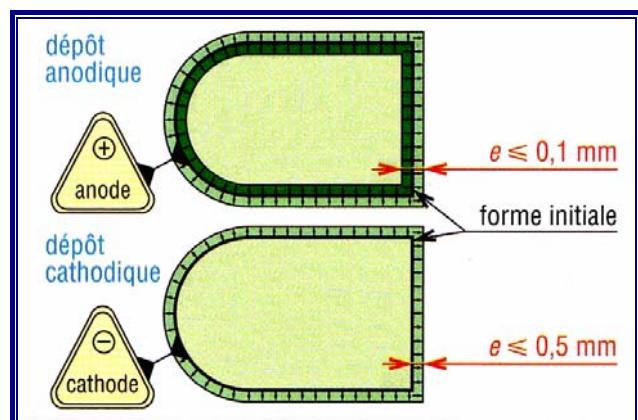
Procédés dérivés : cyanurisation (carbone remplacé par le cyanure), sulfocarbonitruration (apport de soufre et de carbone)...

II - Traitements électrolytiques

Deux cas sont possibles: le dépôt ou l'attaque anodique et le dépôt cathodique.

1. Dépôt anodique (électrolyse anodique)

La pièce est liée à l'anode et la formation du composé en surface se développe à la fois vers l'intérieur et vers l'extérieur de la surface traitée (épaisseur 0,01 à 0,1 mm environ).



7. Principe de déposition des traitements électrolytiques.

2. Dépôt cathodique (électrolyse cathodique)

La pièce est liée à la cathode et le dépôt de matière (métal d'apport) se développe uniquement de la surface vers l'extérieur (épaisseur 0,5 mm environ).

Autres cas que ceux du tableau, protégeant contre la corrosion et pour décoration : chromage (non dur), nickelage, zingage, étamage, cuivrage (sert de « sous couche »), cadmiage (dépôt de cadmium sur ferreux et cuivreux, pour visserie et boulonnnerie), dorure (or)...

Traitements de surface par traitements thermiques											
traitement		élément d'apport	matériaux traités	épaisseur traitée (mm)	température (°C)	densité en surface	propriétés principales : amélioration de				
transformation de structure	trempe superficielle	aucun	ferreux		$A_3 + \theta$ $50 < \theta < 200$	+	+		+	+	① ② ③
	hadfield-HEF	aucun	acières au manganèse		190	+	+			+	② ③ ④
traitements thermochimiques	cémentation	carbone	acières de cémentation	0,5 à 1	925 à 950	+	+		+	+	① ② ③ ④
	nitruration	azote	acières de nutrition + fontes	0,1 à 0,5	550	+	+		+	+	① ② ③ ④ ⑥
	carbonitruration	carbone + azote	acières cém. et nitrur.	0,05 à 0,5	600 à 900	+			+	+	① ② ⑤
	sulfonitruration	soufre + azote	tous les ferreux	0,02 à 0,03	570		+	+	+		① ② ④ ⑤
	phosphatation	phosphates	ferreux aluminium		40 à 90		+	+			④ ⑧
	boruration	borures	ferreux	0,05 à 0,35			+	+			⑥ ⑦
	chromisation dure	chromes (carbures)	acières fontes	0,01 à 1			+	+			⑥ ⑦
traitements électrolytiques	anodiques	anodisation dure	alumines Al_2O_3	aluminium	0,05 à 0,06	+	+			+	② ③ ⑥
		sulfurisation (basse température)	FeS	ferreux	0,007 à 0,008	190		+	+		① ② ③
	cathodiques	chromage dur	chrome	acières, alu. cuivreux, zinc	0,01 à 0,5	< 100		+	+	+	⑨ ② ④ ⑩
		forez	[Cu + Sn]	ferreux	0,03 à 0,15	570			+		① ② ④ ⑥
		stanal	Sn	ferreux	0,01 à 0,03	570		+	+	+	② ④
		delsun	étain (Sn)	cuivreux	0,015	420		+	+		④ ⑧

(*) ① : engrenages

② : axes, arbres, broches

③ : cames

④ : bagues, paliers, galets

⑤ : visserie

⑥ : glissières

⑦ : outils coupants

⑧ : bâts, carters, matrices

⑨ : pièces de frottements

⑩ : restauration de surfaces

III - Métallisation

Elle consiste en un dépôt de métal fondu (zinc, étain, aluminium, plomb...) ou de céramiques sur la surface à traiter.

