



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 | MATERIAUX ET TRAITEMENTS |
| N°: 22 | (PARTIE 1) |



SECTEUR : FABRICATION MECANIQUE

SPECIALITE : TFM

NIVEAU : T

PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : www.marocetude.com

Pour cela visiter notre site www.marocetude.com et choisissez la rubrique :

MODULES ISTA



The screenshot shows the website's navigation bar with the following items: HOME, LIVRES, **MODULES ISTA**, ANNUAIRE ECOLES, DOCTORAT, LETTRE DE MOTIVATION, NOUS CONTACTER, SE CONNECTER. The main header features the logo 'Maroc Etude.Com' and the tagline 'Connaissance - Métier - Technique'. Below the header are links for 'Annonces Google', 'Emploi Maroc', 'Messagerie', 'Telecharger Un Jeu', and 'Maroc Annonces'. A search bar is located on the right side of the header.

The main content area is divided into three columns:

- Left Column:** 'Nous avons 14 invités en ligne', 'Annonces Google', 'Annonces Emploi Maroc', 'Jeux Telecharger Gratuit', 'Jeux PC En Ligne', 'Connexion' (with a dropdown arrow), a login form with fields for 'Identifiant' (containing 'sniper') and 'Mot de passe', a 'Se souvenir de moi' checkbox, and a 'Connexion' button. Links for 'Mot de passe oublié ?' and 'Identifiant oublié ?' are at the bottom.
- Center Column:** 'Notre Bibliothèque que ...Livres à Télé charger Gratuitement', 'MacKeeper -20%' (with Mac and Universal logos), 'Complete your Purchase Now and save 20% Guaranteed with this Coupon Code', 'Apply Discount Automatically' button, and a quote: '"On ne jouit bien que de ce qu'on partage"' [Madame de Genlis].
- Right Column:** 'Annonces Google', 'Jeu De Jeux', 'Jeux Sur Internet', 'Ecole Ingénieur', 'Dépanner et configurer votre réseau à domicile' (with '(Outil de Diagnostic)', 'Wi-Fi / Ethernet', 'Console de jeu', 'Imprimante', and 'Messagerie' listed below).

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'adition..... | 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

| | |
|---------------------------------|-----------|
| METEAUX NON FERREUX..... | 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

| | |
|--|-----------|
| MATIERES PLASTIQUES ET ELASTOMERES..... | 67 |
| I. Propriétés générales et structures..... | 68 |
| II. Thermoplastiques..... | 72 |
| III. Thermodurcissables..... | 74 |
| IV. Elastomères ou caoutchoucs..... | 74 |

CHAPITRE 7

| | |
|--|-----------|
| TRAITEMENTS DE SURFACE..... | 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 |

| | |
|--|-----------|
| ANEXE : Structures micrographique d'un acier inoxydable attaqué chimique..... | 88 |
|--|-----------|

| | |
|---------------------------|-----------|
| BIBLIOGRAPHIE..... | 89 |
|---------------------------|-----------|

1

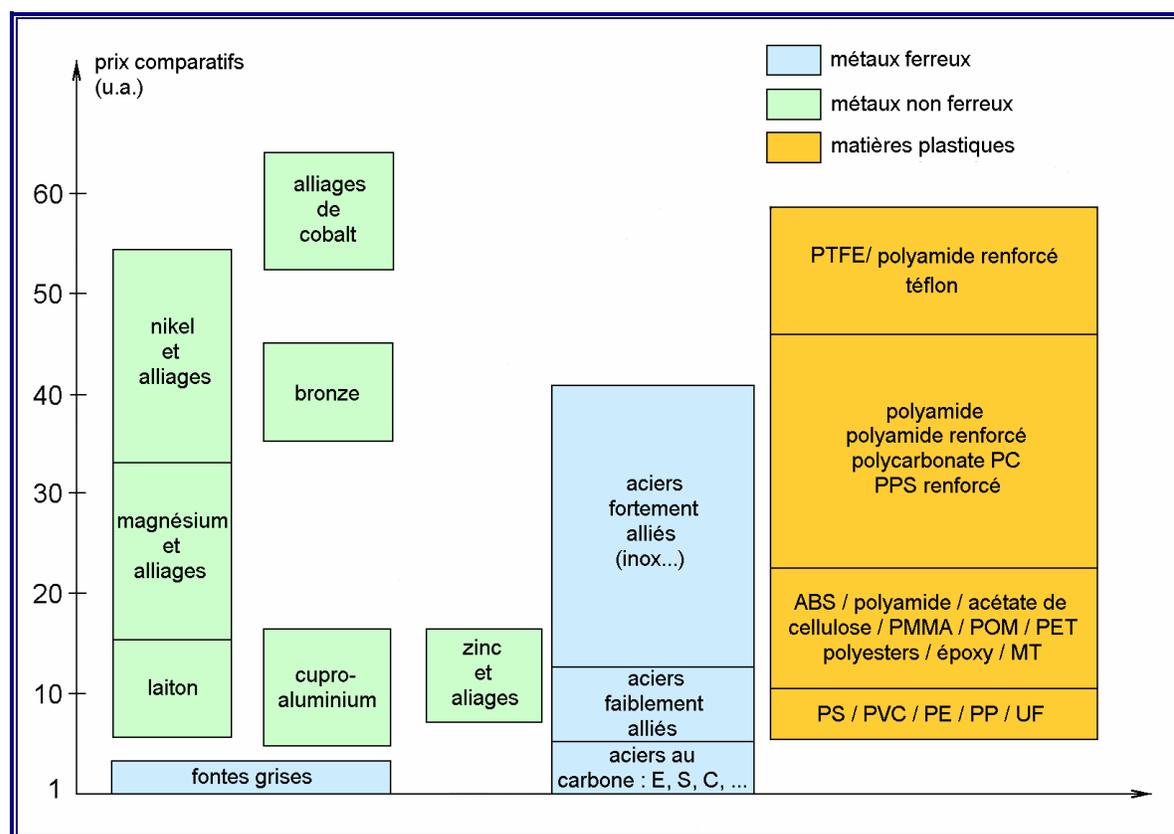
MATÉRIAUX. GÉNÉRALITÉS

OBJECTIFS

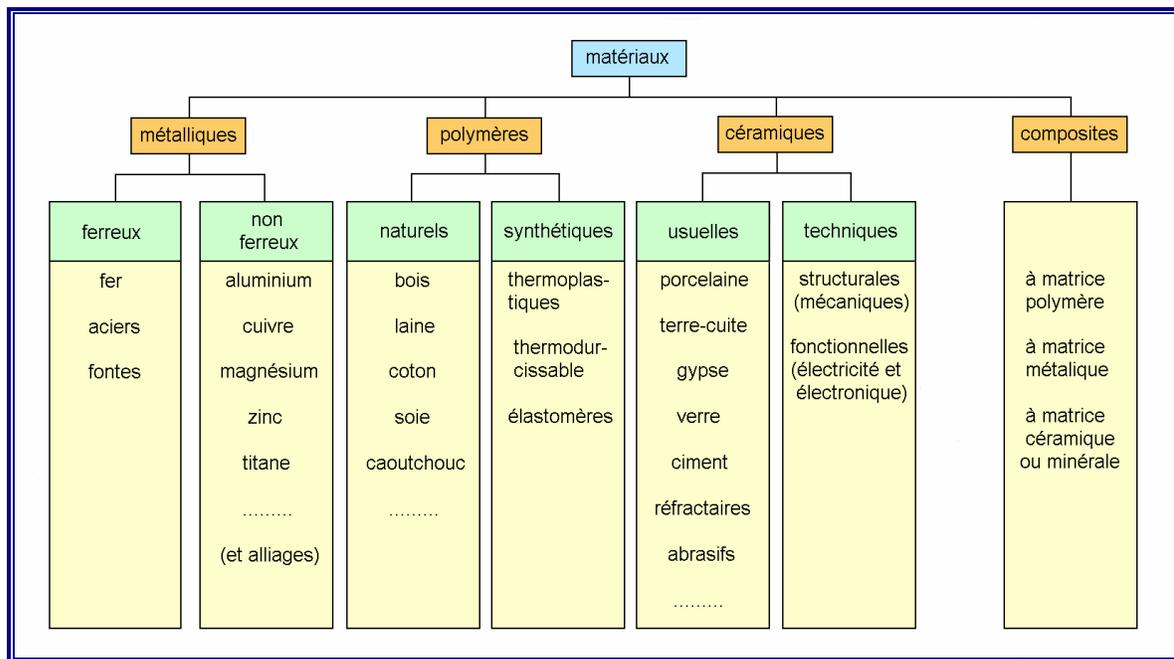
- Présenter les principaux matériaux industriels (métaux, matières plastiques, céramiques et composites).
- Indiquer les propriétés générales des deux principales familles (métaux et matières plastiques).
- Donner quelques notions sur les céramiques et les matériaux composites.

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.

Sélectionner 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.



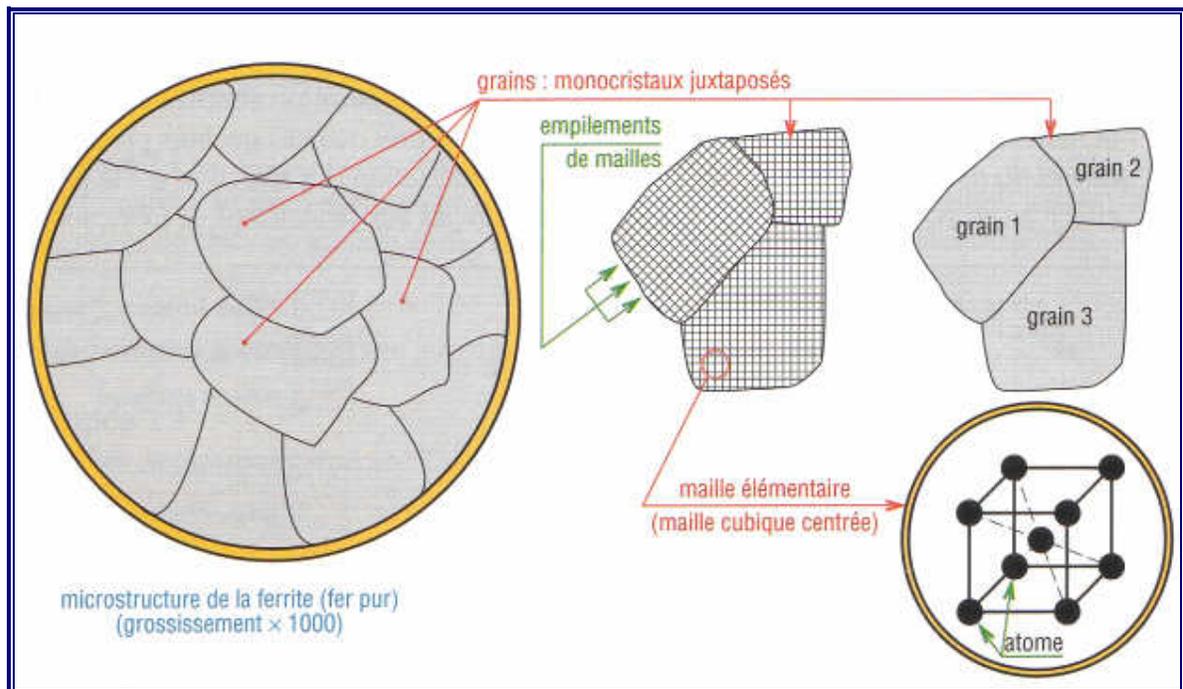
1. Prix comparatifs indicatifs (au kg) des principaux matériaux industriels (u.a. = unité arbitraire).



2. Principales familles de matériaux.

I - Métaux

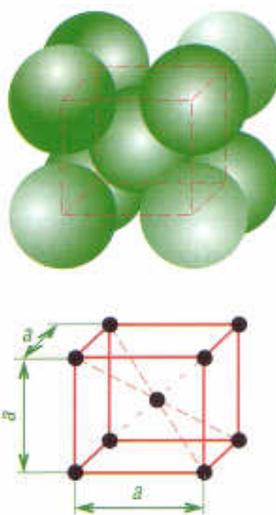
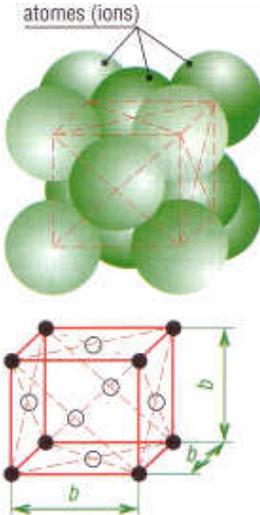
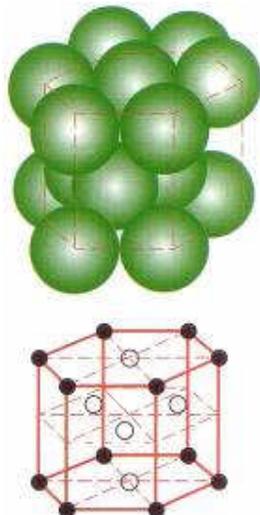
Ils sont étudiés en détail dans les chapitres suivants. Seules les propriétés caractéristiques communes sont abordées ici.



