

CHAPITRE I

MATÉRIAUX

OBJECTIFS

L'étudiant doit être capable de :

- ❖ Connaître les principales propriétés et leurs influences sur le choix des matériaux ;
 - ❖ Identifier un matériau à partir de sa désignation normalisée ;
 - ❖ Connaître sommairement l'influence des différents éléments d'addition sur les différents types de matériaux ;
 - ❖ Choisir un matériau qui répond aux conditions fonctionnelles d'un système ;
 - ❖ Choisir le traitement thermique adéquat pour une application donnée.
-

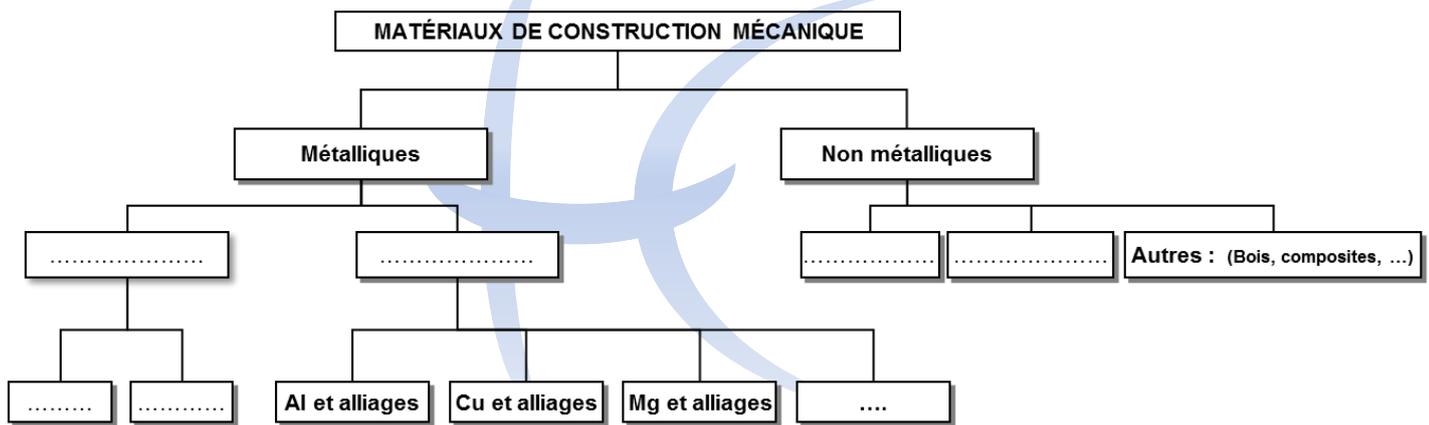
CONTENU

- I.1- CLASSIFICATION DES MATERIAUX
 - I.2- PROPRIETES DES MATERIAUX
 - I.3- ELABORATION DES FERREUX
 - I.4- DESIGNATION NORMALISEES DES MATERIAUX METALLIQUES
 - I.5- CARACTERISATION MECANIQUE DES MATERIAUX
 - I.6- TRAITEMENT THERMOCHIMIQUE DES ACIERS
 - I.7- MATERIAUX AVANCES
-

RÉFÉRENCES PRINCIPALES

- Réf. 1- Palissy B., « Des matériaux », Éditions de l'école polytechnique de Montréal, 1980
- Réf. 2- Campa A., « Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens T. II », Foucher, Paris, 1971.
- Réf. 3- « Metals Handbook, ninth edition », ASM, 1984.
- Réf. 4- Chevalier A. « Guide du dessinateur technique », Hachette, 2004.
- Réf. 5- Fanchon, J.L., « Guide des Sciences et Technologies Industrielles », 1994.
- Réf. 6- Trotignon, J.P. et al., « Productique », Éditions Nathan, 2002.

CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION



- *Plastiques*: (Dits aussi) matériaux constitués par un grand nombre d'unités fondamentales dites monomères et qui sont des molécules organiques dont le noyau est l'atome de carbone. La popularité de ce genre de matériaux est due à leurs propriétés de malléabilité, de résistance, de rigidité ainsi que leur capacité de répondre à des exigences de couleur, de transparence et autres.
- *Céramiques*: Matériaux poreux de microstructures diversifiées, connus pour leur grande stabilité chimique et mécanique, notamment à de hautes Leur utilisation est sérieusement limitée par leur grande (Ex : matériaux réfractaires, verres, ciments, ...)
- *Non ferreux* : Ce sont principalement le, l'....., le zinc, le magnésium ainsi que leurs alliages respectifs.
- *Fontes*: Alliage - qui contiennent au moins 2% de carbone alors que les aciers contiennent tout au plus 1,7%. Entre les deux il y a ce qu'on appelle les aciers sauvages peu utilisés à cause de leur fragilité.
- *Aciers alliés* : Acier ne contenant aucune addition volontaire d'éléments d'alliage. Ils doivent comprendre moins de 1,2% de manganèse, moins de 1% de silicium, ...
- *Aciers alliés* : contiennent des éléments d'alliage (essentiellement : Ni, Cr, Mn et Mo) mais dans une proportion qui ne dépasse pas les 5% par élément.
- *Aciers alliés* : La proportion d'au moins un des éléments d'alliage dépasse les 5%.

📖 PROPRIETES DES MATERIAUX :

➤ Physiques

- Masse volumique
 - *Définition* : Quantité de matière par unité de volume. Elle caractérise la densité du matériau et se mesure en g/cm^3 .
 - *Exemple d'application* : Des matériaux de haute masse volumique sont recherchés pour fabriquer des avec un encombrement minimal alors que les matériaux à faible masse volumique sont utilisés pour des pièces (ex : industrie aéronautique).
- Dilatabilité
 - *Définition* : Aptitude du matériau à se dilater (.....) sous l'effet d'une Elle est caractérisée par le coefficient de dilatation linéaire qui se mesure en $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
 - *Exemple d'application* : Des matériaux à forte dilatabilité thermique sont recherchés pour des applications de montage forcé du type (chemisage des moteurs) ou aussi pour des applications de et de Par contre, des matériaux à faible dilatabilité thermique sont recherchés pour des applications œuvrant dans des conditions variables (câbles de haute tension ou rails de chemins de fer).
- Conductibilité thermique
 - *Définition* : Aptitude du matériau à Elle est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique qui se mesure en $\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$.
 - *Exemple d'application* : Des matériaux bons conducteurs thermiques (ex : alliages de Al) sont utilisés pour des alors que les mauvais conducteurs (bois, fibres de verre, ...) sont utilisés comme des thermiques.
- Échauffement
 - *Définition* : Caractérisé par la capacité thermique massique (anciennement appelée) qui correspond à la quantité de chaleur (par unité de masse) à fournir au matériau pour que la température de celui-ci augmente de 1°C . Elle se mesure en $\text{KJ/Kg}^{\circ}\text{C}$.
 - *Exemple d'application* : Le matériau des pièces de frottement est en partie choisi en fonction de leur capacité thermique massique afin qu'ils s'échauffent le moins possible. Par contre, les éléments sont choisis selon sur la base d'une faible capacité thermique massique.
- Fusibilité
 - *Définition* : L'aptitude du matériau à passer de l'état à l'état Elle est caractérisée par la température de qui se mesure en $^{\circ}\text{C}$.
 - *Exemple d'application* : Cette propriété est extrêmement importante lors du choix de matériau pour le procédé de (grande fusibilité : faible température de fusion). Exemples : [étain : 232°C ; tungstène : 3410°C]
- Conductibilité électrique
 - *Définition* : Aptitude du matériau à le sous l'action d'un champ électrique extérieur. Cette propriété est l'inverse de la électrique qui se mesure en $\Omega.\text{m}^2/\text{m}$.
 - *Exemple d'application* : Des matériaux bons conducteurs électriques (ex : cuivre, argent, ...) sont utilisés pour fabriquer des et des électriques alors que les moins bons (alliages contenant du chrome ou du nickel) sont utilisés pour fabriquer des électriques.
- Permittivité magnétique :
 - *Définition* : Aptitude du matériau à et à les lignes du champ magnétique dans lequel il se trouve.
 - *Exemple d'application* : On peut retrouver des matériaux ferromagnétiques, paramagnétiques et finalement les diamagnétiques (classés par ordre décroissant de permittivité). Les premiers sont recherchés dans des applications comme celles des électriques et ce, pour agir en tant qu'..... Par contre, les matériaux diamagnétiques peuvent être utilisés pour des équipements électroniques contre des ondes électromagnétiques parasites.