1. Métallisation par trempage

La pièce à traiter est trempée dans un bain de métal fondu. Exemple : galvanisation ou dépôt de zinc.

2. Métallisation au pistolet, vers 2760 °C

Le métal est fondu par une torche oxyacétylénique puis projeté sur la pièce par soufflage (air comprimé).

3. Métallisation au plasma d'arc, vers 16 700 °C

Elle permet des dépôts de céramique, tungstène, carbure, molybdène, nickel, chrome... Un arc électrique entre deux électrodes chauffe un gaz, l'argon ; il en résulte une accélération des particules du gaz (éjection supersonique). Une poudre de la matière à déposer est injectée dans le gaz puis projetée sur la pièce à traiter.

4. Métallisation sous vide

Le dépôt est effectué en phase gazeuse, par condensation ou vaporisation (plasma) et ionisation de très petites particules dans un milieu gazeux raréfié ou sous vide selon plusieurs techniques. Il est possible de revêtir pratiquement tous les matériaux, les installations sont coûteuses.

Exemples : CVD (Chemical Vapor Deposition : dépôt après réaction chimique à température élevée entre plusieurs substances gazeuses) ; PVD (Physical Vapor Deposition : dépôt par condensation après vaporisation de la substance).

Applications : semi-conducteurs, outils de coupe, verre, textile, matières plastiques, verre, papier...

IV - Dépôts particuliers

Émaillage : dépôt (800 °C) sur métal ou céramique. L'émail est un composé de verre, flux, opacifiant et colorants.

Caractéristiques : grande durabilité ; résistance aux rayures, aux agents chimiques, à la chaleur et facile à nettoyer.

Applications : sanitaire, électroménager, chimie, carrelages, panneaux décoratifs...

Vitrification (glaçage) : semblable à l'émaillage avec présence d'agents de renforcement et d'agents matifiants pour réduire le brillant. La surface est dure, facile à nettoyer, étanche à l'eau et décorative.

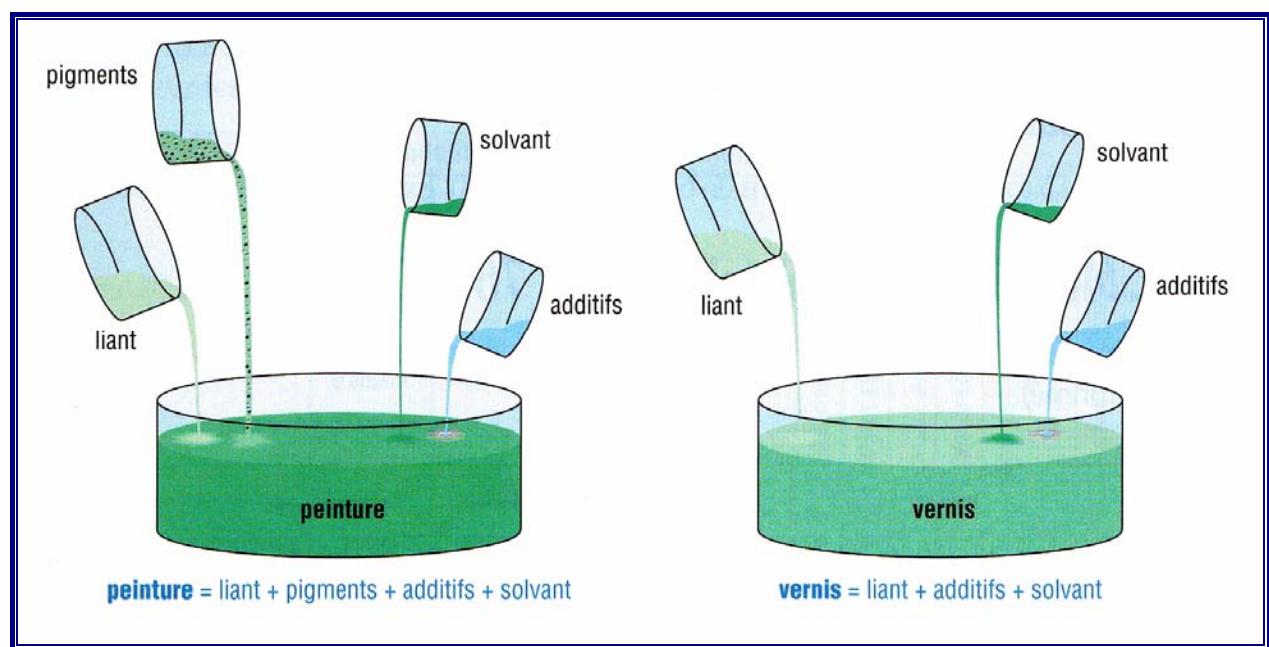
Applications : vaisselle, objets d'art, carrelage, instruments scientifiques, sanitaire...