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 | $V = 0,74 \text{ vol. de la maille}$ 6 atomes par prisme |
| exemples | fer α , Mn, Cr, W, Mo, V, Nb, Li, Zr, Ta, Ba, Ti ($> 882 \text{ }^\circ\text{C}$) ... | fer γ , Al, Cu, Ag, Co, Pb, Ni, Au, Pt, Sr... | Mg, Zn, Cd, Be, Co ($< 419 \text{ }^\circ\text{C}$) Ti ($< 882 \text{ }^\circ\text{C}$)... |
| 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 ($< 882 \text{ }^\circ\text{C}$ et $> 882 \text{ }^\circ\text{C}$)...

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.

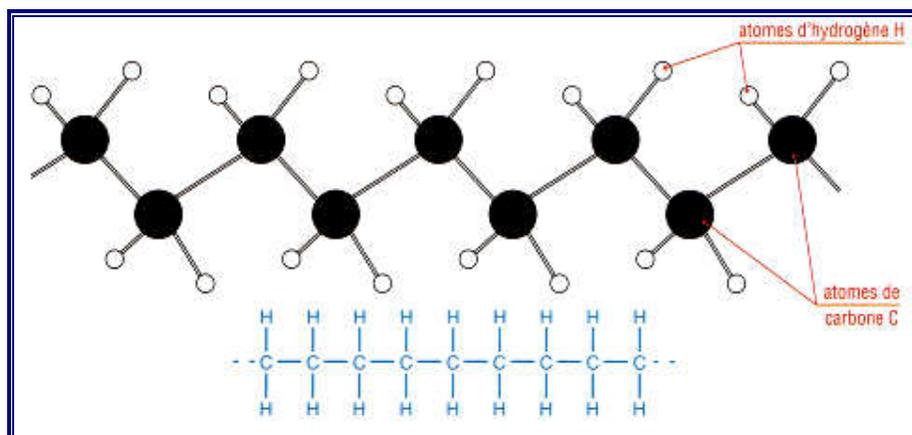
| Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|---------|-----------|------------------|-----------------------|---------|
| corps | symbole chimique | symbole métallurgique | densité | corps | symbole chimique | symbole 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...).

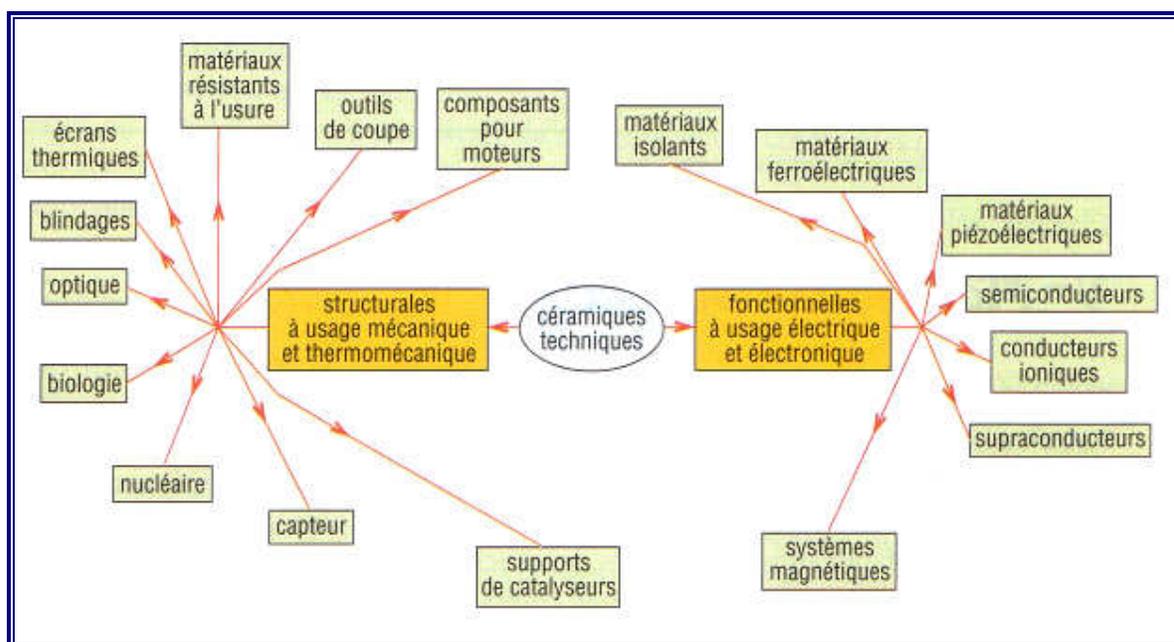
| Céramiques traditionnelles | | | | | |
|----------------------------|-----------------|--|--------------------------|---|--|
| nuances | | matières premières | | exemples d'emploi | |
| produits poreux | terre-cuite | marnes, argiles | | tuiles, briques, horticulture, art | |
| | faïence | argile, 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 | | éviers, lavabos, baignoires | |
| | vitreuses | argile, kaolin, feldspath, silice | | | |
| | porcelaine | kaolin, argile, feldspath, quartz | | vaisselle, art, génie électrique | |
| verres | | silice alumine oxydes chaux magnésie | sodico-calcique | vitres, flacons, ampoules | |
| | | | cristal (oxyde de plomb) | vaisselle, art, optique | |
| | | | borosilicate | résistant aux chocs thermiques | |
| | | | aluminosilicate | résistance à la chaleur | |
| | | | spéciaux | 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), zircon (ZrO₂), nitrures de bore (BN) ou de silicium (Si₃N₄), 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

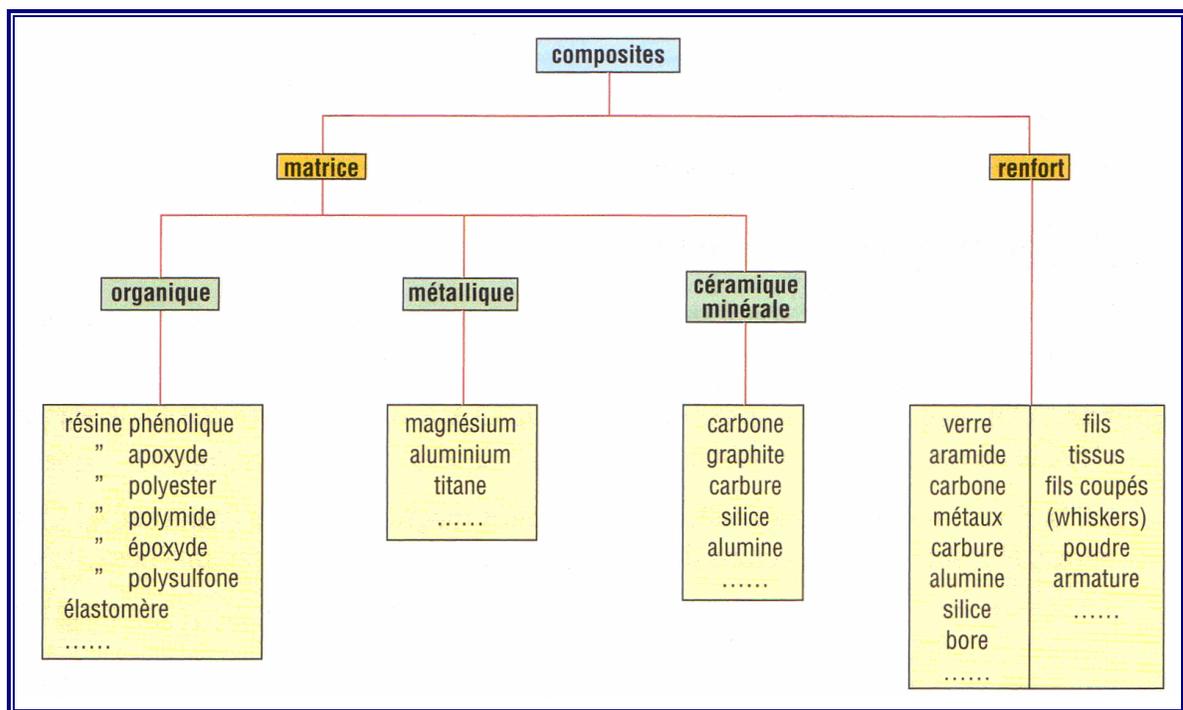
Ils sont composés d'un matériau de base (matrice ou liant : polymère, céramique ou métal) renforcés par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau afin de combiner au mieux les avantages des deux. Les deux corps, de structure différente, ne se mélangent pas (structure hétérogène) au contraire d'un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

2

ESSAIS DES MATÉRIAUX

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, ressuage...).

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/mm^2 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 (tau).

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.



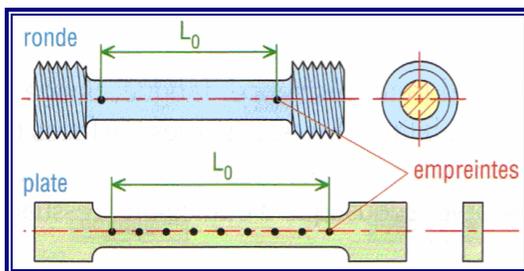
1. Machine de traction.



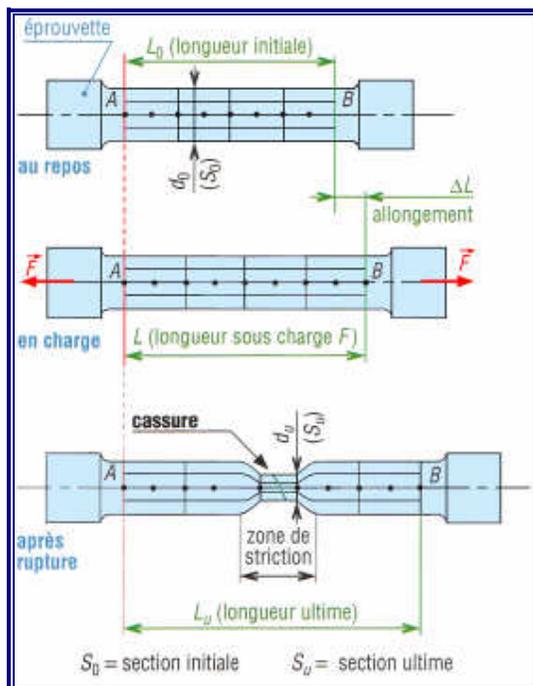
2. Epreuve.



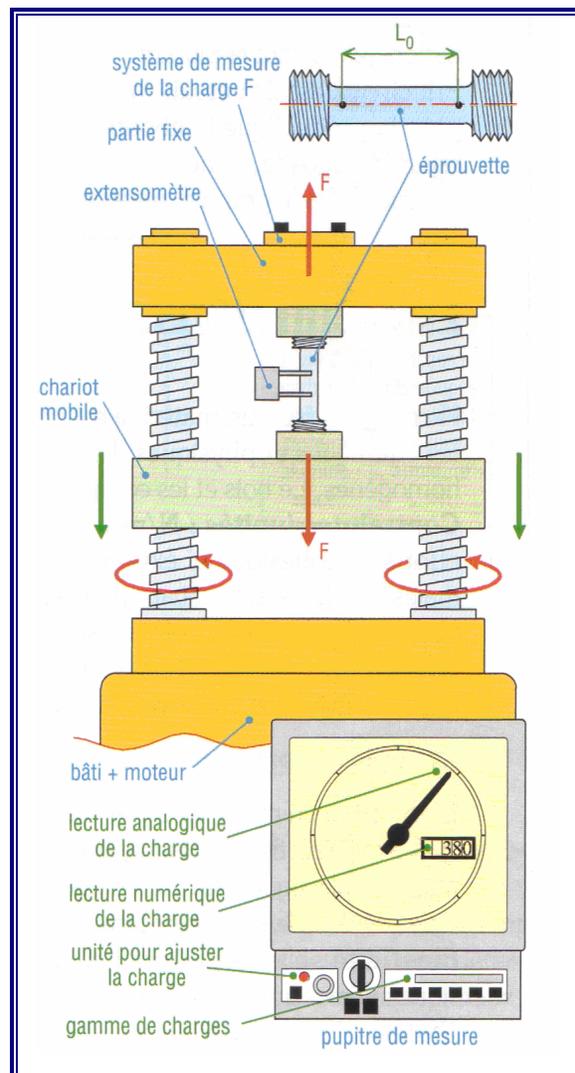
3. Epreuve installée entre les mors de machine de traction.