➤ Mécaniques

▪ Élasticité

- *Définition* : Aptitude du matériau à subir des déformations sous contraintes et à reprendre une forme à celle précédant l'application de ces contraintes. Les déformations réversibles sont dites élastiques. Cette propriété est caractérisée par la limite élastique (Re) se mesurant en MPa. La rigidité élastique est quant à elle caractérisée par les modules de Young (E) et de cisaillement (G) qui se mesurent également en MPa.
- *Exemple d'application* : Des matériaux ayant une bonne limite élastique (aciers, bois, ..) sont recherchés pour des applications « structurales » où les pièces doivent résister à la charge sans que leurs dimensions finales ne soient altérées.
- [Re (acier) : 430-690 ; Re (aluminium) : 90-150]

▪ Ductilité

- *Définition* : Aptitude du matériau à subir des déformations après avoir atteint sa et ce, sans se fissurer. L'opposée de la ductilité est la caractérisée par une résistance à la rupture (R) égale ou très légèrement supérieure à la limite élastique.
- *Exemple d'application* : Uniquement les matériaux ductiles (certains aciers, l'aluminium, ...) peuvent être considérés pour des applications (laminage, extrusion, pliage, ...) ou aussi pour des applications mettant en jeu la

▪ Dureté

- *Définition* : Aptitude du matériau à s'opposer à la d'un autre corps. Elle est caractérisée par des mesures relatives (basées sur la comparaison de différents matériaux).
- *Exemple d'application* : Les matériaux durs présentent une excellente qui constitue une propriété recherchée pour Parmi les matériaux les plus durs on retrouve le diamant et le carbure de tungstène.

▪ Résilience

- *Définition* : Aptitude du matériau à subir sans fissures des Elle est généralement faible pour les matériaux ayant une grande dureté.
- *Exemple d'application* : Des matériaux ayant une bonne résilience sont nécessaires pour la fabrication d'outils ou toute autre application présentant des chocs ou des contacts mécaniques brutaux.
- Il faut distinguer la résilience de la ténacité qui est la résistance du matériau à la propagation des fissures (déjà existantes)

▪ Endurance :

- *Définition* : Aptitude du matériau à subir un chargement sans se fissurer. Elle est aussi appelée résistance en fatigue et est déterminée par des tests de sollicitation cyclique.
- *Exemple d'application* : Puisque la majorité des composantes mécaniques font partie de systèmes qui les sollicitent de façon , ces matériaux doivent être choisis non seulement selon leur ténacité ou leur élasticité mais aussi selon leur endurance (pistons, bielles,).

➤ Chimiques :

▪ Oxydabilité :

- *Définition* : Aptitude du matériau à former un en se combinant avec Alors que la majorité des métaux sont oxydables, seuls quelques métaux précieux (..... , ..) ne le sont pas.
- *Exemple d'application* : Alors que l'oxydation est généralement considérée comme un phénomène , pour certains matériaux comme l'aluminium et le cuivre, la formation d'une couche extérieure d'oxyde constitue une sorte de protection.

▪ Résistance à la corrosion :

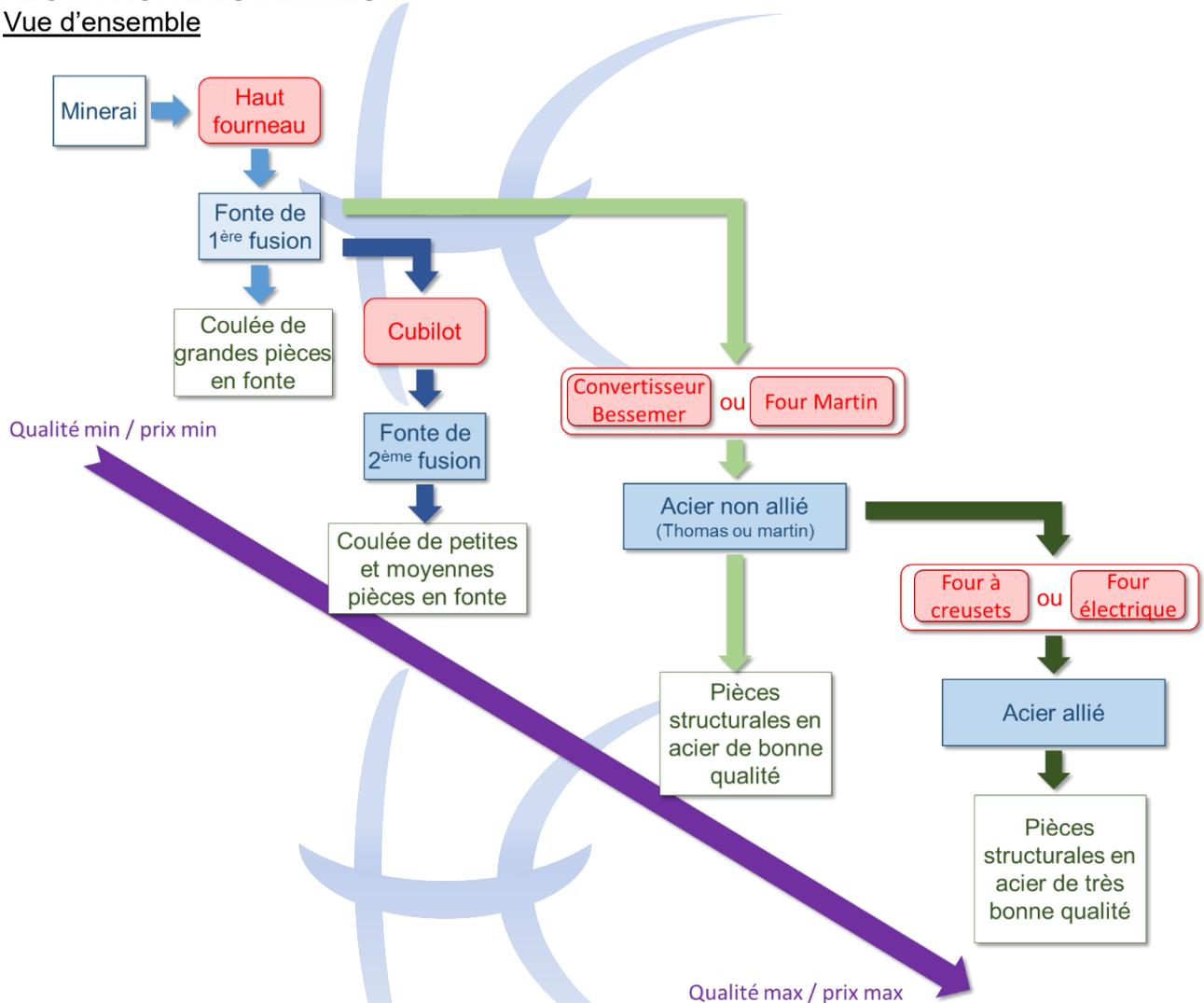
- *Définition* : Aptitude du matériau (métaux) à résister à une dégradation lente et progressive. En plus de l'..... , il existe d'autres types de corrosion dont la corrosion chimique et la corrosion électrochimique.
- *Exemple d'application* : Des éléments d'alliage tels que le et le améliorent grandement la résistance à la corrosion des aciers.