V - Revêtements organiques ; peintures et vernis

Couramment utilisés, leur rôle est essentiellement protecteur (corrosion, humidité, agents chimiques...), décoratif (couleur, brillance...) et lié à l'assainissement (anti-salissures, moisissures ...).

1. Constitution des peintures et des vernis

Une peinture se compose de liants, de pigments et d'additifs, destinés à améliorer les caractéristiques, le tout étant mélangé avec un solvant.



8. Principaux constituants des peintures et des vernis.

Liants : naturels ou synthétiques, ils durcissent la peinture. Leur action est comparable à celle du ciment.

Principaux liants : huiles, oléorésines et résines : alkydes, phénoliques, époxydes, à l'eau, polyuréthanes, vinyliques, acryliques, cellulosiques...

Pigments : d'origine métallique, minérale ou organique (plastiques) ce sont des poudres fines insolubles ayant un pouvoir opacifiant et assurant la cohésion du film. Leurs propriétés sont très diverses : anticorrosion, anti-moisissures, incombustibilité, luminosité, phosphorescence...

Exemples : dioxyde de titane, oxyde de zinc, oxyde de plomb ...

Remarque : les peintures mates ont beaucoup plus de pigments que les peintures brillantes et les vernis.

Solvants : ils amincissent la peinture, la rendent plus facile à poser et accroissent le pouvoir de pénétration. Ils se présentent sous la forme d'un liquide volatil ayant la propriété de dissoudre totalement le liant.

Principaux solvants : white-spirit, eau, alcool, essence de térébenthine, essences minérales diverses...

Additifs (colorants, plastifiants, adjuvants, matières de charge...) : ils complètent et améliorent les caractéristiques finales du produit: couleur, séchage, anti-rayures, anti-oxydation, anti-mousses, fongicides, résistance au feu, isolation acoustique, épaisseur ou allégé, diminue le prix...

2. Film organique ou revêtement

La couche « de peinture », ou film, peut être obtenue de trois manières au moment du séchage.

a) Par polymérisation, à partir du liant

Après application « le séchage » est obtenu sans évaporation du solvant. Les molécules s'agglomèrent les unes aux autres en créant de longues chaînes de polymères ou macromolécules (analogie avec les matières plastiques). Beaucoup de vernis sèchent de cette façon.