4. Exemples d'éprouvettes de traction usuelles.



5. Epreuve 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

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

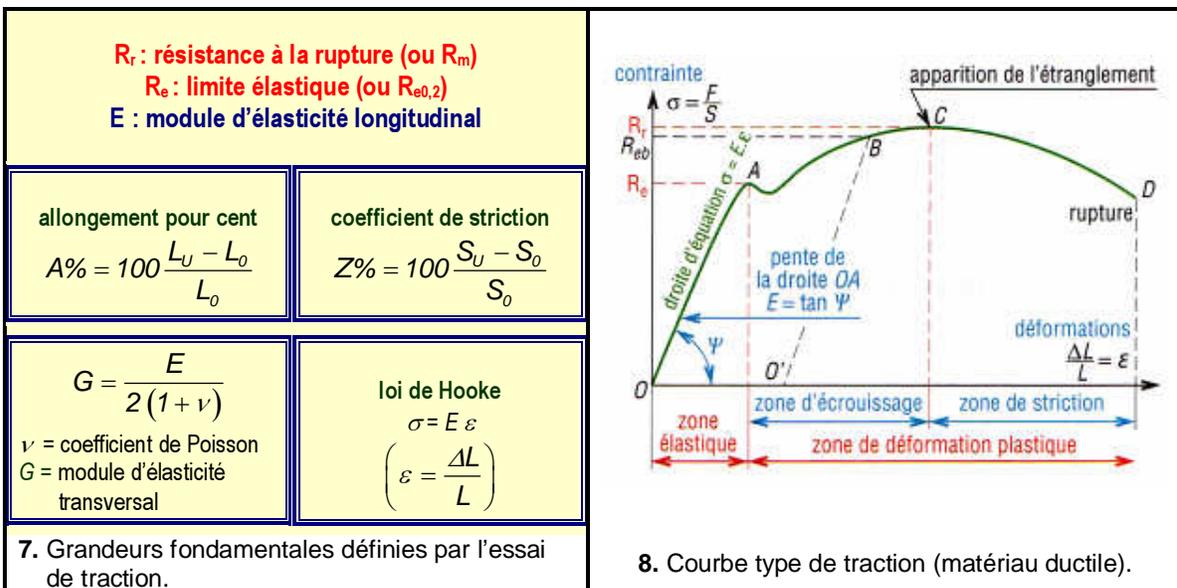
$$\text{Résistance à la rupture } R_r = \frac{F_r}{S_0}$$

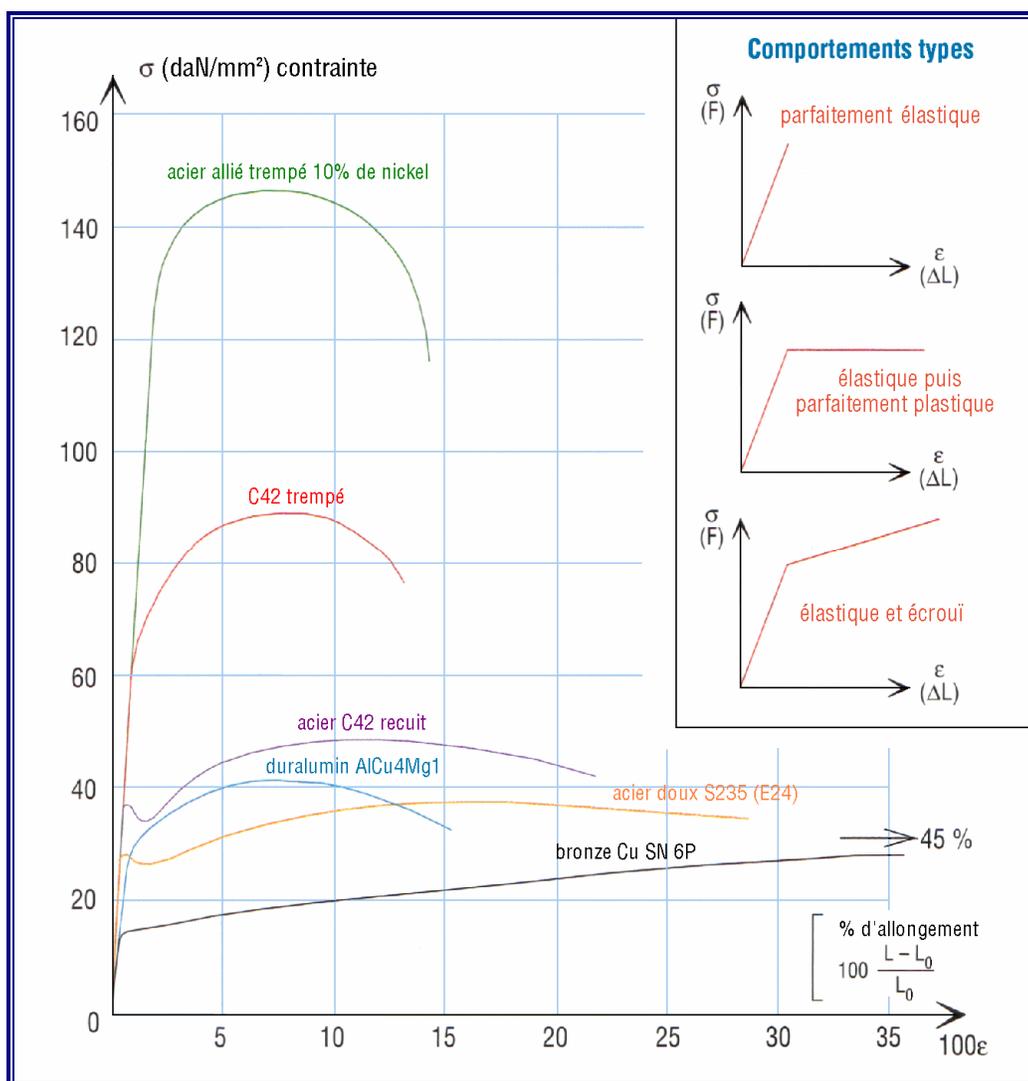
$$\text{Allongement pour cent } A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

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

Loi de Hooke ($\sigma = E\varepsilon$) : 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).

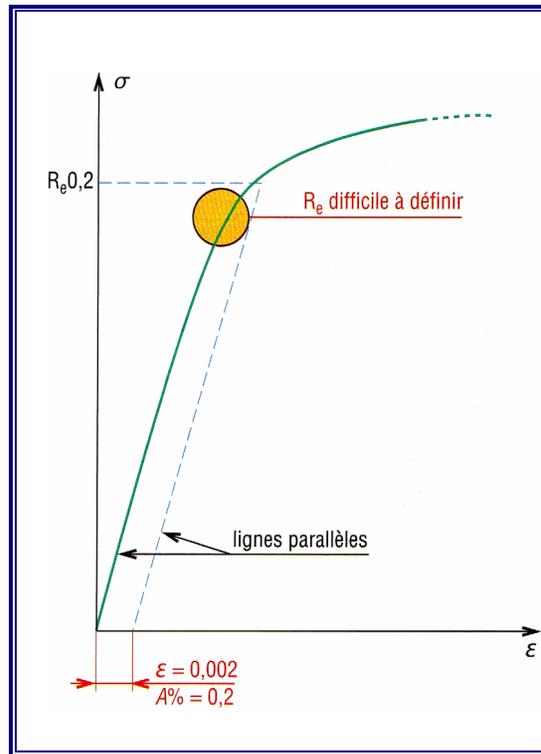
2. Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ ou $R_{p0,2}$ (N/mm²)

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).

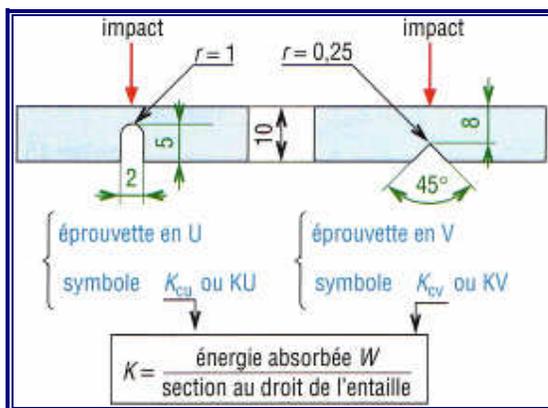
À la remise en charge la nouvelle courbe caractéristique du matériau est devenu O'BC avec $R_{e,b}$ comme nouvelle limite élastique.



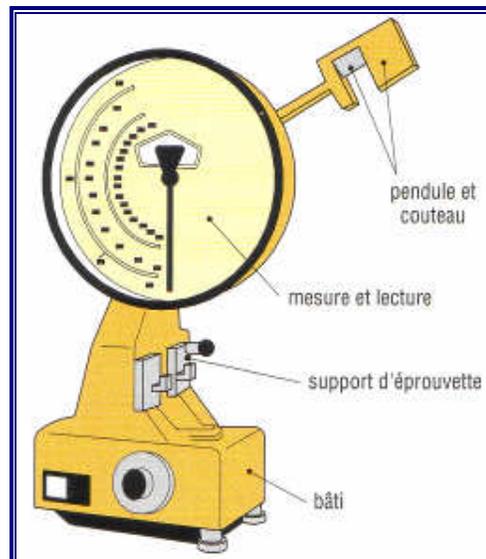
10. Définition de $R_{e0,2}$.

III - Essai de résilience

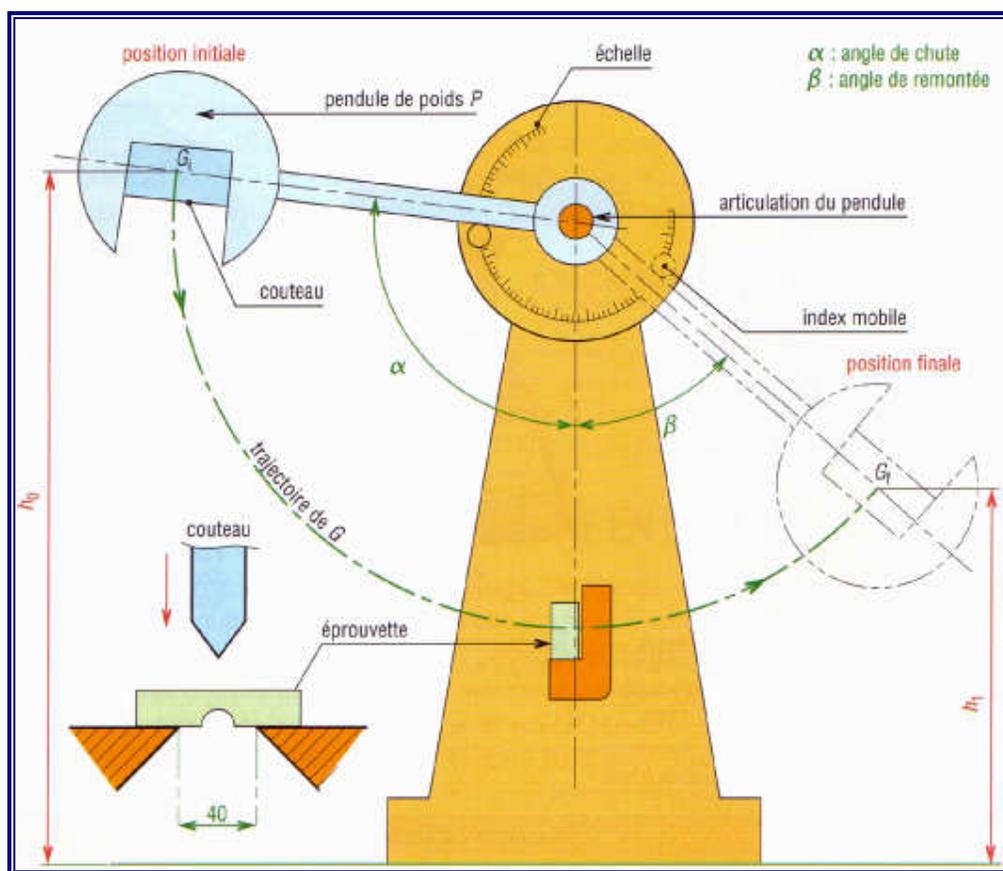
NF EN 10045 - 1



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



12. Machine d'essai de résilience.



énergie potentielle du pendule

au départ : $W_0 = P \cdot h_0$
à l'arrivée : $W_1 = P \cdot h_1$

énergie absorbée par l'éprouvette

$W = P(h_0 - h_1)$
 $= W_0 - W_1$

W_0 nominale = 300 J (Charpy)

13. 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 ($W_1 = P \cdot h_1$) :

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

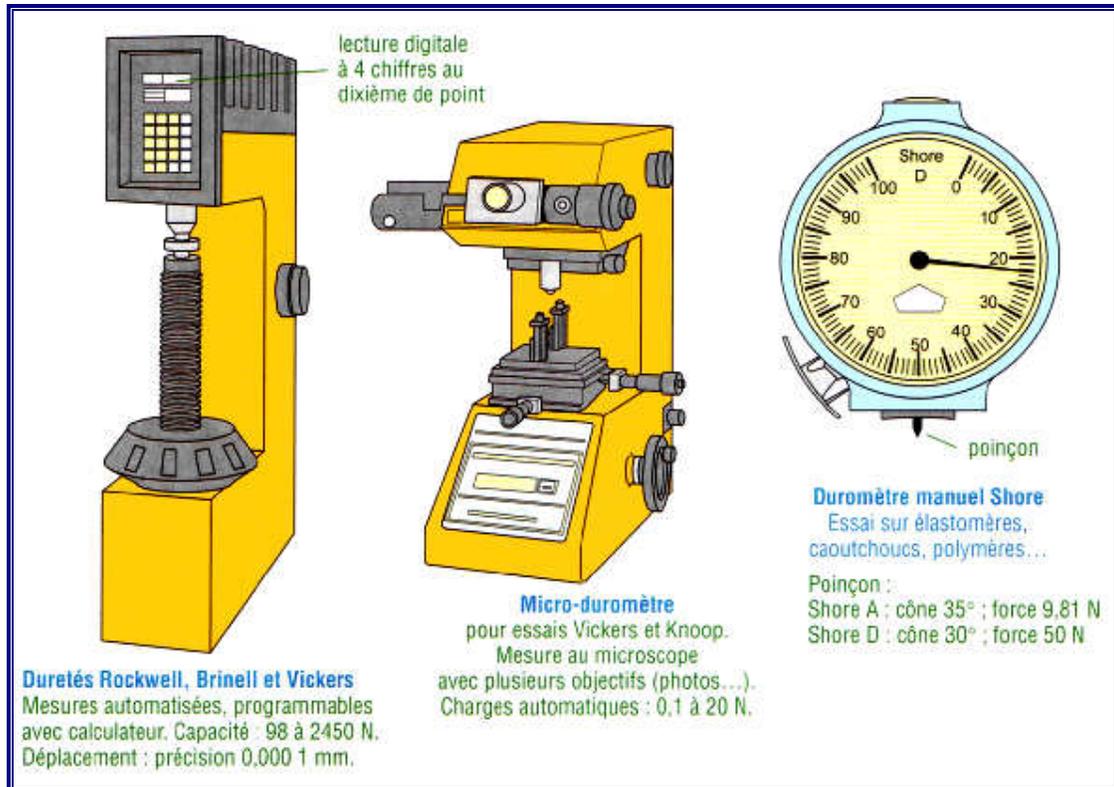
La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille (fig. 11).