➤ Métallurgiques (métaux uniquement)

- Fluidité
 - *Définition* : Aptitude d'un métal à l'état à couler et à la forme du moule dans lequel il se trouve. Cette propriété augmente généralement avec la du métal liquide. Son opposée est la
 - *Exemple d'application* : Cette propriété est extrêmement importante pour le procédé de Elle peut également être améliorée par l'ajout d'éléments comme le phosphore pour les fontes. Ainsi il serait possible de mouler des pièces présentant un certain niveau de
- Retrait
 - *Définition* : du métal liquide à la solidification. Se mesure en %.
 - *Exemple d'application* : Des matériaux présentant un faible retrait sont généralement utilisés pour le procédé de car un important retrait à la solidification peut causer d'importants défauts. [fonte : 0,6 à 1% ; acier : jusqu'à 2,5%]
- Malléabilité à chaud
 - *Définition* : Aptitude du métal chauffé à passer par un état pâteux (avant d'arriver à l'état liquide) lui permettant de subir de grandes déformations.
 - *Exemple d'application* : Cette propriété facilite grandement le travail à chaud des métaux par forgeage ou laminage.
- Malléabilité à froid
 - *Définition* : Propriété directement dépendante de la et de la du matériau.
 - *Exemple d'application* : Cette propriété facilite grandement le travail des métaux. Elle caractérise, entre autres matériaux, le cuivre et l'aluminium.
- Soudabilité
 - *Définition* : Aptitude du matériau à à lui-même soit par l'action de la chaleur uniquement (par fusion) ou soit par l'action simultanée de la chaleur et d'une (à la forge).
 - *Exemple d'application* : Parmi les matériaux présentant une bonne soudabilité nous pouvons citer les aciers
- Trempabilité
 - *Définition* : Aptitude du matériau à subir avec succès des trempes visant à certaines de ces propriétés mécaniques.
 - *Exemple d'application* : Parmi les matériaux présentant une bonne trempabilité nous pouvons citer les aciers

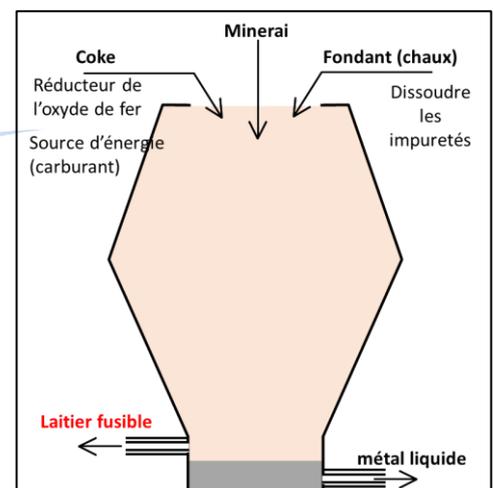
ÉLABORATION DES FERREUX

➤ Vue d'ensemble



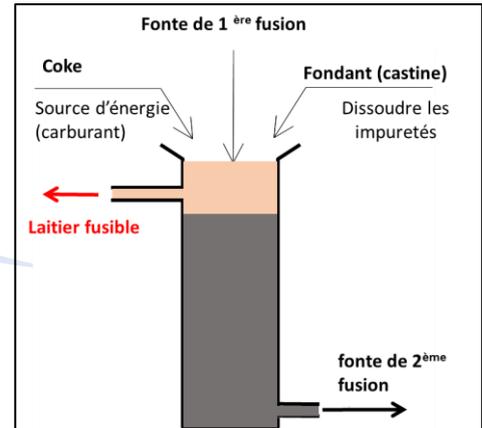
➤ Obtention des fontes de 1^{ère} fusion

- **Minerai**: La matière première de cette opération constituée essentiellement par de mélangé à de la gangue (silice, alumine, magnésie, ..)
- **Principe et pratique industrielle** : L'opération se déroule dans un « Haut fourneau » qui est une installation gigantesque de quelques dizaines de mètres de hauteur décrite sommairement dans la figure ci-dessous
- **Types**:
 - **Fonte grise** : Le carbone de cette fonte se trouve à l'état libre sous forme de (paillettes noires). Elle sert à la deuxième fusion et à l'exécution de Elle est également faible en traction mais résistante en compression. Elle possède relativement une bonne malléabilité, une moyenne usinabilité et une bonne fluidité.
 - **Fonte blanche** : Obtenue par un haut fourneau moins chaud et contenant moins de Coke que celui de la fonte grise. Le carbone de cette fonte est complètement combiné au fer pour donner du très dur et très de couleur grise à allure métallique. Elle doit subir un traitement de avant de pouvoir être utilisée
 - **Fonte truitée** : intermédiaire



➤ Obtention des fontes de 2^{ème} fusion

- **Contexte** : La fonte de première fusion contient trop pour être utilisée dans l'exécution de pièces de moyenne et petite tailles. Elle ne se prête pas également bien à l'usinage. Pour ces raisons, on procède à son pour obtenir une meilleure fonte, dite de deuxième fusion.
- **Principe et pratique industrielle** : L'opération se déroule dans un cubilot de forme cylindrique, similaire à un haut fourneau (voir figure ci-contre)
- **Types**
 - **Fonte grise ou fonte blanche** : similaires à celles de 1^{ère} fusion mais plus
 - **Fonte mécanique** : Elle est caractérisée par une très haute résistance (comparable à celle de l'acier) due l'utilisation de recyclage pouvant être alliés.



➤ Obtention des aciers non alliés

- **Contexte** : La fonte contient moyennement 2 à 4,5 % de C, 0,5 à 4,5 % de Si, 2 à 4 % de Mn, du phosphore ainsi que plusieurs impuretés. Ces teneurs sont pour obtenir un bon comportement mécanique.
- **Objectif** : Élaborer des aciers de grande résistance mécanique, d'impuretés et dont les teneurs en éléments d'alliage ne dépassent pas les 0,5 % de C, 1 % de Si, 0,8 % de Mn.
- **Principe** : Enlever une partie du carbone du silicium et du manganèse et éliminer complètement les autres impuretés et ce, soit en utilisant de soit celui contenu dans
- **Techniques**:
 - **Procédé Bessemer** : Utilisation de la fonte comme matière première et l'oxydation de son carbone par l'oxygène de L'acier obtenu est appelé acier Thomas.
 - **Procédé Martin** : Utilisation de la fonte et le (aciers de recyclage) comme matières premières et l'oxydation du carbone de la fonte par l'oxygène de l'oxyde de fer. L'acier obtenu est appelé acier Martin. Il est de meilleure qualité que l'acier Thomas. La teneur en carbone peut être ajustée avec précision soit en ajoutant (vers la baisse) ou en ajoutant (vers la hausse).

➤ Obtention des aciers alliés

- **Contexte** : Les aciers non alliés sont très supérieurs aux mais leurs propriétés mécaniques restent pour certaines applications exigeantes.
- **Objectif** : Élaborer des aciers de qualité supérieure convenant aux applications de fortes sollicitations.
- **Principe** : Ajouter des quantités bien dosées d'éléments à de l'acier non allié tout en évitant de ces éléments très oxydables.
- **Techniques** :
 - **Four à creusets** : Synthèse à vase de l'acier désiré à partir de tous ces composants (acier au C + éléments d'alliage) dans des creusets en graphite. La pureté est améliorée par l'ajout de la chaux. L'oxydation est puisque la transformation se fait à vase clos
 - **Four électrique** : Les principes métallurgiques peuvent être similaires à ceux du four à creuset alors que les principes de génération de chaleur sont ou bien l'induction (passage du courant dans le métal liquide) ou aussi l'arc électrique se faisant entre le métal et des électrodes.

Les tableaux de cette section sont empruntés de la ref. 4

Propriétés et désignations normalisées

Les fontes

- On distingue principalement 3 sortes de fontes : les fontes à graphite lamellaire, les fontes à graphite sphéroïdal et les fontes malléables. Les deux premières catégories sont des fontes alors que la troisième est une fonte qui a subi un traitement de malléabilisation.
- Deux types de désignation sont utilisées pour les fontes : numérique ou symbolique.

	DESIGNATION NUMERIQUE	DESIGNATION SYMBOLIQUE
FONTES A GRAPHITE LAMELLAIRE	EN-JL 1020 Code des fontes à graphite lamellaire Code numérique	EN-GJL 100 Code des fontes à graphite lamellaire Valeur minimale de la résistance de rupture par extension (MPa)
FONTES A GRAPHITE SPHEROÏDAL	EN-JS 1010 Code des fontes à graphite sphéroïdal Code numérique	EN-GJS 350-22 Code des fontes à graphite sphéroïdal Valeur minimale de la résistance de rupture par extension (MPa) Allongement à la rupture par extension (%)
FONTES MALLEABLES	EN-JM 1010 Code des fontes malléables Code numérique	EN-GJMW 350-14 Code des fontes malléables (peut être aussi EN-GJMB) Valeur minimale de la résistance de rupture par extension (MPa) Allongement à la rupture par extension (%)

Fontes à graphite lamellaire		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JL 1020	EN-GJL-100	Bonne moulabilité – Bonne usinabilité.
EN-JL 1020	EN-GJL-150	Bonne résistance à l'usure par frottement.
EN-JL 1030	EN-GJL-200	Bon amortissement des vibrations.
EN-JL 1040	EN-GJL-250	Bonnes caractéristiques mécaniques et frottantes – Bonne étanchéité (blocs moteurs, engrenages...).
EN-JL 1050	EN-GJL-300	
EN-JL 1060	EN-GJL-350	