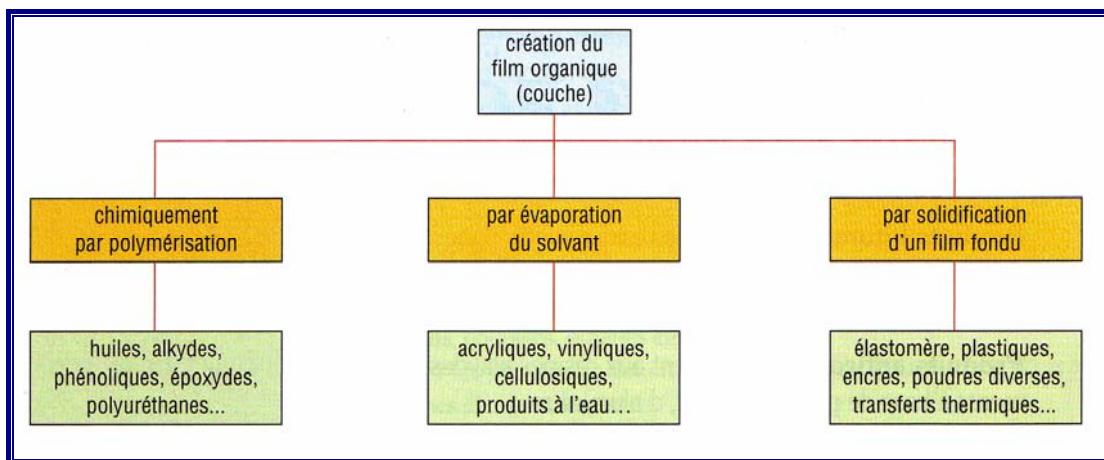
b) Par évaporation du solvant

Les polymères, ou macromolécules, existent déjà en suspension (mélangés) dans le solvant qui s'évapore après application. La plupart des peintures sèchent de cette façon.

c) Par solidification d'un film fondu

Les polymères sont d'abord fondus par chauffage puis déposés sur la pièce à traiter. Le séchage s'obtient, au refroidissement, par solidification du film (analogie avec les colles thermofusibles ou hot-melt).

Remarque : dans tous les cas, la taille, la croissance, la vitesse de formation des polymères et le séchage sont contrôlables en utilisant un catalyseur et/ou un chauffage.



9. Modes d'obtention du film organique ou de la « couche ».

3. Principaux produits

Produits acryliques : en suspension ou en émulsion dans un solvant (eau...), ils sèchent, avec peu d'odeurs, par évaporation de celui-ci. Ils sont faciles d'emploi, durables, résistent bien aux intempéries et au soleil (ultraviolets).

Les peintures et laques acryliques sont parmi les plus utilisées pour le bâtiment, l'habitat, l'automobile et l'aéronautique, en extérieur et en intérieur.

Produits cellulosiques : c'est un mélange de nitrocellulose, résines diverses, plastifiants et solvant à séchage rapide. Utilisations : laques à séchage rapide, peintures à effets craquelés et martelés, peintures pour retouches...

Produits à l'eau : le liant est dissous dans l'eau. Élaborés à partir de produits naturels (caséine du lait, blanc de craie, chaux...), ils sont très économiques, faciles à appliquer, ne dégagent pas de vapeurs, non toxiques et non inflammables. Ils sont réservés à des travaux ordinaires : intérieur de locaux ou peinture sur papier.

Produits émulsions (« dispersion ») : c'est une variante moderne des précédents. Le liant (résines alkydes, acryliques...), non dissout, est en émulsion dans l'eau. Au séchage, l'eau s'évapore et le liant se transforme en film souple. Les produits sont faciles à appliquer, sèchent rapidement et dégagent peu d'odeurs.

Utilisations : bâtiment (travaux intérieurs et extérieurs), automobile (électrodéposition), revêtements pour papiers...

Produits à l'huile : les liants (huiles de lin, oléorésines...) polymérisent sous l'action de l'oxygène de l'air et assurent une bonne étanchéité. Le temps de séchage est long, plusieurs jours avec des odeurs. Les couleurs claires ont tendance à jaunir.

Applications : grandes surfaces (bois, plâtre, ferreux) où le séchage n'est pas une priorité.

Produits phénoliques : résistent à l'humidité et aux intempéries. Ils sont le plus souvent mélangés avec des huiles siccatives pour produire des vernis (bateaux, ponts...).

Produits au polyuréthane : la polymérisation, réalisée avec un catalyseur, est activée par l'humidité de l'air. Ils résistent aux frottements, aux intempéries et aux attaques chimiques. Utilisations : produits de finition (vernis, vitrificateurs, peintures pour sols...).

Produits aux résines alkydes : ce sont les produits de polymérisation les plus utilisés (peintures, laques, vernis). Le liant est un composé de polyesters d'huiles sélectionnées, d'alcool ou d'acides organiques (exemples peintures glycérophthaliques...).