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 | <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>bille $\varnothing d$ en carbure</p> </div> <div> $HBW = \frac{0,102 \times F}{S}$ <p>avec</p> $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm) 0,981 ≤ F ≤ 2 942 daN</p> </div> </div> |

| <p>Vickers HV</p> | <p>HV 100 HV 50 HV 30 HV 20 HV 10 HV 5 ... HV 0,01</p> | <p>pyramide à base carrée 136°</p> <table border="1"> <tr> <th>HV</th> <td>HV 100</td> <td>HV 50</td> <td>etc.</td> </tr> <tr> <th>F (N)</th> <td>980,7</td> <td>490,3</td> <td>...</td> </tr> </table> <p>pour HV 100, F = 100 kg</p> | HV | HV 100 | HV 50 | etc. | F (N) | 980,7 | 490,3 | ... | <p>$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ avec</p> $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d₁ et d₂ en mm) Variante : essai Knoop d₁ = 7,1 d₂ HK = 14,2 F/d₁² angle 172,5°</p> |
|-------------------------------|---|---|-------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-----|---|
| | HV | HV 100 | HV 50 | etc. | | | | | | | |
| F (N) | 980,7 | 490,3 | ... | | | | | | | | |
| <p>Rockwell HR</p> | <p>HRA HRC HRD HRB HRE HRF HRG HRH HRK etc.</p> | <p>cône ou bille 120°</p> <p>précharge (marquage) F₀ (100 N) mise en charge F + F₀ relâchement F₀</p> <p>h = enfoncement rémanent dureté HR = 100 - $\frac{h}{0,002}$</p> <p>échelle de dureté (C, B, A...) billes : d = 1,5875 ou 3,175 mm</p> | | | | | | | | | |

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 :

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

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

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 $e \geq 10 h$ 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 :

$$R_m = 3,5 HB$$

$$N / mm^2$$

- 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.

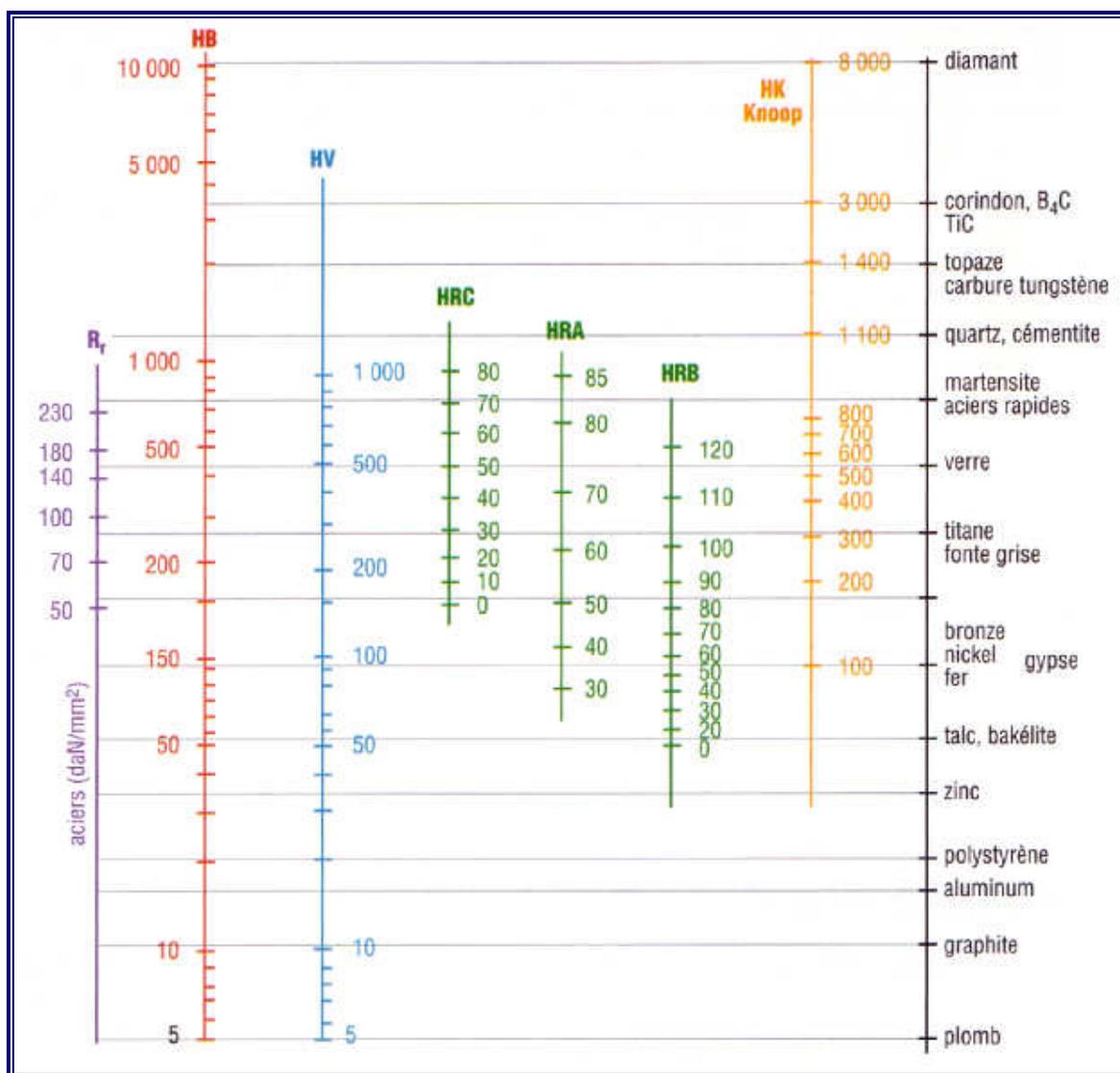
Il consiste à imprimer en deux étapes un pénétrateur, **bille d'acier** ou **cône de diamant**, dans le matériau à tester en exerçant deux charges d'intensité connue F_0 et F_1 .Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un 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_f 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.

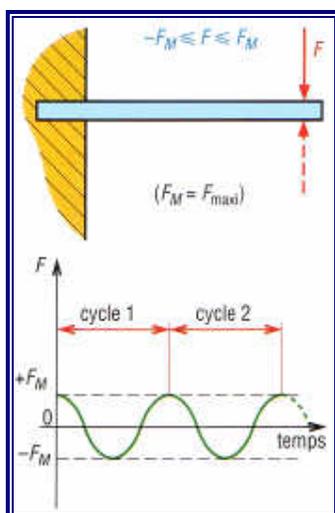
La chaleur accentue fortement le phénomène. Certains matériaux (matières plastiques...) sont sensibles au fluage à température ambiante.

VI - Essai de fatigue ou d'endurance

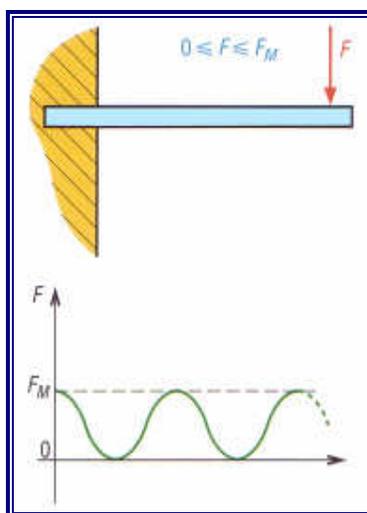
1. Phénomène de fatigue

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.

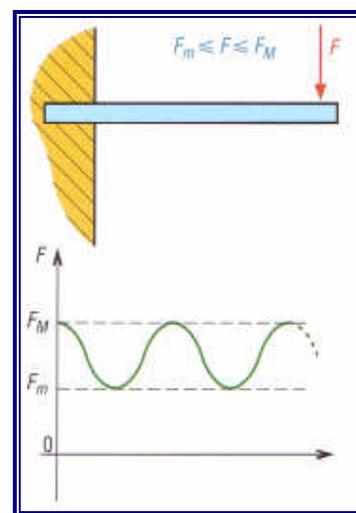
La rupture peut se produire, après un certain nombre de cycles ou allers et retours, sous des efforts bien inférieurs aux limites usuelles du matériau (R_t et R_e).