Fontes malléables		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JM 1010	EN-GJMW-350-4	
EN-JM 1030	EN-GJMW-400-5	Malléabilité améliorée (pièces complexes).
EN-JM 1040	EN-GJMW-450-7	
EN-JM 1050	EN-GJMW-550-4	Bonne résilience.
EN-JM 1110	EN-GJMB-300-6	Bonne usinabilité.
EN-JM 1130	EN-GJMB-350-10	Bon amortissement des vibrations.
EN-JM 1140	EN-GJMB-450-6	
EN-JM 1150	EN-GJMB-500-5	
EN-JM 1160	EN-GJMB-550-4	Très bonnes caractéristiques mécaniques.
EN-JM 1170	EN-GJMB-600-3	
EN-JM 1180	EN-GJMB-650-2	Bonne résistance à l'usure.
EN-JM 1190	EN-GJMB-700-2	

Fontes à graphite sphéroïdal		
Numérique	Symbolique	Emplois
EN-JS 1010	EN-GJS-350-22	
EN-JS 1020	EN-GJS-400-18	
EN-JS 1030	EN-GJS-400-15	Bonne résilience.
EN-JS 1040	EN-GJS-450-10	Très bonne usinabilité (vannes, vérins...).
EN-JS 1050	EN-GJS-500-7	
EN-JS 1060	EN-GJS-600-3	
EN-JS 1070	EN-GJS-700-2	Très bonnes caractéristiques mécaniques. Bonne résistance à l'usure. Bonnes qualités frottantes.
EN-JS 1080	EN-GJS-800-2	
EN-JS 1090	EN-GJS-900-2	

Aciers d'usage général			
Nuance	R min.**	Re min.**	Emplois
S 185	290	185	
S 235	340	235	Constructions mécaniques
S 275	410	275	et métalliques générales
S 355	490	355	assemblées ou soudées.
E 295	470	295	Ces aciers ne conviennent pas aux traitements chimiques.
E 335	570	335	
E 360	670	360	
Moulage	GS 235 – GS 275 – GS 355 GS 295 – GE 335 – GE 360		

** R min. = résistance minimale à la rupture par extension (MPa).
Re min. = limite minimale apparente d'élasticité (MPa).

Les aciers

Classification par emploi :

- La désignation des aciers d'usage général commence par la lettre S suivie par la valeur de la résistance en extension (MPa).
- Quant aux aciers de construction mécanique, ils sont désignés par la lettre E suivie par la valeur de la résistance élastique en extension (MPa).
- La désignation des aciers moulés comporte la lettre G avant la lettre E ou la lettre S.
- Les aciers E et S sont des aciers non alliés

Classification par composition chimique :

Aciers non alliés

- » Ils ont une teneur en Mn < 1%.
- » La désignation comporte la lettre C suivie par le pourcentage de carbone en masse de l'acier multiplié par 100.
- » Finalement, la désignation est précédée de la lettre G si l'acier est moulé.

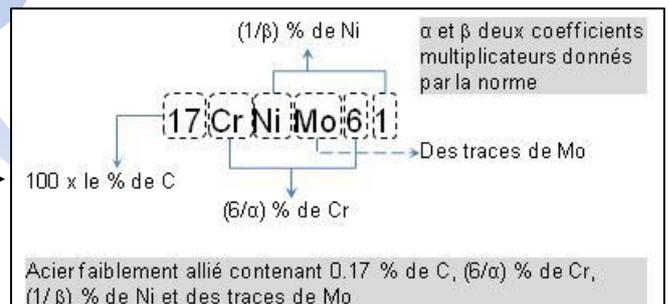
Aciers faiblement alliés

- » Ils ont une teneur en Mn supérieure ou égale à 1%. Par contre, la teneur de éléments d'alliage contenus ne dépasse pas 5 %.
- » La désignation est telle qu'expliquée par l'exemple ci-dessous.
- » Elle commence par le pourcentage de carbone (multiplié par cent) suivi par la liste des symboles chimiques des éléments d'alliage.
- » Ensuite, la désignation comporte la liste des teneurs respectives des éléments d'alliages multipliés par des coefficients donnés par la norme (cette multiplication vise à éviter les décimales).
- » Finalement, la désignation est précédée de la lettre G si l'acier est moulé.

Aciers non alliés			
Nuance	R min.*	Re min.*	Emplois
C 22	410	255	Constructions mécaniques.
C 25	460	285	
C 30	510	315	Ces aciers conviennent aux traitements thermiques et au forgeage.
C 35	570	335	
C 40	620	355	
C 45	660	375	
C 50	700	395	NOTA : Cette symbolisation ne s'applique pas aux aciers de décolletage.
C 55	730	420	
C 60	HRC ≥ 57		

Aciers faiblement alliés		
Nuances usuelles	Traitement de référence	
	R min.*	Re min.*
38 Cr 2	800	650
34 Cr 4	880	660
37 Cr 4	930	700
41 Cr 4	980	740
55 Cr 3	1 100	900
100 Cr 6	HRC ≥ 62	
25 Cr Mo 4	880	700
35 Cr Mo 4	980	770
42 Cr Mo 4	1 080	850
16 Cr Ni 6	800	650
17 Cr Ni Mo 61	1 130	880
30 Cr Ni Mo 81	1 030	850
51 Cr V 4	1 180	1 080
16 Mn Cr 5	1 080	835
20 Mn Cr 5	1 230	980
36 Ni Cr Mo 16	1 710	1 275
51 Si 7	1 000	830
60 Si Cr 7	1 130	930

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



Acier faiblement allié

Acier faiblement allié

Acier faiblement allié contenant 0.42 % de C ; 1 % de Cr, et des traces de Mo

Acier faiblement allié contenant 1 % de C ; 1.5 % de Cr

Acier faiblement allié contenant 0.16 % de C ; 1.25 % de Mn et des traces de Mo

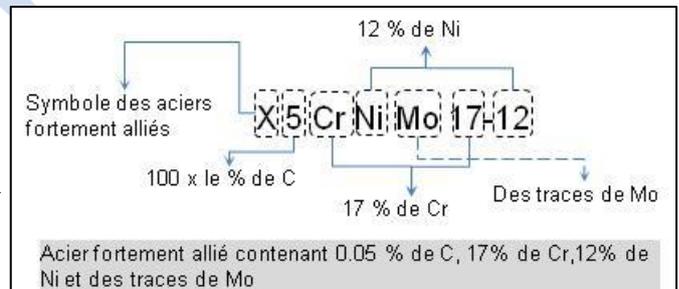
.....

.....

.....

- Aciers fortement alliés
 - » Ils ont une teneur en Mn supérieure ou égale à 1%. Également, la teneur éléments d'alliage contenus 5 %.
 - » La désignation est telle qu'expliquée par l'exemple ci-dessous.
 - » Elle commence par la lettre X suivie par le pourcentage de carbone multiplié par cent.
 - » Ensuite, la désignation comporte la liste des symboles chimiques des éléments d'alliage
 - » Finalement, on retrouve la liste des teneurs respectives des éléments d'alliages (pas de coefficients multiplicateurs).
 - » la désignation est précédée de la lettre G si l'acier est moulé.

Aciers fortement alliés		
Nuances usuelles	Traitement de référence	
	R min.*	Re min.*
X 4 Cr Mo S 18	400	275
X 30 Cr 13	HRC ≥ 51	
X 2 Cr Ni 19-11	460	175
X 5 Cr Ni 18-10	510	195
X 5 Cr Ni Mo 17-12	510	205
X 6 Cr Ni Ti 18-10	490	195
X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12	540	215



Acier fortement allié

.....

.....

Acier fortement allié ayant une teneur en carbone de 0.04% ainsi que 18% de Cr et des traces de Mo et de S

- Aluminiums et alliages d'aluminium
 - Aluminium et alliages d'aluminium moulés
 - La désignation commence par EN-AB suivi par un code numérique.
 - Parfois, La désignation est suivie par une désignation (entre crochets) donnant la pureté de l'aluminium ou la teneur nominale des éléments d'alliage.
 - Exemples :
 - » EN AB-43000 : Aluminium ou alliage d'aluminium moulé
 - » EN AB-43000 [Al Si 10 Mg] : Alliage d'aluminium moulé comportant 10% de Si et des traces de Mg
 - » EN AB-44200 :
 - » EN AB-44200 [Al Si 12] :

Nuances usuelles	R min.*	Re min.*	Emplois
EN AW-1050 [Al 99,5]	80	35	Appareils ménagers. Matériels électriques.
EN AB-21 000 [Al Cu 4 Mg Ti]	330	200	Se moule bien. S'usine très bien. Ne pas utiliser en air salin.
EN AB-43 000 [Al Si 10 Mg]	250	180	Se moule très bien. S'usine et se soude bien. Convient en air salin.
EN AB-44 200 [Al Si 12]	170	80	Se moule et se soude très bien. La forte teneur en silicium rend l'usinage difficile.
EN AB-51 300 [Al Mg 5]	180	100	Excellentes aptitudes à l'usinage, au soudage, au polissage. Résiste très bien à l'air salin.