Les produits ont une durabilité moyenne, résistent assez bien à l'humidité, au soleil et aux intempéries ; leur temps de séchage est de quelques heures.

Applications diverses (décoration, métaux, bois) sous conditions normales (conditions sévères à éviter).

Produits vinyliques : ils sèchent par évaporation du solvant. Les finitions sont intéressantes pour les applications en milieux humides ; les résines polyvinyliques sèchent mal en air sec.

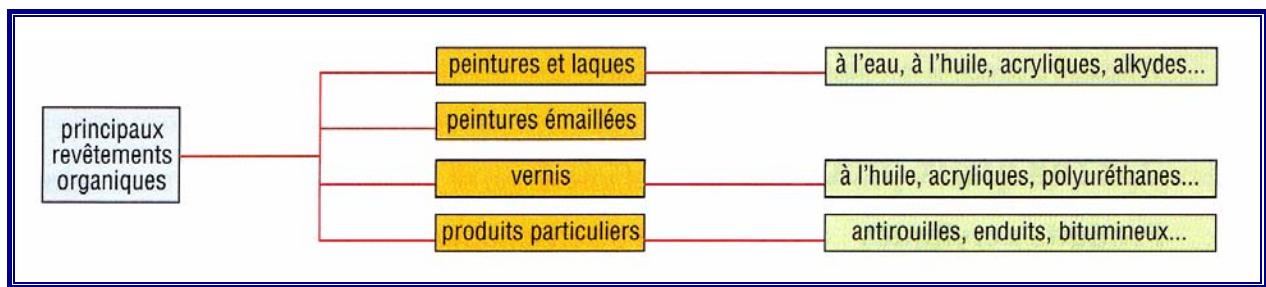
Produits aux silicones : les silicones utilisés avec d'autres résines résistent à des températures élevées (≈ 370 °C). Leur prix est élevé.

Utilisations : peintures pour fours, étuves...

Produits bitumeux : à base de résines synthétiques, de bitumes, de brais de pétrole, de goudron, ils résistent à l'humidité, à la corrosion et sont peu décoratifs.

Utilisations : étanchéité, isolation, protection des alliages ferreux, des murs, des fondations...

Produits antirouilles : souvent aux résines alkydes, ils contiennent une forte proportion de pigments à base de plomb, de zinc, d'aluminium...

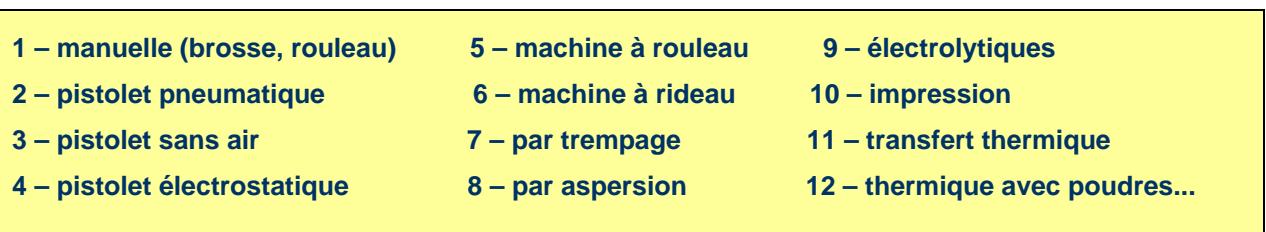


10. Principales familles de produits.

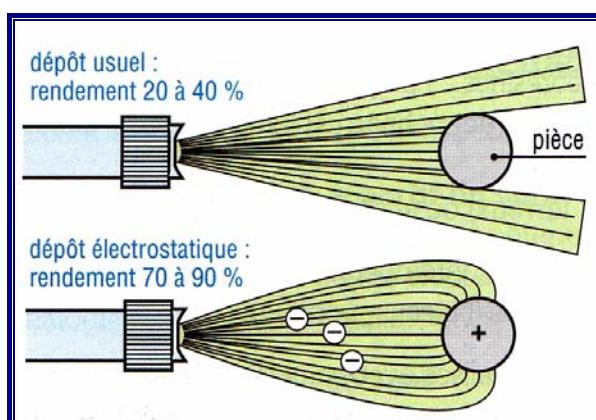
4. Mise en œuvre ; principales techniques d'application

Séchage : la plupart des produits nécessitent entre 2 et 24 heures de séchage à température ambiante, en air naturel ou sec. Le processus peut être accéléré en utilisant des fours, étuves, tunnels à lampes infrarouges, ultraviolets, hautes fréquences... Par exemple, entre 135 et 235 °C, le temps de séchage passe de 24 heures à moins d'une heure.