17. Charge alternée.



18. Alternée dans une seule direction.

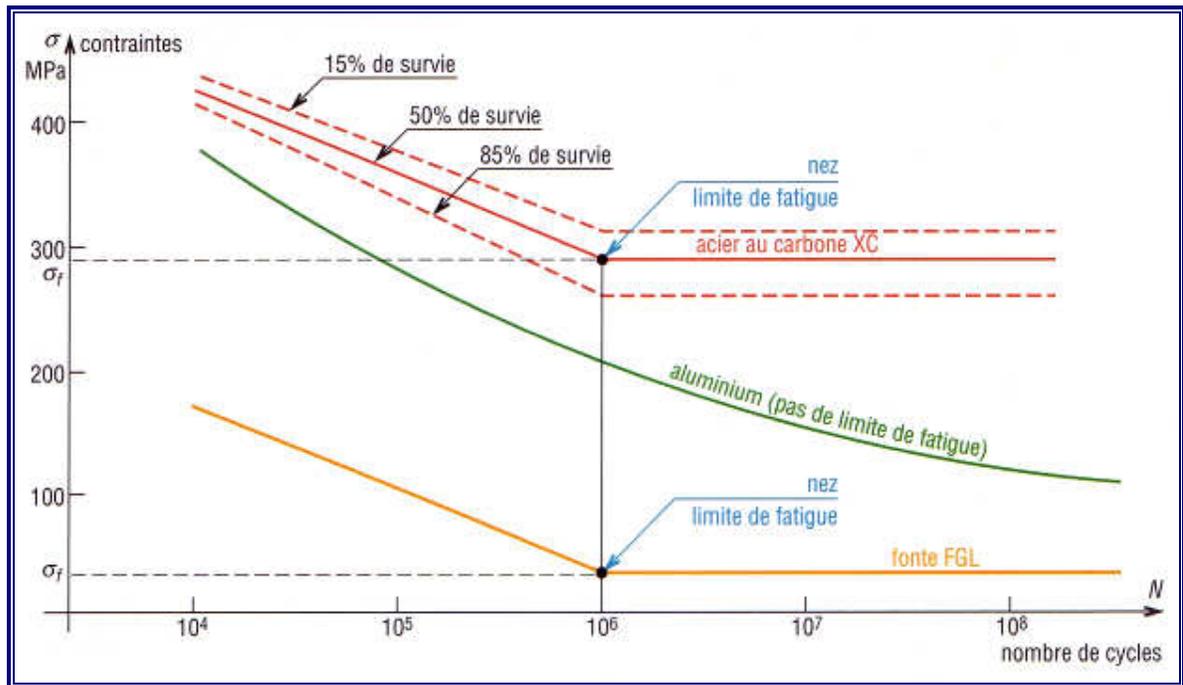


19. Charge ondulée.

2. Essai de fatigue

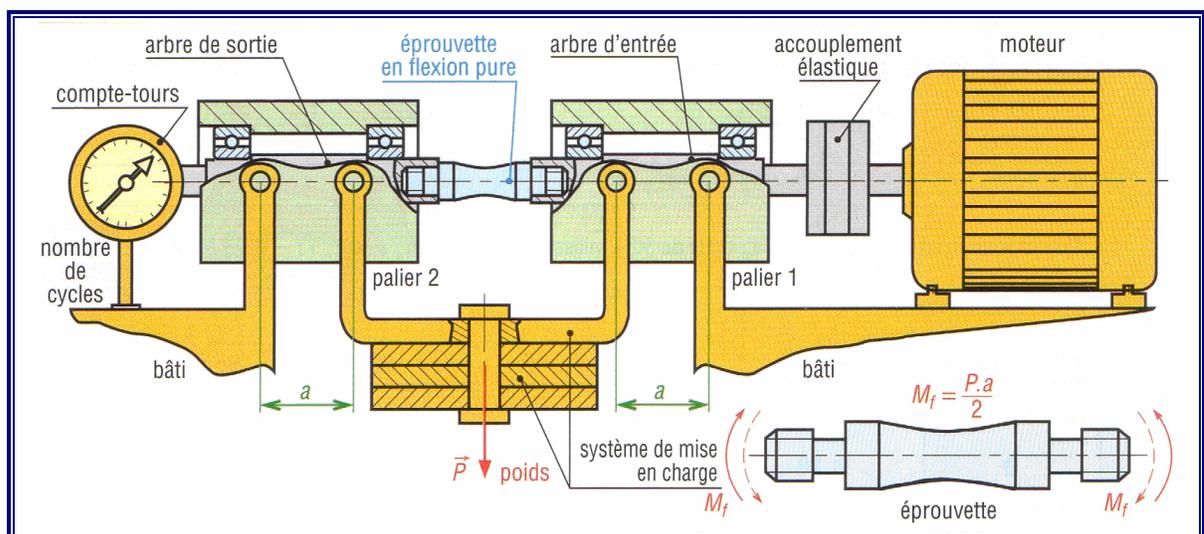
C'est un essai statistique dans la mesure où des éprouvettes identiques, sous les mêmes conditions d'essai, donnent des résultats différents. Il y a une répartition statistique des résultats autour d'une valeur moyenne ou médiane.

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.

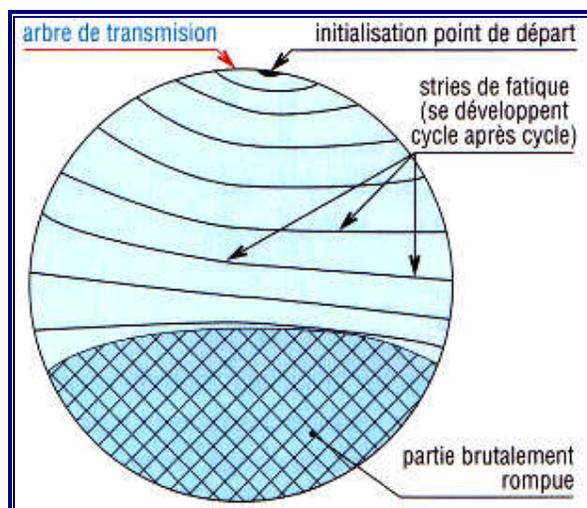
Il y a trois types d'essais de fatigue : traction compression, torsion alternée et flexion alternée « le plus classique », l'éprouvette est soumise à un couple de flexion pure alternée M_f .



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 | aciers de construction $R_r < 1\,400 \text{ N/mm}^2$ $HB < 400$ | 10^7 |
| | 0,4 | aciers 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 | aciers | 10^7 |
| | 0,32 | fontes grises FGL | 10^7 |
| | 0,22 | alliages de cuivre | 10^7 |
| traction alternée | 0,43 | aciers | 10^7 |

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|-------|
| Pour des pourcentages de survie différents de 50% utiliser la relation : $\sigma_{fn} = \sigma_{f50} (1 - 0,08 b)$ avec : | | | | | | |
| n % de survie | 90 | 95 | 98 | 99 | 99,9 | 99,99 |
| b | 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 jauges de contraintes et leur orientation ; l'orientation des craquelures est toujours perpendiculaire à la direction de la déformation en traction la plus importante.

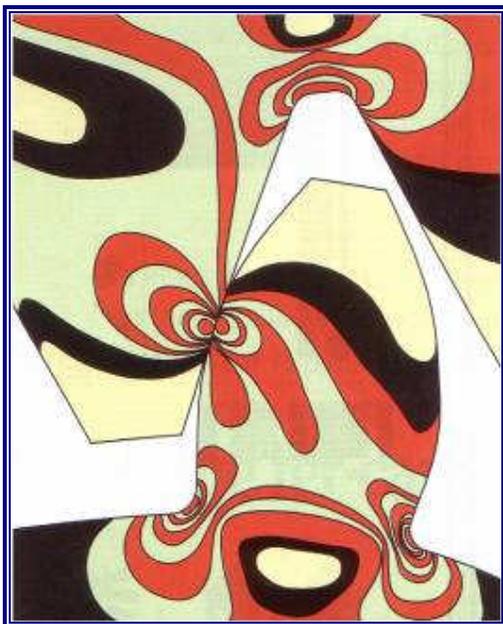
2. Méthodes photoélastiques

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...).

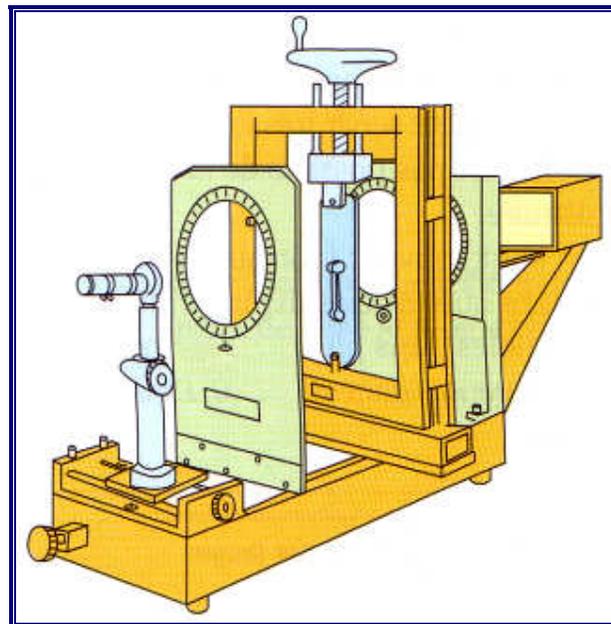
Une matière plastique transparente est utilisée pour modéliser l'objet réel. Un système optique spécial (polariscope), permet d'observer des motifs colorés, interpréter et visualiser les zones contraintes. Il est ainsi possible, par dessins et essais successifs, d'améliorer la définition des objets.

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

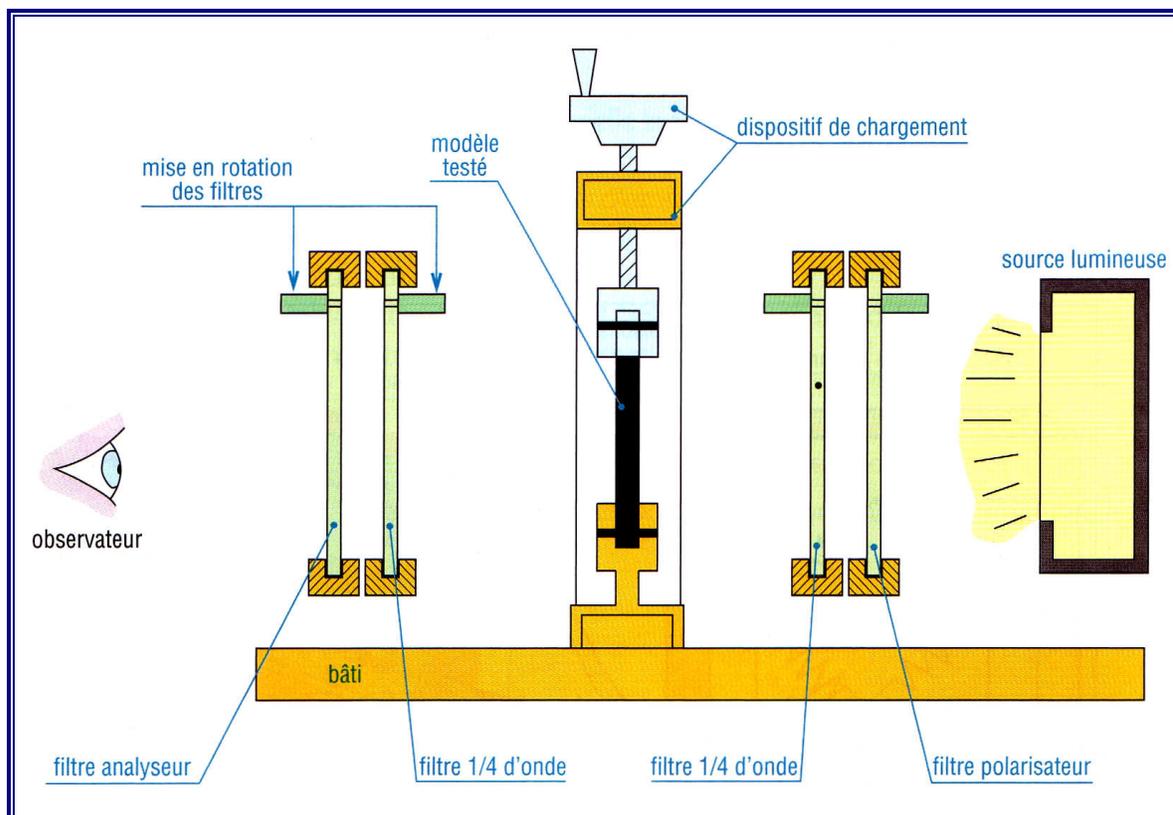
L'étude dans les trois dimensions est envisageable par tranches découpées dans des modèles 3D « figés ».



23. Motif obtenu par photoélasticité.



24. Exemple de polariscope par transmission.



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

3. Extensométrie électrique

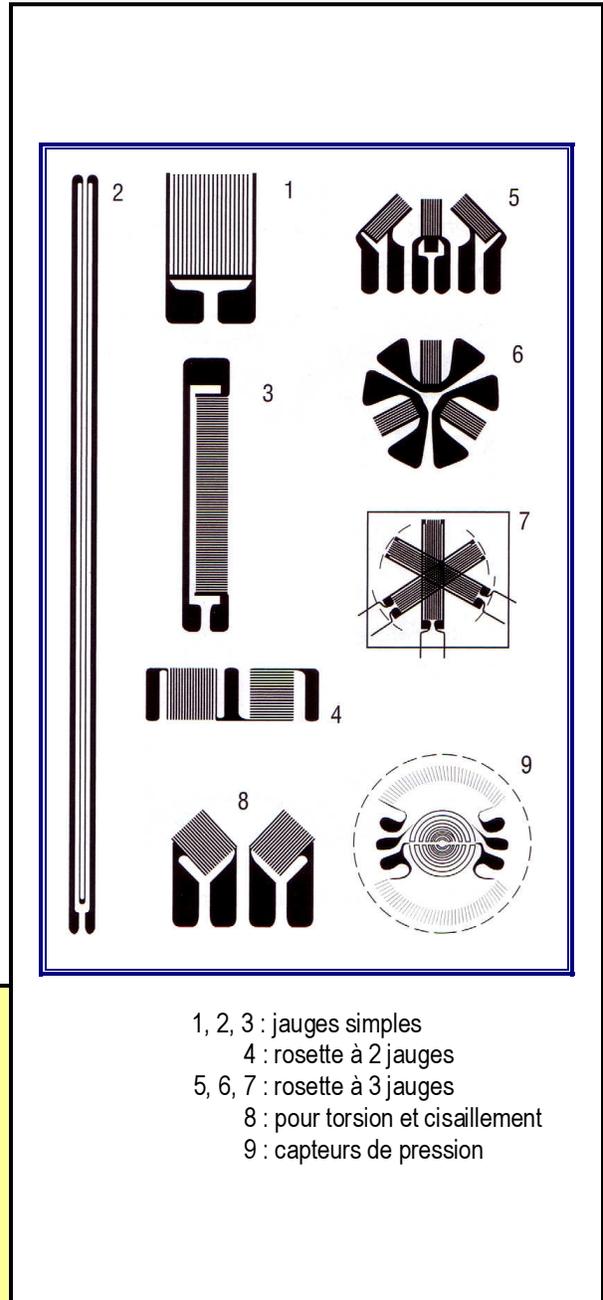
Elle est basée sur l'emploi des jauges de contraintes. C'est la méthode expérimentale la plus usuelle pour vérifier les résultats théoriques (calculs de contraintes, de déformations...).

Les jauges 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.