- Aluminium et alliages d'aluminium corroyés
 - La désignation commence par EN-AW suivi par un code numérique.
 - Les produits corroyés sont laminés, forgés, filés ou étirés.
 - Parfois, la désignation est suivie par une désignation (entre crochets) donnant la pureté de l'aluminium ou liste des éléments d'alliage, chacun suivi par sa teneur nominale.
 - Finalement, pour des applications électriques spéciales, la lettre E précède le symbole Al

- Exemples :
 - » EN AW-5154 : Alliage d'aluminium corroyé
 - » EN AW-5154 [Al Mg 3,5] : Alliage d'aluminium corroyé comportant 3,5 % de de Mg
 - » EN AW-5086:
 - » EN AW-5086 [Al Mg 4] :

Nuances usuelles*	R min.*	Re min.**	Emplois	
EN AW-1350 [EAl 99,5]**	65	-	Matériels électrodomestiques. Chaudronnage.	Bonne résistance aux agents atmosphériques et à l'air salin. Bonne soudabilité.
EN AW-1050 [Al 99,5]	100	75	Matériels pour industries chimiques et alimentaires.	
EN AW-5154 [Al Mg 3,5]	220	130	Pièces chaudronnées : citernes, gaines, tubes, etc. Tuyauteries.	
EN AW-5754 [Al Mg 3]	270	190		
EN AW-5086 [Al Mg 4]	310	230	Pièces usinées et forgées.	Éviter de les utiliser à l'air salin. Se soudent difficilement.
EN AW-2017 [Al Cu 4 Mg Si]	390	240	Pièces décolletées (fragmentation des copeaux).	
EN AW-2030 [Al Cu 4 Pb Mg]	420	280	Pièces usinées et forgées	
EN AW-7075 [Al Zn 5,5 Mg Cu]	520	440	à hautes caractéristiques mécaniques.	
EN AW-7049 [Al Zn 8 Mg Cu]	600	560		

■ Cuivre et alliages de cuivre

- La désignation est un code alphanumérique commence par la lettre C suivie par :
 - » La lettre R s'il s'agit d'un cuivre brut raffiné
 - » La lettre B ou C s'il s'agit d'un alliage de cuivre moulé
 - » La lettre W s'il s'agit d'un alliage de cuivre corroyé
- Parfois, la désignation est suivie par une désignation (entre crochets) donnant la liste des éléments d'alliage, chacun suivi par sa teneur nominale.

Nuances usuelles*	R min.**	Re min.**	Emplois	
CR004A [Cu - ETP] (cuivre affiné)	200	70	Matériau à très bonne conductibilité électrique ; convient particulièrement pour câbles, bobinages et contacts.	
CW004A [Cu - ETP]	350	300	Utilisé en décolletage. Très haute conductibilité électrique et thermique.	
CW113C [Cu Pb 1 P]	350	300	Matériau de frottement pour bagues, douilles, chemises, segments.	
CW453K [Cu Sn 8] (bronze)	490	390	Pièces moulées sans caractéristiques particulières.	
CC480K [Cu Sn 10]	-	-	Robinetterie.	
CC493K [Cu Sn 7 Zn 4 Pb 7]	210	-	Construction mécanique.	
CC483K [Cu Sn 12]	200	-	Pièces d'usure : pignons et roues d'engrenages, écrous.	
CW460K [Cu Sn 8 Pb P]	290	160	Ressorts (matériels électriques, matériels résistant à la corrosion). Connecteurs.	
CW101C [Cu Be 2] (cuivre au béryllium)	1 400	1 350	Alliage de forgeage à froid ; se polit bien et convient aux revêtements électrolytiques.	
CW502L [Cu Zn 15] (laiton)	400	-	Pièces moulées.	
CC750S [Cu Zn 33 Pb 2]	490	240	Construction mécanique générale et pièces découpées dans la tôle. Il se polit bien.	
CW506L [Cu Zn 33]	590	210	Bonnes caractéristiques mécaniques. Bonnes qualités frottantes.	
CC765S [Cu Zn 35 Mn 2 Al 1 Fe 1]	410	160	Mise en œuvre aisée. Prix modéré.	
CW710R [Cu Zn 35 Ni 3 Mn 2 Al Pb]	540	240	Alliage le plus utilisé pour la plupart des pièces décolletées. Très bonne usinabilité.	
CW612N [Cu Zn 39 Pb 2]	400	200	Matériels de microtechniques. Résistance à la corrosion. Soudabilité.	
CW401J [Cu Ni 10 Zn 27] (maillechort)	380	170	Pièces devant résister à la corrosion (agents atmosphériques, eau de mer).	
CC333G [Cu Al 10 Fe 5 Ni 5] (cupro-aluminium)	600	250	Inoxydables à chaud. Pièces mécaniques diverses (compresseurs, pompes, etc.).	
CW307G [Cu Al 10 Ni 5 Fe 4]	690	320	Pièces de frottement sous fortes charges, avec chocs éventuels.	
CW111C [Cu Ni 2 Si] (cupro-silicium)	400	140		

- Exemples :
 - » CC750S : Alliage de cuivre moulé
 - » CC750S [Cu Zn 33 Pb 2] : Alliage de cuivre moulé comportant 33 % de Zn et 2% de Pb
 - » CW401J:
 - » CW401J [Cu Ni 10 Zn 27] :

➤ **Complément : Principaux éléments d'alliage des aciers et leurs effets**

- **Chrome** : Ajouté dans une faible proportion, cet élément améliore la dureté, la résistance mécanique et la trempabilité du matériau. Par ailleurs, à de grandes proportions (> 13 %), il change la structure de l'acier et augmente sa résistance à la corrosion. [app. : arbres, essieux, ressorts, roulements, ...]
- **Manganèse** : C'est un élément essentiel à l'élimination du soufre de l'acier. Cependant, une quantité trop importante induit un durcissement global de l'acier. Cet élément améliore la dureté et la ténacité de l'alliage contenant un très bas taux de carbone. Si par contre le taux de carbone est assez élevé le Mn fragilise l'acier. [app. : essieux, boules de concasseurs (résistance à l'usure et chocs), .]
- **Nickel** : Cet élément augmente la résistance mécanique de l'acier sans entraîner de fragilisation et ce, tant que de très forte teneur ne sont pas atteintes (> 10 %). En plus de son effet favorisant la réalisation de traitements thermiques, le Ni améliore grandement la résistance à la corrosion, surtout quand combiné au Cr . [app. : aciers inoxydables dont celui à 18% Cr - 8% Ni]
- **Molybdène** : Améliore la tenue de l'acier lors des traitements thermiques (trempé, revenu, ..). [app. : Il est souvent ajouté avec le tungstène pour la fabrication d'aciers outils dits aciers rapides]
- **Silicium** : Améliore la limite élastique ainsi que la résistance à la rupture en extension. [app. : ressorts (spécialement les aciers mangano-silicieux)].
- **Tungstène** : Augmente la dureté, la limite élastique ainsi que la résistance à la rupture en extension. [app. : outils de coupe, aciers rapides (avec ajout de molybdène, de vanadium de titane et autres ...)]
- **Cobalt** : Élément essentiel aux applications magnétiques [app. : aimants permanents].
- **Aluminium** : Cet élément augmente la dureté de surface des pièces d'aciers sans affecter leur résistance et leur ductilité et ce, par la formation d'une couche très dure d'oxyde. [app. : arbres à cames, vilebrequin, ..].