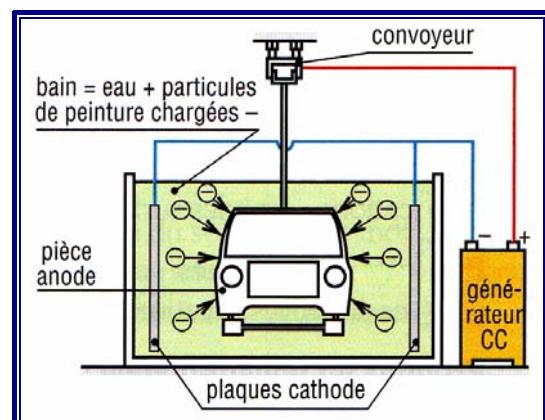
Contrôle de qualité : il existe de nombreux essais et tests normalisés (viscosité, chocs, rayures, abrasion, pliage, emboutissage, dureté...).



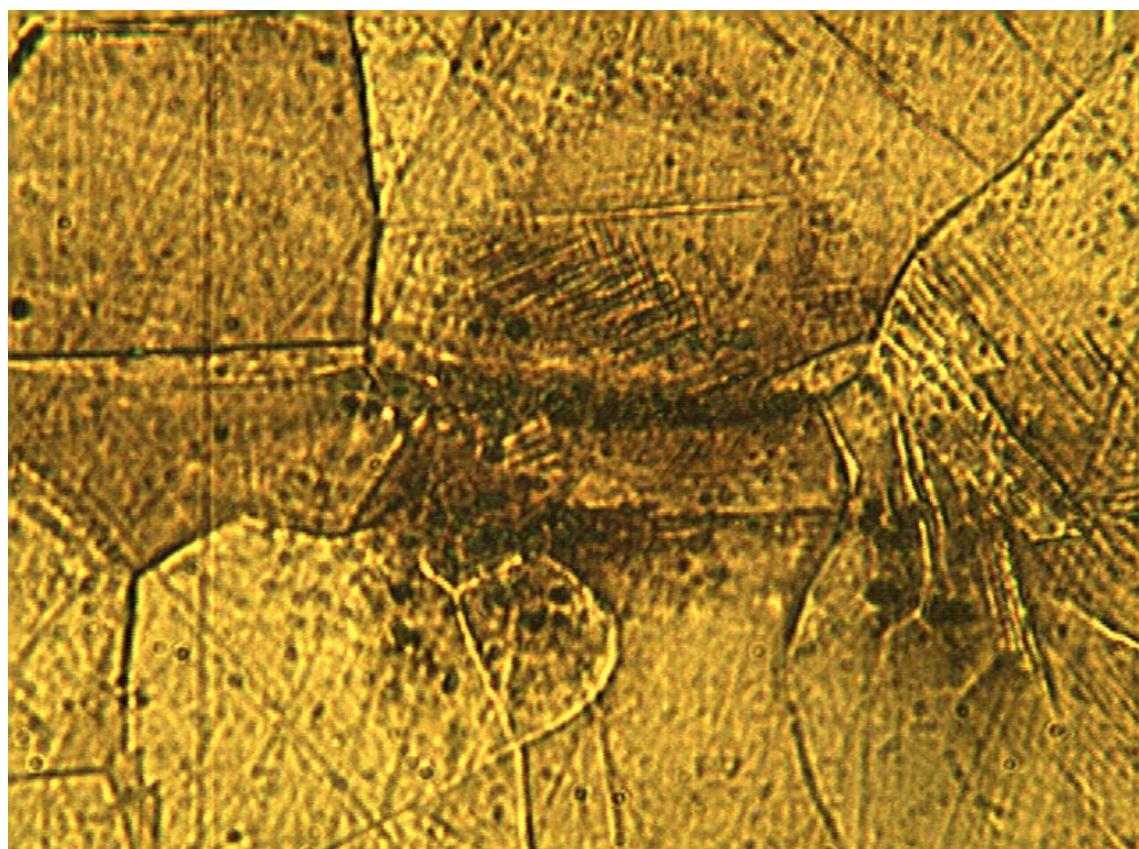
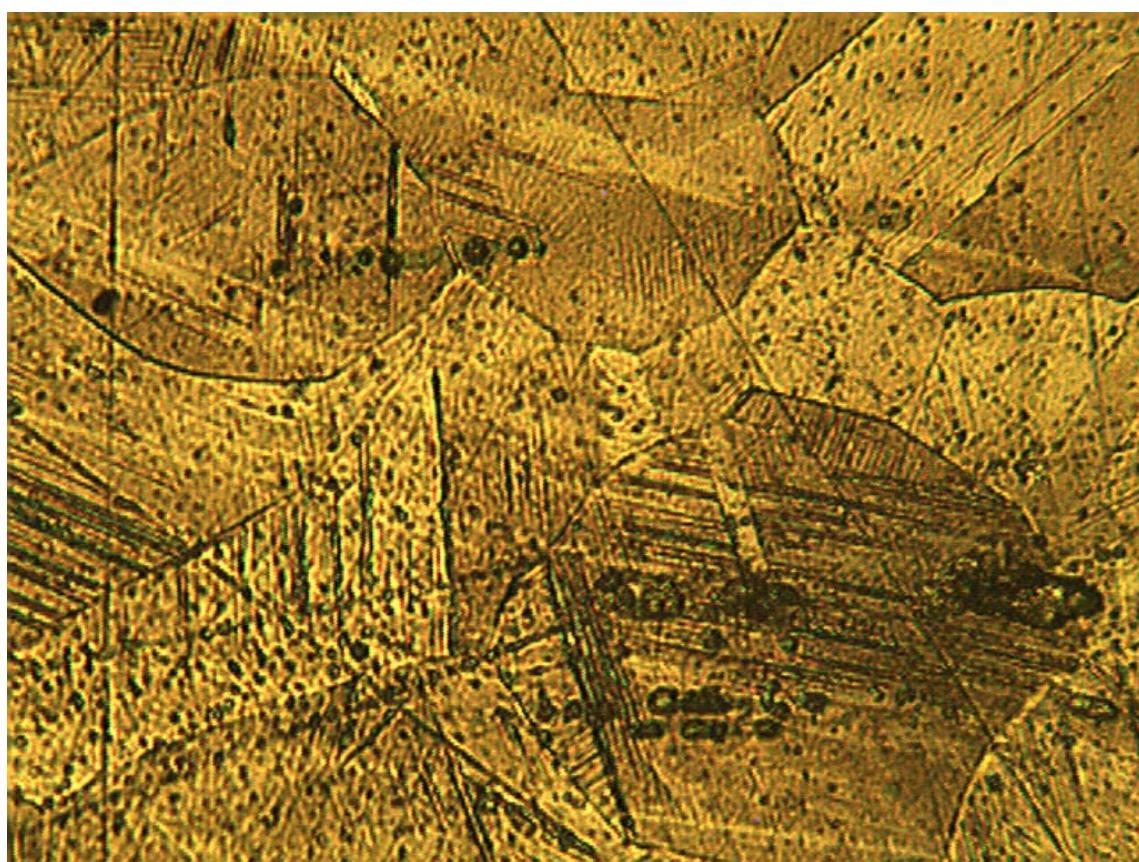
11. Principales techniques d'applications.



12. Peinture au pistolet.



13. Dépôt électrolytique par trempage.

ANEXE : Structures micrographique d'un acier inoxydable attaqué chimique

BIBLIOGRAPHIE

- * FANCHON, Jean-Louis, GUIDE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES, Nathan, AFNOR, 2004.
- * BUTIN, R., PINOT, M., FABRICATIONS MECANIQUES – TECHNOLOGIE III, Foucher, Paris.