Jauges 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 jauges 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 jauges

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

avec ΔR : variation de résistance

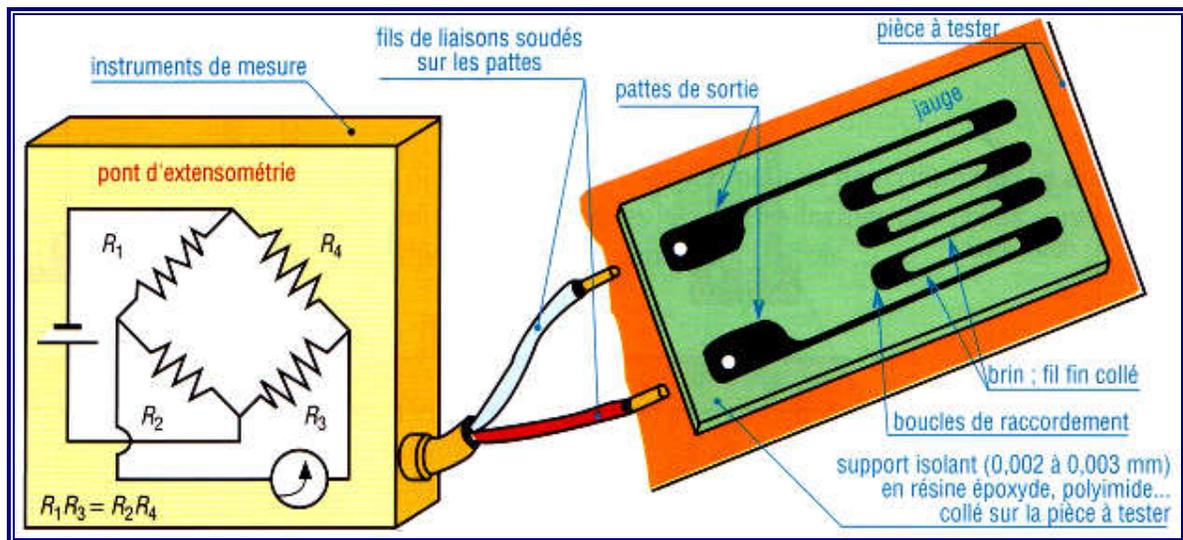
ΔL : allongement du brin

K : facteur de jauge

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

26. Propriétés des jauges.

27. Exemples de jauges.



28. Principes d'utilisation des jauges.

3

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 (aciers 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

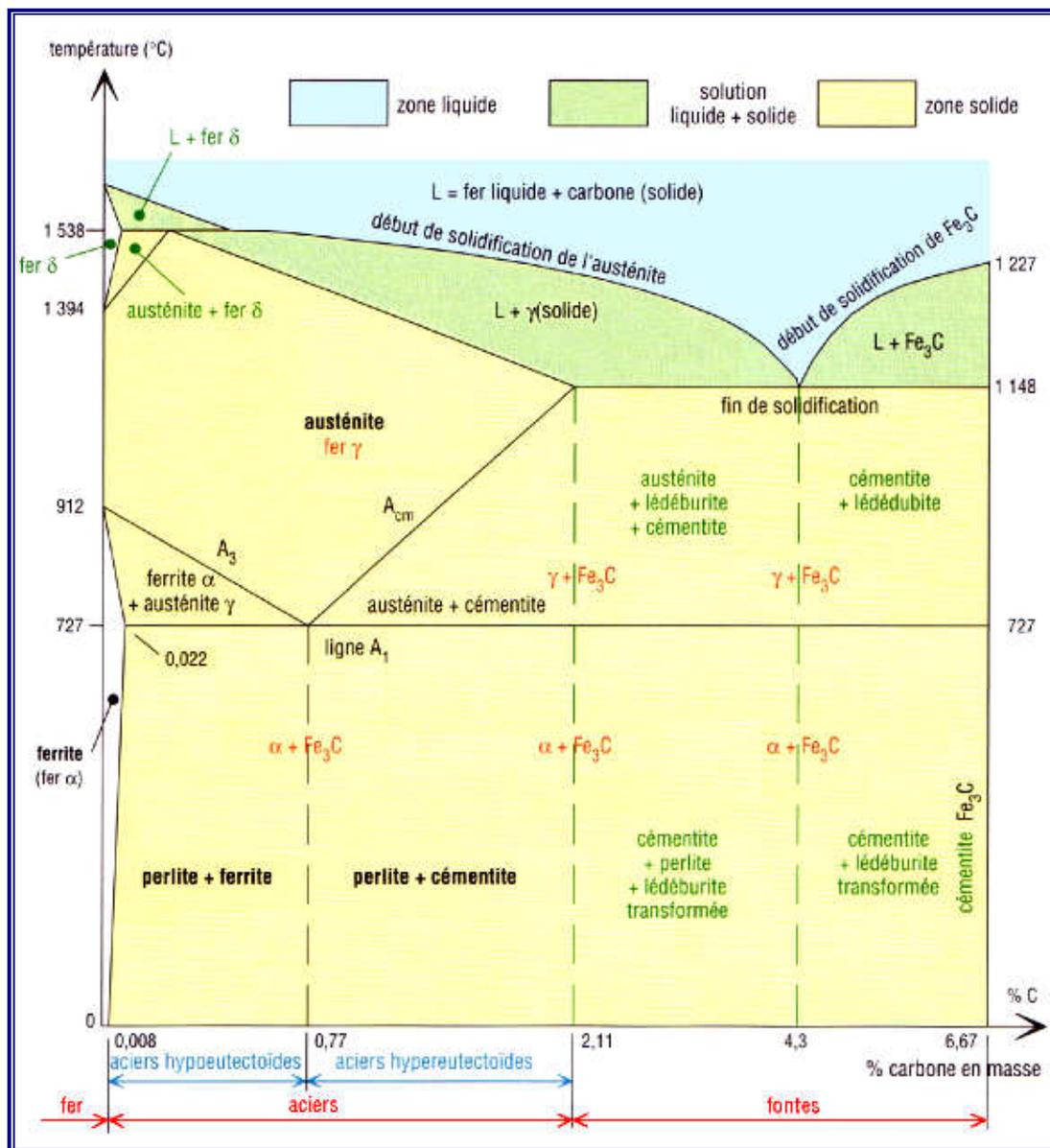
Il fond à 3 500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée.

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 : A_{r1} signifie passage de la ligne A_1 lors d'un refroidissement ; A_{c3} 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)

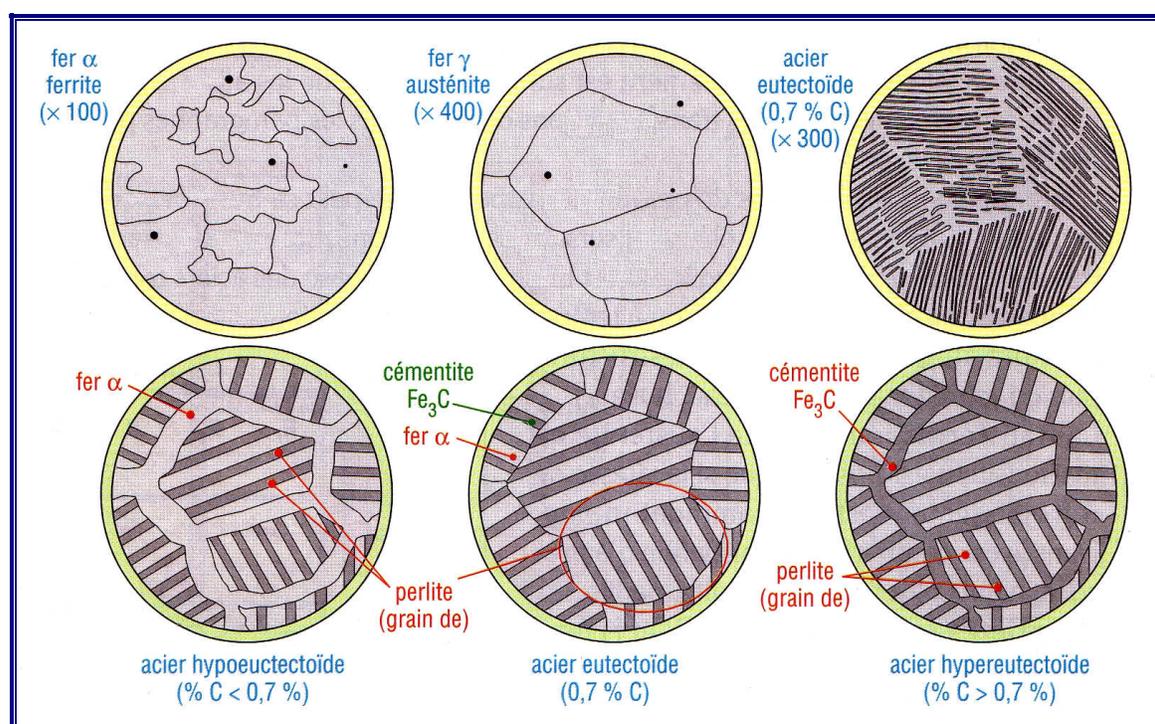
Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite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

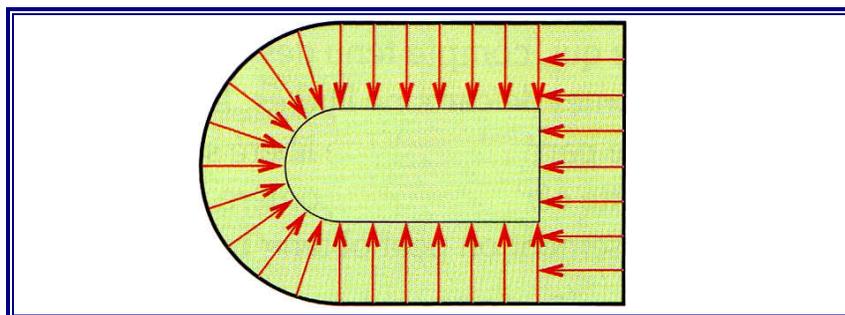
Exemples : un acier à 1,2 %C contient 6 % de cémentite et 94 % de perlite ; un acier à 1,4 %C contient 9,5 % de cémentite et 90,5 % de perlite...



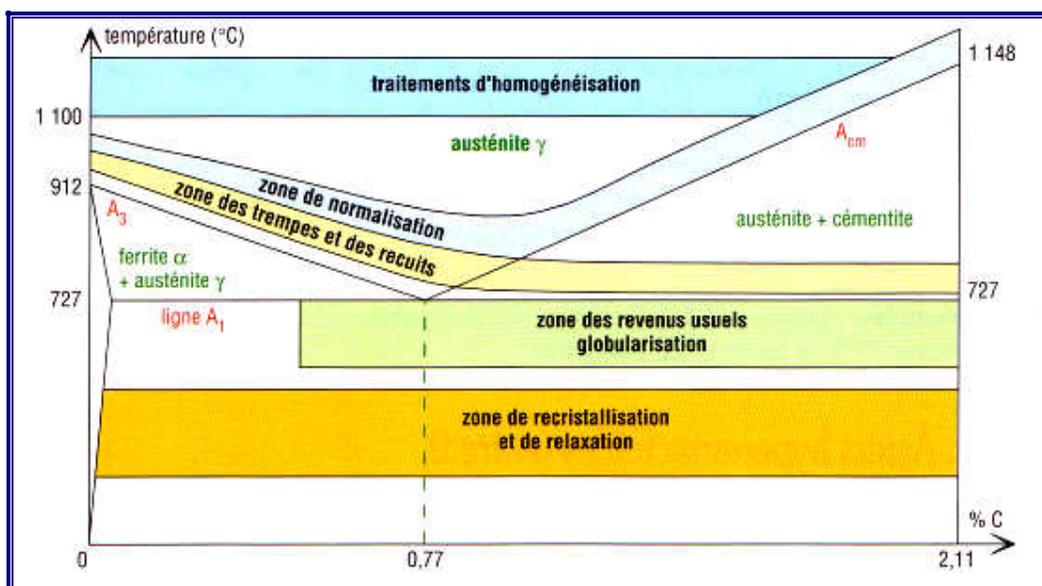
2. Microstructures des aciers en fonction du pourcentage de carbone (grossissement x 400).

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 coeur 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.

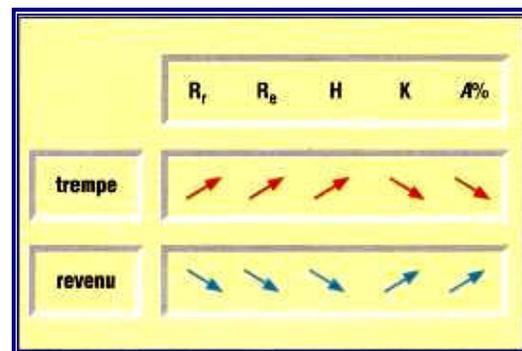
L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite. La solution de fer obtenue, sursaturée en carbone, est appelée martensite ; elle est très dure, HB =750, et très fragile). C'est le constituant de base des aciers trempés.

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...).