RÉSUMÉ							
Ajout	H	R/Re	TT	Resist. corrosion	A%	Permitv. magnétique	Applications
Cr	↑	↑	↑	↑ si % >13			arbres, essieux, roulements, ressorts
Mn %<10	↑	↑			↓ si %>10		essieux, boules de concasseur (resist. choc usure)
Ni		↑ si %<10	↑	↑ surtout avec Cr			Aciers Inoxydables
Mo			↑				Aciers rapides
Si		↑					ressorts
W	↑	↑					Aciers rapides
Co						↑	aimants permanents
Al	↑ surf						Arbres à cames, vilebrequin

Complément 2 : Principales applications et alliages correspondants :

- Arbres, essieux, engrenages, arbres à cames, ... : Mn-Cr ; Mo-Cr ; Ni-Cr, Cr-Ni-Mo, ...
- Ressorts, ... : Cr-Vn, Si-Mn, Si-Cr-Mo, ...
- Aciers rapides, outils de coupe, ... : Cr-W-Co-Mo, ...
- Chemise de moteurs, moule à plastiques (dureté à haute t°), ... : Cr-Al-Mo

NOTE: Un choix plus éclairé de matériaux en fonction de l'application sera possible en connaissant les possibilités des différents traitements thermiques !!!

📖 CARACTERISATION MECANIQUE DES MATÉRIAUX

➤ Essai de traction

▪ Objectifs

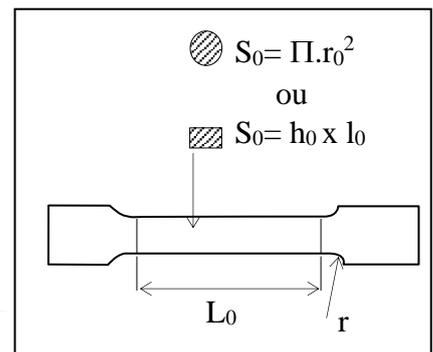
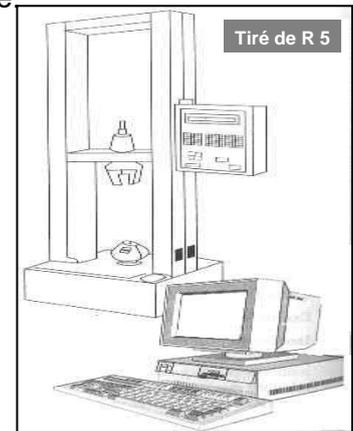
- Déterminer la ductilité/ du matériau.
- Déterminer la flexibilité/ du matériau.
- Déterminer la limite et la limite de du matériau.
- Déterminer la du matériau.

▪ Principe

- Cet essai consiste à soumettre une éprouvette (de normalisée.....) d'un certain matériau à une charge en traction progressivement croissante.
- Le chargement s'accompagne par une mesure en continu de l'allongement de l'éprouvette ainsi que de la valeur du chargement appliqué

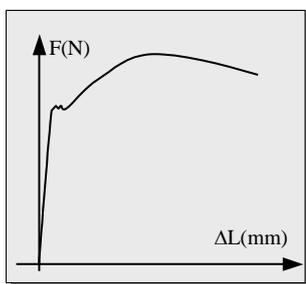
▪ Équipement et mode opératoire

- La machine de traction est constituée de :
 - Un cadre rigide
 - Un mors fixe
 - Un système mobile pour l'application de la charge (hydraulique ou vis sans fin)
 - Un capteur de déplacement (sur le mor mobile) ou un capteur d'allongement (extensomètre : sur l'éprouvette)
 - Un capteur de force (dynamomètre)
- L'éprouvette doit être de forme, dimensions ($L_0 = cte * S_0$). On utilise généralement une éprouvette de forme :
 - : pour matériaux en barre
 - (plate): pour matériaux en feuille
 - : pour matériaux en fil ou en câble
- De plus, un doit être prévu entre la partie utile de l'éprouvette et ses extrémités et ce pour éviter les concentrations de contraintes dues aux discontinuités géométriques (angles vifs).
- Déroulement de l'essai
 - Élévation graduelle de
 - Mesure, acquisition et traçage en continu de et de

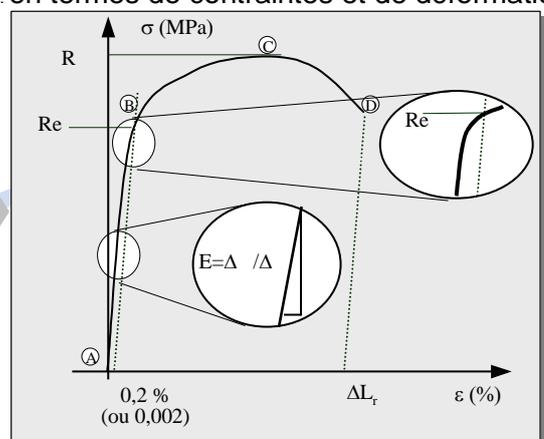


▪ Principaux résultats

- Résultats bruts : Courbe de traction brute (F, ΔL)
- Ces résultats sont-ils significatifs ?
- La courbe doit donc être en termes de contraintes et de déformations



$\sigma = F /$
 $\epsilon = \Delta L /$

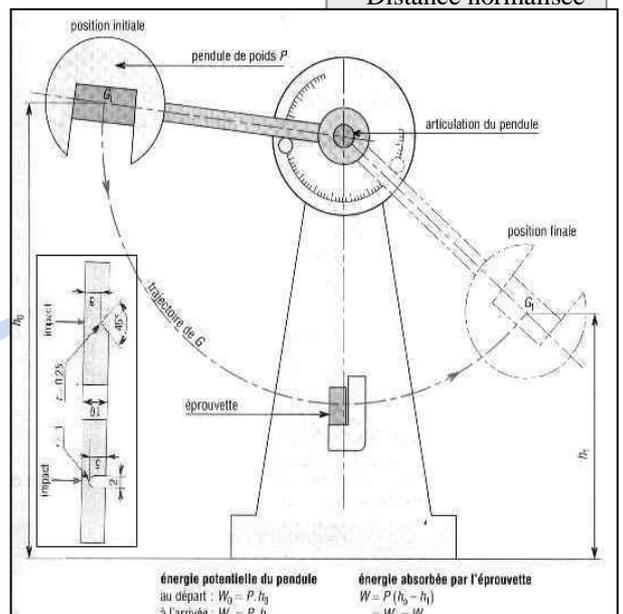
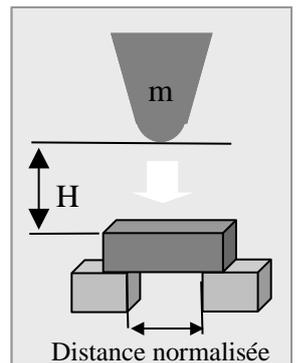


- Sur la courbe de traction on peut généralement reconnaître les éléments suivants :
 - Zone AB : zone
 - Zone BC : zone de
 - Pour certains matériaux, une perturbation entre les zones AB et BC correspondant à une (représentée uniquement sur la courbe brute) :
 - Point C : point de (diminution de la section)

- Zone CD : zone de
- Point D : point de rupture (ultime)
- La courbe normalisée permet de calculer les quantités recherchées:
 - Le module de Young E :
 - La limite élastique Re : limite de la zone du comportement élastique (puisque cette quantité est difficile à déterminer avec précision, il a été convenu de la considérer comme la contrainte correspondant à une déformation plastique de 0,2%.
 - La résistance à la rupture Rr : contrainte maximale que le matériau peut supporter
 - L'allongement à la rupture : $A(\%) = \frac{\Delta L_r}{L_0} = \frac{L_r - L_0}{L_0}$
 - Le coefficient de striction : $Z(\%) = \frac{s_0 - s_r}{s_0}$

➤ Essai de résilince:

- Principe et objectif
 - Une vitesse de sollicitation élevée rend le matériau plus fragile à cause de l'absence d'une zone de déformation plastique avant rupture.
 - L'essai de choc consiste à mesurer (par unité de section) nécessaire à la rupture d'une éprouvette normalisée du matériau à tester
- Équipement
 - Éprouvette entaillée pour matériaux résilients (dimensions et distances entre appuis normalisées), ou aussi
 - Éprouvette non entaillée pour matériaux fragiles tels que la fonte (dimensions et distances entre appuis normalisées)
 - Mouton ordinaire: une simple masse de 12 Kg avec un bout arrondi, ou encore
 - Mouton Charpy (plus populaire): Mouton pendulaire (voir figure).
- Mode opératoire et résultats:
 - Le test du mouton ordinaire consiste simplement à laisser tomber la masse m (12Kg) d'une certaine hauteur H sur l'éprouvette placée entre les appuis (suivant la norme). Les essais sont répétés avec une masse croissante jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La résilience du matériau est exprimée comme étant le travail nécessaire à la rupture de l'éprouvette par unité de section: ; g étant la pesanteur et H la plus petite hauteur nécessaire à la rupture de l'éprouvette.
 - L'essai Charpy consiste à laisser basculer le pendule à partir d'une hauteur H₀ pour qu'il vienne percuter l'éprouvette (entaillée en u "Kcu" ou en v "Kcv") placée entre appuis dans le bâti de la machine (dans la zone médiane creuse, où le pendule peut basculer librement). Après le choc et la rupture de l'éprouvette, on mesure la hauteur H à laquelle le pendule remonte. La différence entre les énergies initiale et finale donne une mesure de la résilience du matériau (énergie nécessaire à la rupture par unité de section):