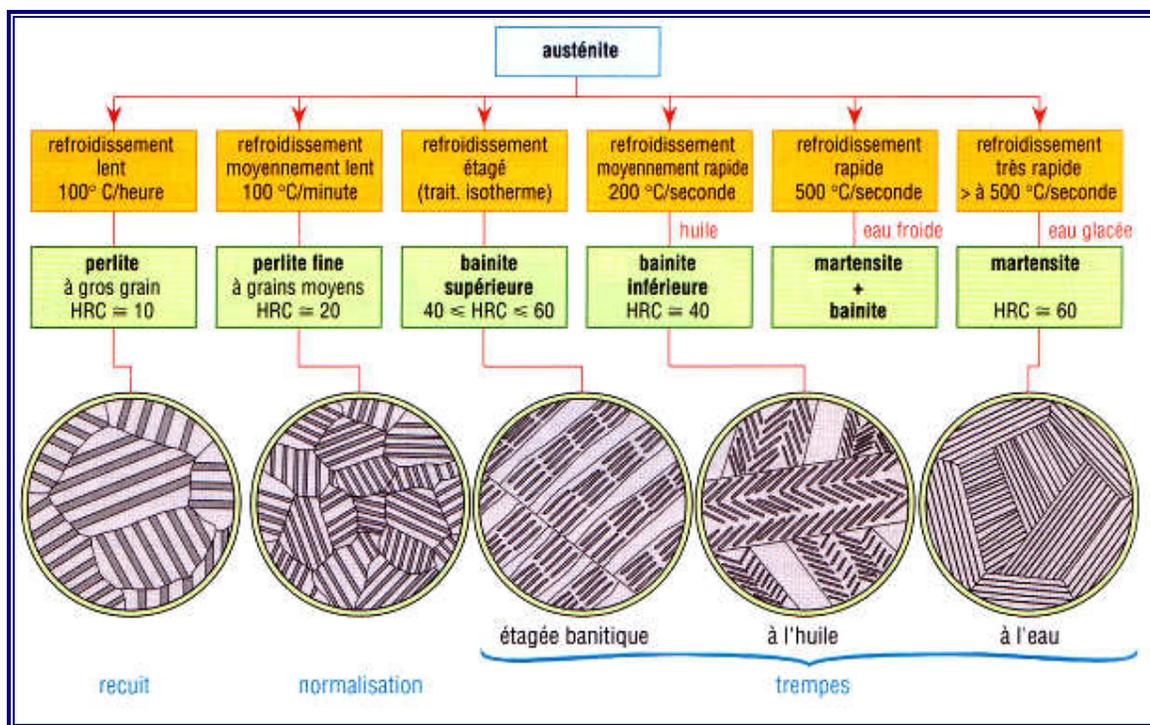
La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide.

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) Trempe 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 trempe étagées martensitique et bainitique sont les plus utilisées.

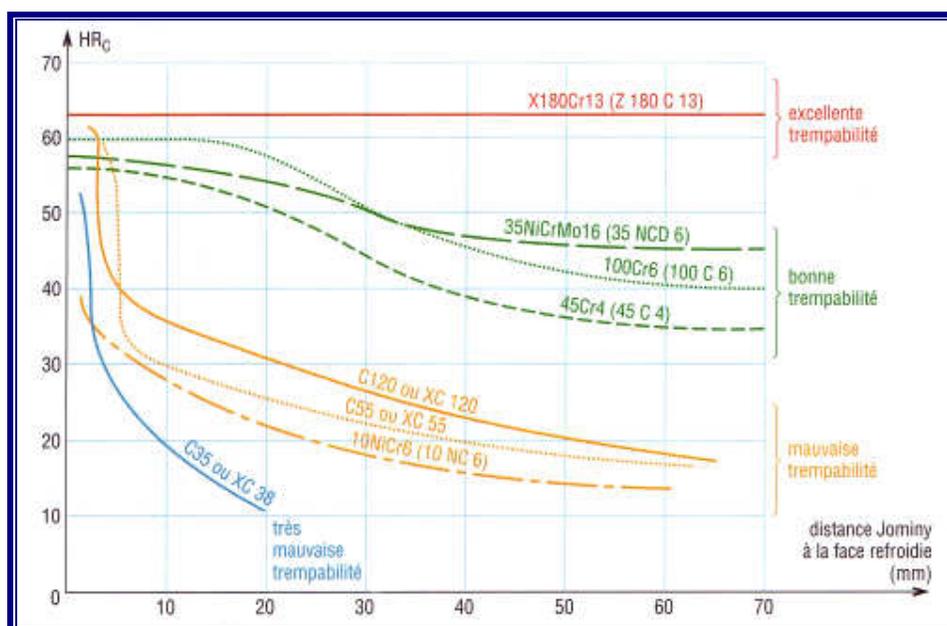
Entre 0,4 et 0,7 %C la pénétration de la trempe se limite à une profondeur de 20 mm environ. Ceux au-dessous de 0,35 %C ne sont pas considérés comme trempables.

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 criques, 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.

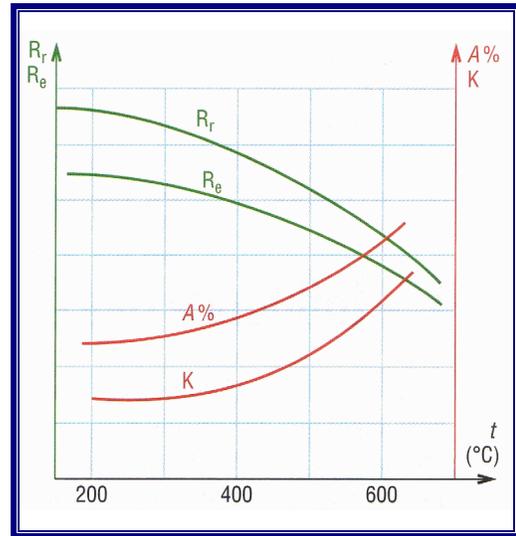
2. Revenu

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_r , 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.

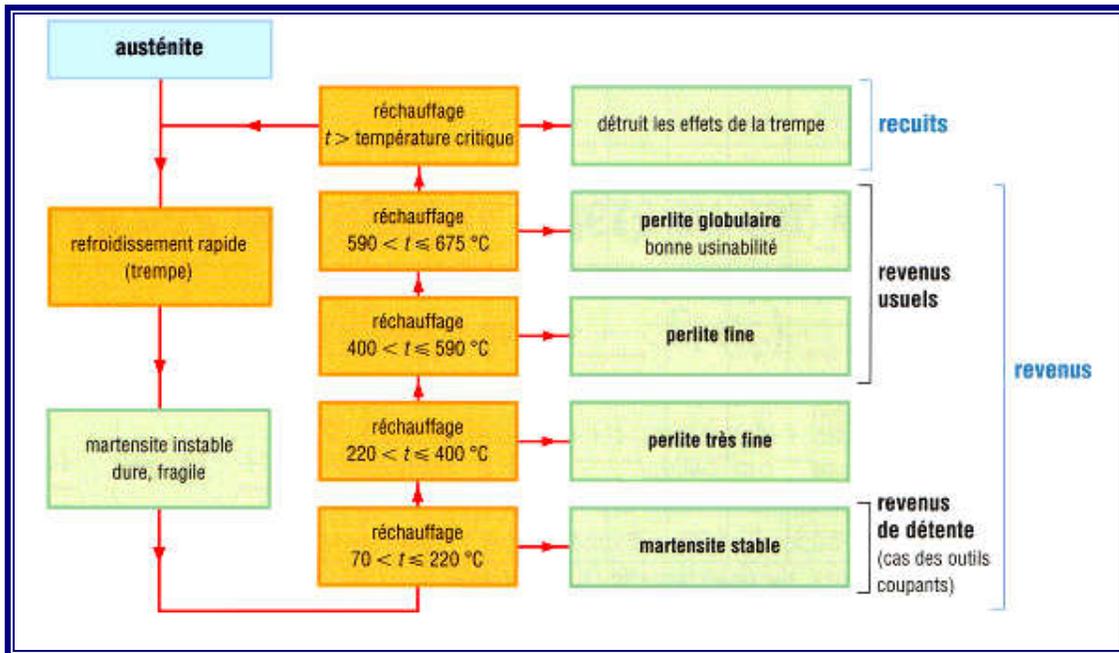
Propriétés : augmentation de K et de A% ; atténuation des contraintes internes. Inconvénients: diminution de H, de R_r et R_e. Les résultats dépendent essentiellement de la température de réchauffage.



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.

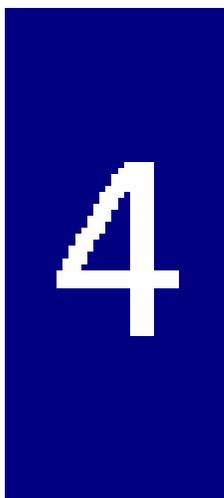
Silicium : utilisé comme désoxydant, c'est l'élément d'alliage des aciers évocation électrique (diminution du magnétisme). Il améliore la résistance des aciers faiblement alliés et la trempabilité des aciers sans trace de graphite.

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 (aciers 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.

| Influence des principaux éléments d'addition sur les caractéristiques des aciers | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|------------|---|----------------------|------------------------|
| élément | symbole chimique | trempabilité | durcissement à la ferrite | revenu ou détente | R _r et dureté | A % (ductibilité) | K (résilience) | soudabilité | forgeabilité | usinabilité | magnétisme | résistance à la corrosion et à la chaleur | 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'aciers 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'aciers 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 (≈ 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 »)

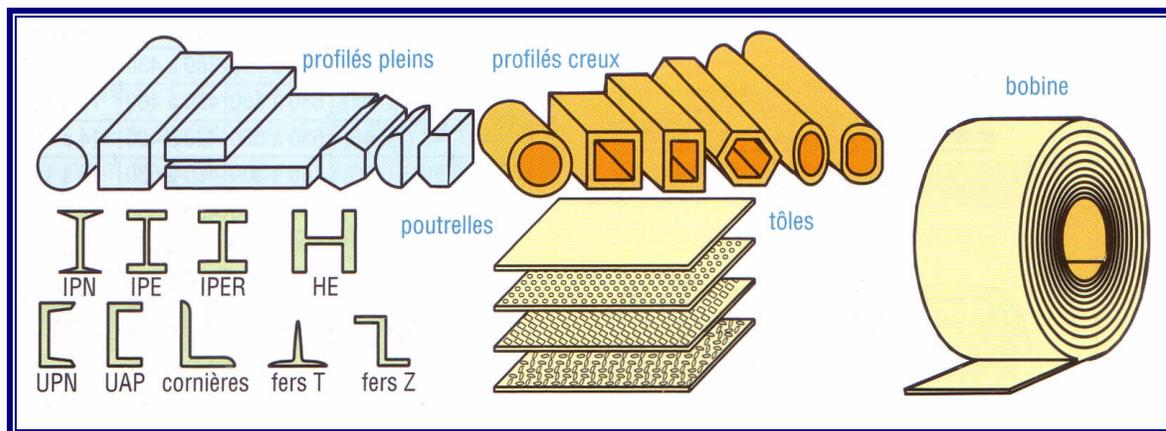
1. Aciers non alliés d'usage général (S, E, etc.)

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-fini :

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 profils pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de consommation...

a) Désignation normalisée

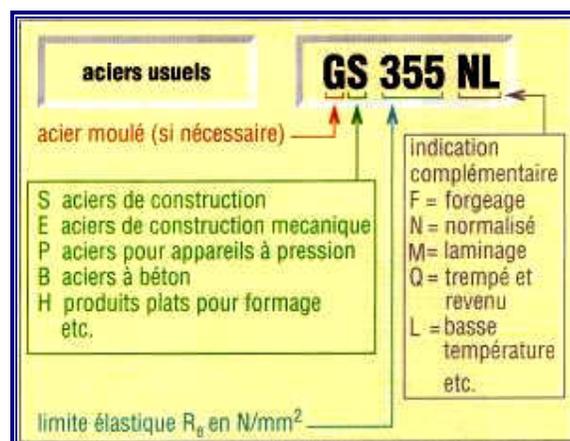
Lettre (S, E, etc.) suivie de la limite élastique

à la traction R_e en MPa ou N/mm^2 . S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G.

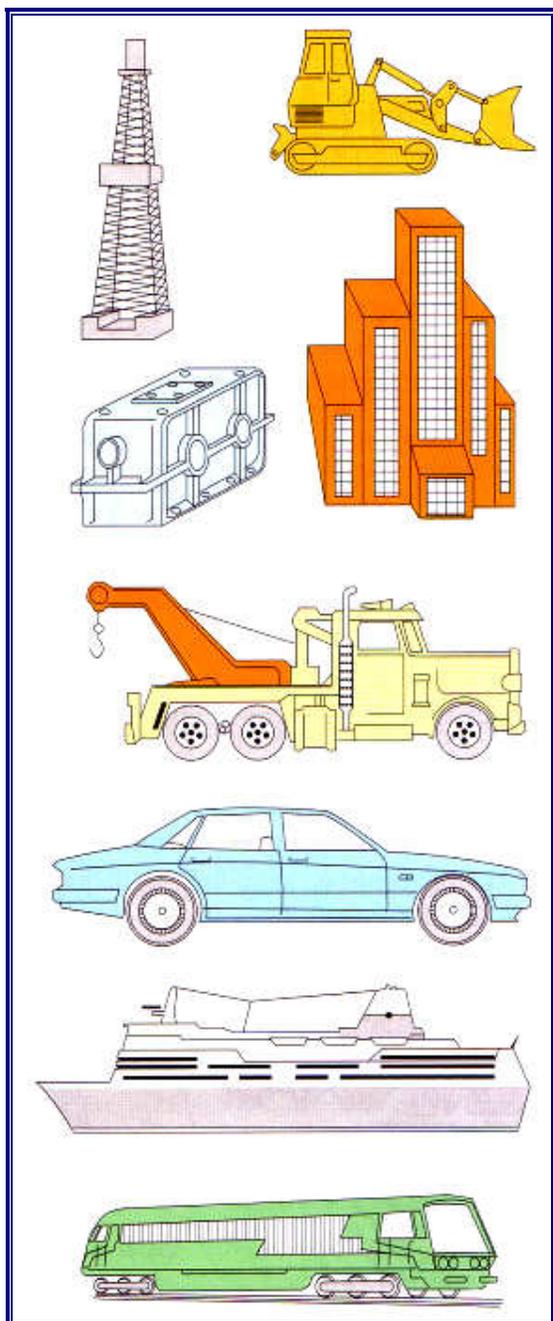
Exemple : GE 335, GS 235, etc.

b) Principales nuances normalisées

Remarques : les valeurs de R_r , 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.