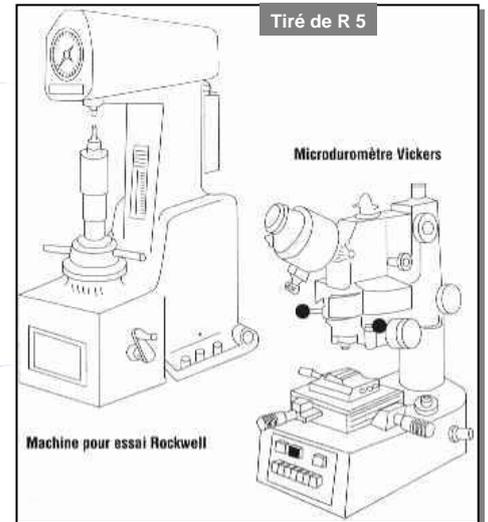


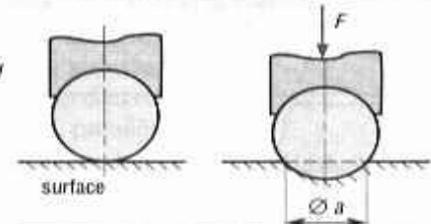
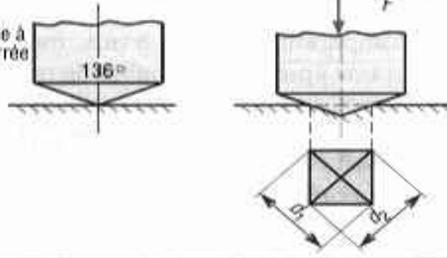
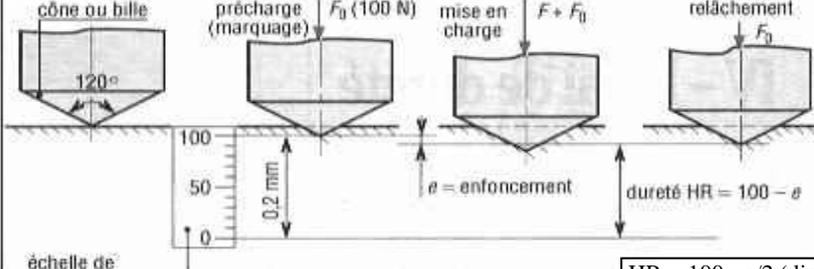
➤ Essais de dureté

- Types d'essais
 - Statique: c'est le type le plus répandu et qui consiste à mesurer l'empreinte d'un pénétrateur forcé dans le matériau à tester (ex: Brinell, Vickers et Rockwell)
 - Dynamique: dit aussi mesure de dureté par rebondissement. Se fait au scléromètre dont le principe consiste à laisser tomber une bille d'une certaine hauteur sur la surface du matériau à tester et ensuite mesurer la hauteur de rebondissement.

- *Rayure*: c'est le plus ancien essai de dureté qui consiste à faire rayer le matériau à tester par des étalons déjà situés sur une échelle comparative (ex: échelle de Mohs de [1: talc] à [10 : diamant])
- *NOTE*: Il faut distinguer entre la mesure de macro dureté (la plus commune) et la mesure de micro dureté qui, contrairement à la première ne concerne qu'une particule du matériau à tester. Cet essai, utilisé pour mesurer la dureté d'une des phases du matériau, se fait généralement avec un pénétrateur très fin et une très faible charge.
- Paramètres entrant en jeu
 - Plasticité, élasticité et tension de surface du matériau
 - Intensité et durée d'application de la charge
 - Forme du pénétrateur
 - Friction entre le matériau et le pénétrateur
- Essai Brinell
 - *Principe* : Mesurer de l'empreinte laissée dans le matériau à tester par un sous l'action d'une
 - *Pénétrateur* : Bille en acier trempé de 5 ou 10 mm de diamètre
 - *Charge* : Varie entre 500 et 3000 Kg
 - *Durée d'application* : Varie entre 10 et 30 secondes
 - *Conditions usuelles* : diamètre $D = 10$ mm; charge = 3000 Kg; temps = 15 s. Si d'autres conditions sont utilisées, il faut les mentionner pour chaque essai.
 - *Mesure* : La superficie S de l'empreinte sphérique est déterminée à partir du diamètre d du cercle laissé à la surface de la pièce.
 - La dureté brinell HB (en Kgf/mm^2) est ensuite obtenue en divisant la charge F (en Kg) par la surface S et la gravité g .
- Essai Vickers
 - *Principe* : à la différence
 - *Pénétrateur* : Pyramide en diamant de base carrée dont l'angle au sommet est de $\alpha = 136^\circ$
 - *Charge* : Varie entre 5 et 1000 Kg
 - *Durée d'application* : quelques secondes
 - *Mesure* : La superficie S de l'empreinte est déterminée à partir de la diagonale mesurée par le biais d'une lunette spéciale. Il est recommandé de mesurer les deux diagonales et d'en faire la moyenne.
 - La dureté Vickers HV (en kgf/mm^2) est ensuite obtenue en divisant la charge appliquée F par la surface S .
 - *Note* : Il est recommandé de mesurer les deux diagonales et d'en faire la moyenne. De plus, la norme exige une préparation métallographique de la surface.
- Essai Rockwell
 - *Principe* : Mesurer la de l'empreinte laissée dans le matériau à tester par un pénétrateur sous l'action d'une La charge principale est précédée par une destinée à l'effet de la dureté de surface.
 - *Pénétrateur* : Pointe cylindro-conique en diamant (Rockwell A, D et C) ou aussi bille en acier trempé (Rockwell F, B et G) [Remarque : Il existe d'autres échelles Rockwell destinées à la dureté de surface].
 - *Charge* : 60 Kg (Rockwell A et F); 100 Kg (Rockwell B et D) et 150 Kg (Rockwell C et G).
 - *Durée d'application* : quelques secondes
 - *Mesure* : une première précharge de 10 Kg est tout d'abord appliquée. Le zéro de la machine est alors réglé à la profondeur atteinte par la précharge ($F=10$). Ensuite, la charge principale est appliquée progressivement ($F=150 = 10+140$). Finalement la charge est réduite pour la ramener de nouveau à la valeur de la précharge ($F=10$). La profondeur finale est ensuite mesurée par rapport au zéro. La mesure Rockwell s'obtient directement à partir de la profondeur e :

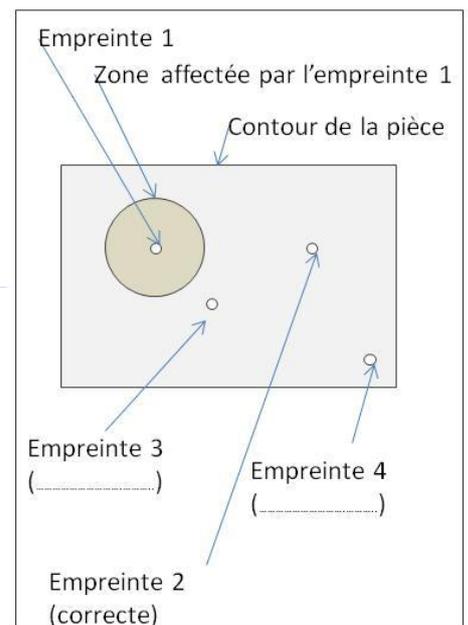
➔ Nécessité de



Principaux essais de dureté		
essai	symbole	principe et conduite de l'essai
Brinell	HB	 <p>bille $\varnothing d$</p> <p>surface</p> <p>$\varnothing a$</p> <p>F</p> $HB = \frac{0,102 \times F}{S}$ <p>avec</p> $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ <p>(F en N, a et d en mm)</p>
Vickers	HV	 <p>pyramide à base carrée</p> <p>136°</p> <p>F</p> <p>d_1</p> <p>d_2</p> $HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ <p>avec</p> $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ <p>(F en N, d_1 et d_2 en mm)</p>
Rockwell	HR	 <p>cône ou bille</p> <p>120°</p> <p>précharge (marquage) F_0 (100 N)</p> <p>mise en charge $F + F_0$</p> <p>relâchement F_0</p> <p>100</p> <p>50</p> <p>0</p> <p>0,2 mm</p> <p>$e =$ enfoncement</p> <p>dureté HR = 100 - e</p> <p>échelle de</p> <p>$\left\{ \begin{array}{l} HR_C \\ HR_B \\ \dots \end{array} \right.$</p>