3. Exemple d'objets utilisant 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 |
| aciers 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 |
| aciers 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 trempé + 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 trempé superficielle | | | | |
| C 40 (XC 42 TS) | dureté de la couche trempée = 55 HR _c | | | |

(Entre parenthèses ancienne désignation).

2. Aciers spéciaux, non alliés, de type C

Destinés aux traitements thermiques (trempé, 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 soufre, C = formage à froid, S = ressort, D = tréfilage...).

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

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 | trempabilité | taille des pièces | exemple d'utilisation propriétés |
| famille | désignation | ancienne désignation | R _p (daN/mm ²) | R _b (daN/mm ²) | A% | KV (daJ/cm ²) | | | | |
| chrome | 38 Cr 2 | 38 C 2 | 60 - 95 | 35 - 55 | 14 - 17 | 3,5 | | + | P - M | ⑦ |
| | 46 Cr 2 | 42 C 2 | 65 - 110 | 40 - 65 | 12 - 15 | 3,5 | | + | P - M | ⑦ |
| | 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 ↓ ① ② ③ ④ |
| | 20 Ni Cr 6 | 20 NC 6 | 70 - 110 | 70 - 95 | 8 - 10 | 6 - 8 | ● | ++ | P | |
| | 13 Ni Cr 14 | 14 NC 11 | 80 - 145 | 65 - 90 | 8 - 10 | 7 - 8 | ● | + | M | |
| | 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 ④ ⑤ |
| | 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 8 | 35 NCD 6 | 80 - 140 | 60 - 100 | 9 - 13 | 4,5 | | +++ | G | ⑤ ② ④ |
| | 36 Ni Cr Mo 16 | 35 NCD 16 | 100 - 145 | 80 - 105 | 9 - 11 | 4,5 | | ++++ | G | trempable à l'air ① ② ④ |
| | 30 Cr Ni Mo 8 | 30 CND 8 | 90 - 145 | 70 - 105 | 9 - 12 | 4,5 | | ++++ | G | ① ② ③ |
| 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 ④ 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 ⑩ |
| | 55 Si 7 | 55 S 7 | 70 - 170 | 50 - 130 | 6 - 13 | 4 | | ++ | P | ④ ⑦ |
| | 45 Si Cr Mo 6 | 45 SCD 6 | 85 - 185 | 60 - 140 | 6 - 13 | 5 | | +++ | P - M | ③ 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 (∅ ≈ 50)
 M : moyenne (∅ ≈ 100)
 G : grosse (∅ ≈ 200)

① engrenage
 ② arbres, axes, tiges, leviers, fusées
 ③ boulonnerie 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 trempes superficielles

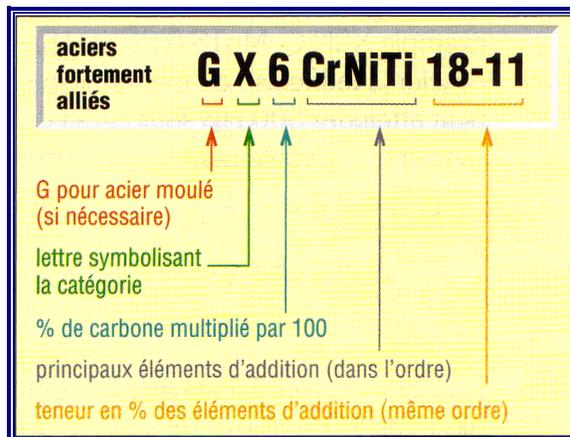
III - Aciers fortement alliés

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 trempé. 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_r) 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.

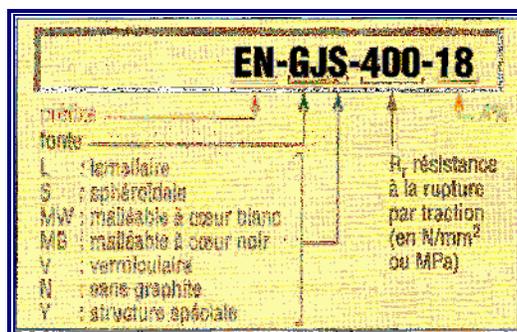
3. Autres familles

- 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_r proche de 200 daN/mm^2 ; 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.

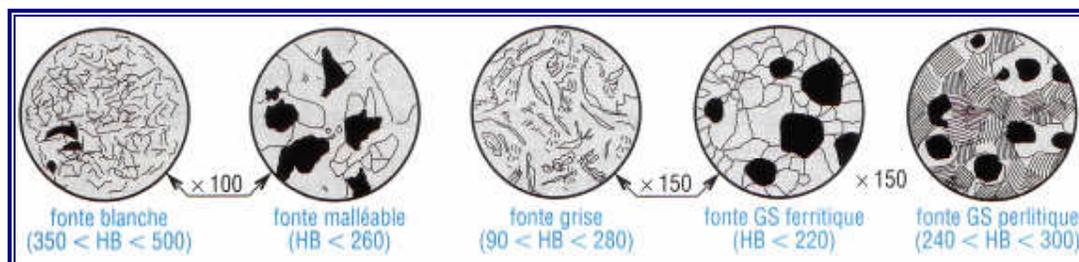
Propriétés : ductilité, résilience et usinabilité.

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

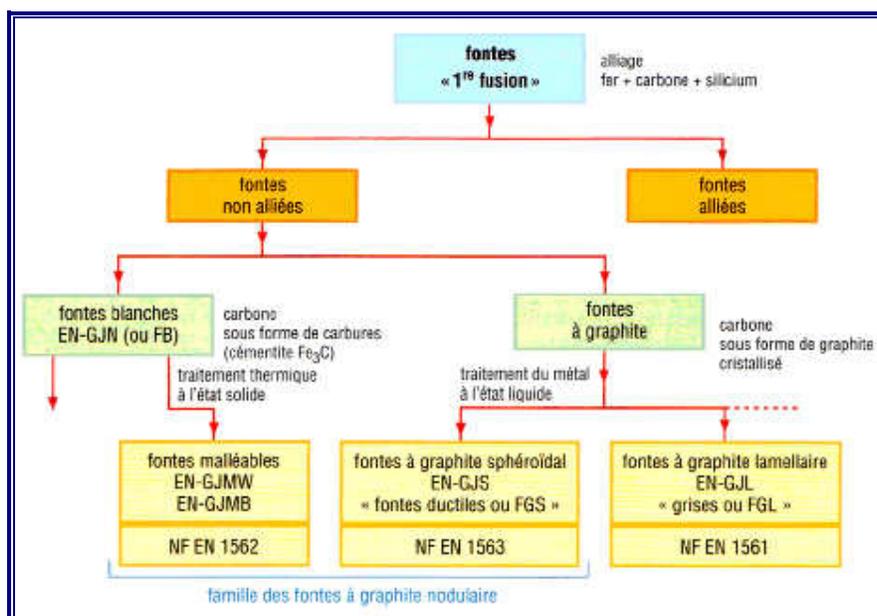
Fontes blanches (FB) : à base de perlite et de cémentite (carbures Fe_3C), elles sont très dures, fragiles, résistantes aux frottements, à l'abrasion et aux températures élevées. Difficiles à usiner, les applications sont limitées.

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.

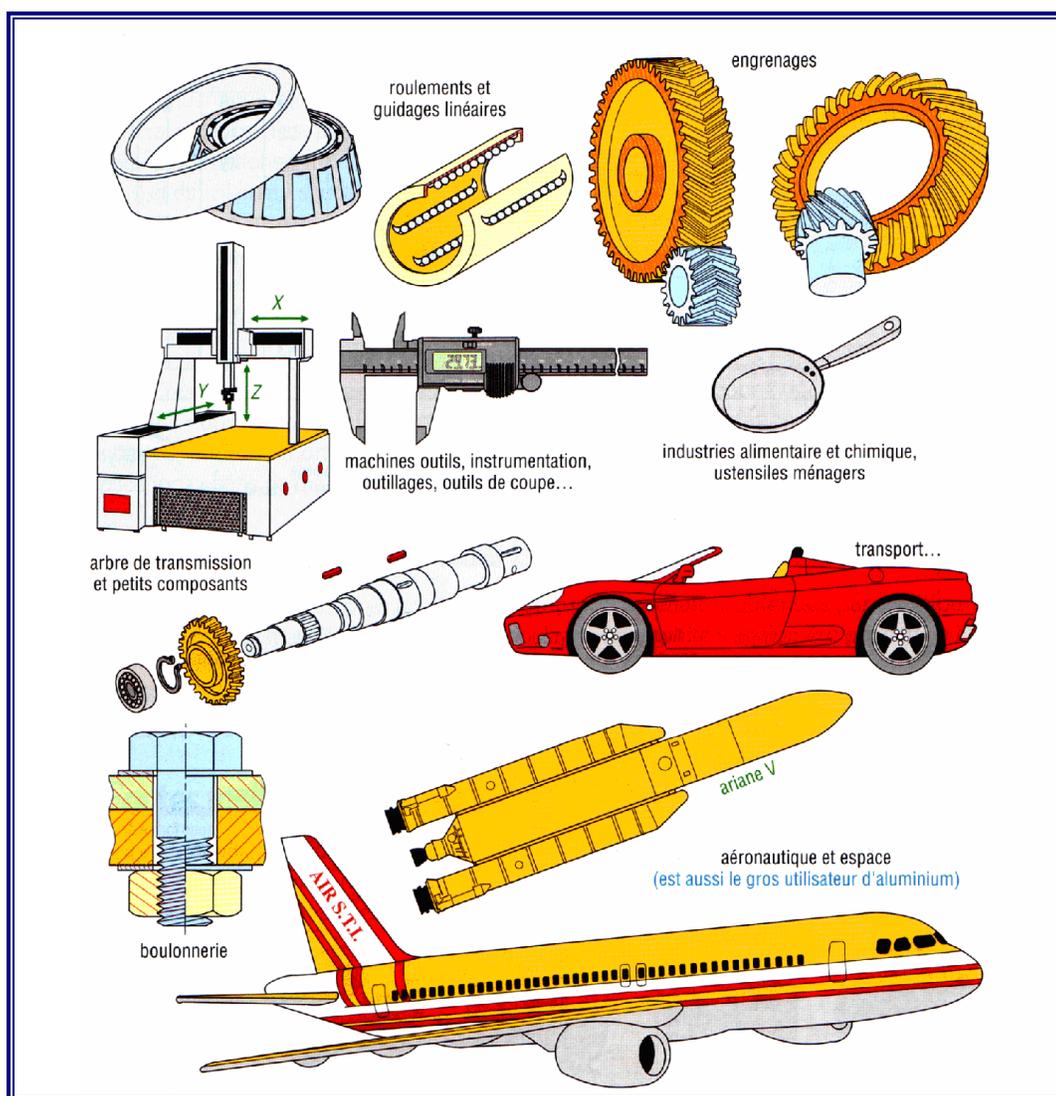
Ces éléments contrôlent plus ou moins la formation du graphite et développent des propriétés particulières.

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

| Principales fontes | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|-----------|-----|
| désignation normalisée | R_e (daN/mm ²) | R_r (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 |



| Principales fontes : teneur en % | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|---|--------------------------------|-----------------------------|
| éléments (teneur en %) | fontes à graphite lamellaire (EN-GJL) | fontes à graphite sphéroïdal (EN-GJS) | fontes malléables | | fontes blanches (EN-GJN) |
| | | | fontes à coeur noir (EN-GJMB) | fontes à coeur blanc (EN-GJMW) | |
| carbone | 2,5 – 4,0 | 3,0 – 4,0 | 2 – 2,8 | 2,7 – 3,2 | 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 | – ferrite – perlite + ferrite – perlite – perlite + carbures | – ferrite – perlite + ferrite – perlite + bainite – perlite + ferrite + martensite | ferrite | ferrite | – perlite – cémentite |
| | | | perlite pour la structure perlitique MP | | |



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