HR = 100 - e/2 (diamant)
ou
HR = 130 - e/2 (bille)

- Limitations et considérations pratiques :
 - Pour le choix de l'épaisseur de l'éprouvette à mesurer ou pour décider de la faisabilité d'une nouvelle série de mesures, il faut considérer que la profondeur affectée par des déformations plastiques dues à une empreinte est de l'ordre de 10 fois celle de l'empreinte (cas de Rockwell).
 - Pour une nouvelle empreinte, il est fortement conseillé de s'éloigner de la pièce ainsi que des déjà présentes et ce, de distances équivalentes respectivement à 2,5 fois et 3 fois le diamètre de l'empreinte.
 - Un nombre d'autres considérations sont stipulées dans les différentes normes.
- Comparaison entre les principaux essais de dureté
 - La méthode est surtout adaptée pour des pièces brutes et ce à cause de la profondeur et de la largeur de l'empreinte qu'elle laisse. Elle est donc non appropriée aux et aux Elle a cependant l'avantage de ne pas exiger une préparation coûteuse de la surface.
 - Les empreintes laissées par les essais et sont relativement petites. Ces deux méthodes sont donc appropriées
 - La méthode est la plus rapide et s'adapte bien aux mesures en série.
 - La méthode est la plus précise car elle ne fait pas intervenir



📖 TRAITEMENTS THERMIQUES (thermochimiques) DES ACIERS

➤ Généralités

- Objectif et catégories des traitements thermiques
 - Les différents traitements thermiques visent la production de transformations qui à leur tour modifient les
 - Deux grandes catégories de traitements thermiques sont couramment utilisées :
 - les traitements volumiques (trempe, revenu, recuit, vieillissement, ...) qui agissent du matériau.
 - les traitements surfaciques (cémentation, nitruration, carbonitruration, ...) dont l'effet est restreint à
- Grosseur du grain
 - Il a été expérimentalement trouvé que des traitements thermiques affectent la grosseur du grain qui influence à son tour les propriétés du matériau. En effet, un grain fin améliore pratiquement toutes les propriétés mécaniques aux dépens de l'usinabilité.
 - Le grain devient fin quand la température dépasse légèrement une température de transformation dite « température d'austénitisation ». Par contre, sa taille croît ensuite rapidement quand le métal est surchauffé (chauffage trop ou trop

➤ Traitements volumiques

- La trempe
 - Objectifs
 - Améliorer les résistances élastique (appl.: ressorts) et à la rupture (appl. : aciers de constructions après revenu) et la dureté (appl. : pièces de frottement et outils) aux dépens de sa et de sa
 - Régénérer les propriétés d'un métal surchauffé (.....).
 - Procédure
 - *Chauffage* : Se fait jusqu'à une température légèrement supérieure à la température de transformation dépendante du taux de carbone.
 - *Maintien à haute température* : Doit durer le temps permettant aux de se produire jusqu'au Néanmoins, il faudrait que le temps ne soit pas pour éviter
 - Refroidissement :
 - » Devrait être suffisamment pour éviter les transformations de celles qui se sont produites
 - » La vitesse à partir de laquelle une de dureté après trempe est observée est dite vitesse critique de trempe. Si la vitesse est inférieure à cette valeur, la trempe est dite douce. Par contre, si cette vitesse est considérablement excédée, il s'agirait d'une hyper trempe.
 - » Dans des pièces massives, on peut noter la présence de deux genres de trempe : à cœur et en surface.
 - » La vitesse de refroidissement est choisie fonction de l'alliage considéré et du genre de trempe prévue. Elle est obtenue par un choix correspondant de fluide de trempe. Ceux-ci peuvent être gazeux (jet d'air) ou liquides (eau, solution saline, huiles, sels et métaux en fusion,)
 - » Une trempe réussie est la plus homogène possible (.....) et celle qui permet d'obtenir une dureté tout en évitant les tensions responsables des
 - » Installations de trempe : par immersion (trempe totale) ou par jet (trempe partielle)
- Le revenu
 - Objectifs
 - Ce traitement réservé aux pièces préalablement vise à les effets de la en améliorant la malléabilité et la résilience aux dépens d'une légère baisse de ses et de sa
 - Le revenu permet de supprimer les qui contribuent à la fragilité des matériaux trempés.
 - Procédure
 - *Chauffage* : Chauffer la pièce à une température inférieure à la température de début de transformation (.....). Les effets du revenu sont fonction de sa température. Pour les aciers outils elle varie entre 200 et 300 °C. Il s'agit d'un revenu de détente qui

- Applications
 - Ce procédé est approprié à des pièces de frottement fortement chargées mais non destinées à subir des chocs.
 - Comparativement à la cémentation, cette technique permet d’avoir une plus grande dureté de surface ($\approx 140\%$) mais présente surtout l’avantage de ne pas nécessiter une trempe subséquente susceptible de déformer ou d’oxyder la pièce.
 - Elle est malheureusement plus et plus
 - Le durcissement qu'elle entraîne est également irréversible.
 - La nitruration est généralement appliquée aux aciers spéciaux (nécessité d’avoir des additions de Al et de Cr pour éviter l’écaillage de la pièce et le durcissement/fragilisation à cœur).

➤ Carbonitruration

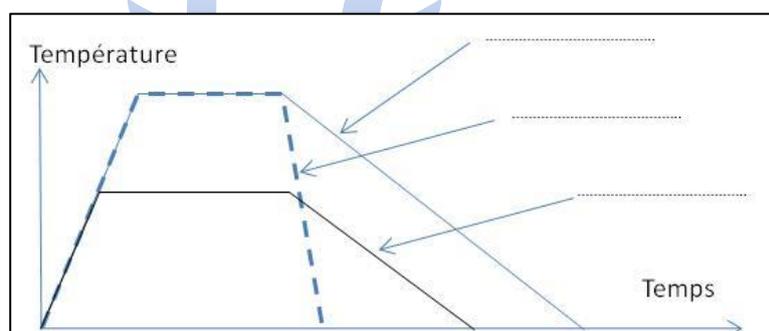
- *Objectifs et principe* : Obtention de pièces présentant de très bonnes et et ce, par le durcissement de la surface. Ceci se fait par l’action combinée de l’azote et du carbone. Ce traitement est suivi par une trempe.
- Applications
 - Ce procédé est un compromis entre la cémentation et la nitruration. Le durcissement y est surtout dû au carbone alors que l’azote sert essentiellement à abaisser la température de transformation et ainsi rendre le procédé plus
 - La trempe requise après ce procédé se fait à de moindres et d’où les plus faibles Ceci en fait un procédé populaire dans les domaines de la mécanique de précision : automobile, aviation, métrologie, ...
- Procédure
 - Soumettre des pièces à un courant de gaz ammoniac et de gaz carbonique et ce, dans une caisse étanche contenant la pièce et portée à une température variant entre 700°C et 875°C.
 - Une couche cémentée par carbonitruration de 0,5 à 0,7 mm est généralement obtenue après un traitement de 2 à 3 heures. L’épaisseur de cette couche est fonction de la température et de la proportion du gaz ammoniaque.

➤ Compléments

Gamme de fabrication de pièces traitées thermiquement et annulation des effets des traitements thermiques

Traitement thermique	Position dans la gamme de fabrication (mettre une croix à l’endroit approprié)	Annulation de l’effet
Trempe	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> ébauche finition </div>
Cémentation	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> ébauche finition </div>
Carbonitruration	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> ébauche finition </div>
Nitruration	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> ébauche finition </div>
Trempe superficielle	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> ébauche finition </div>

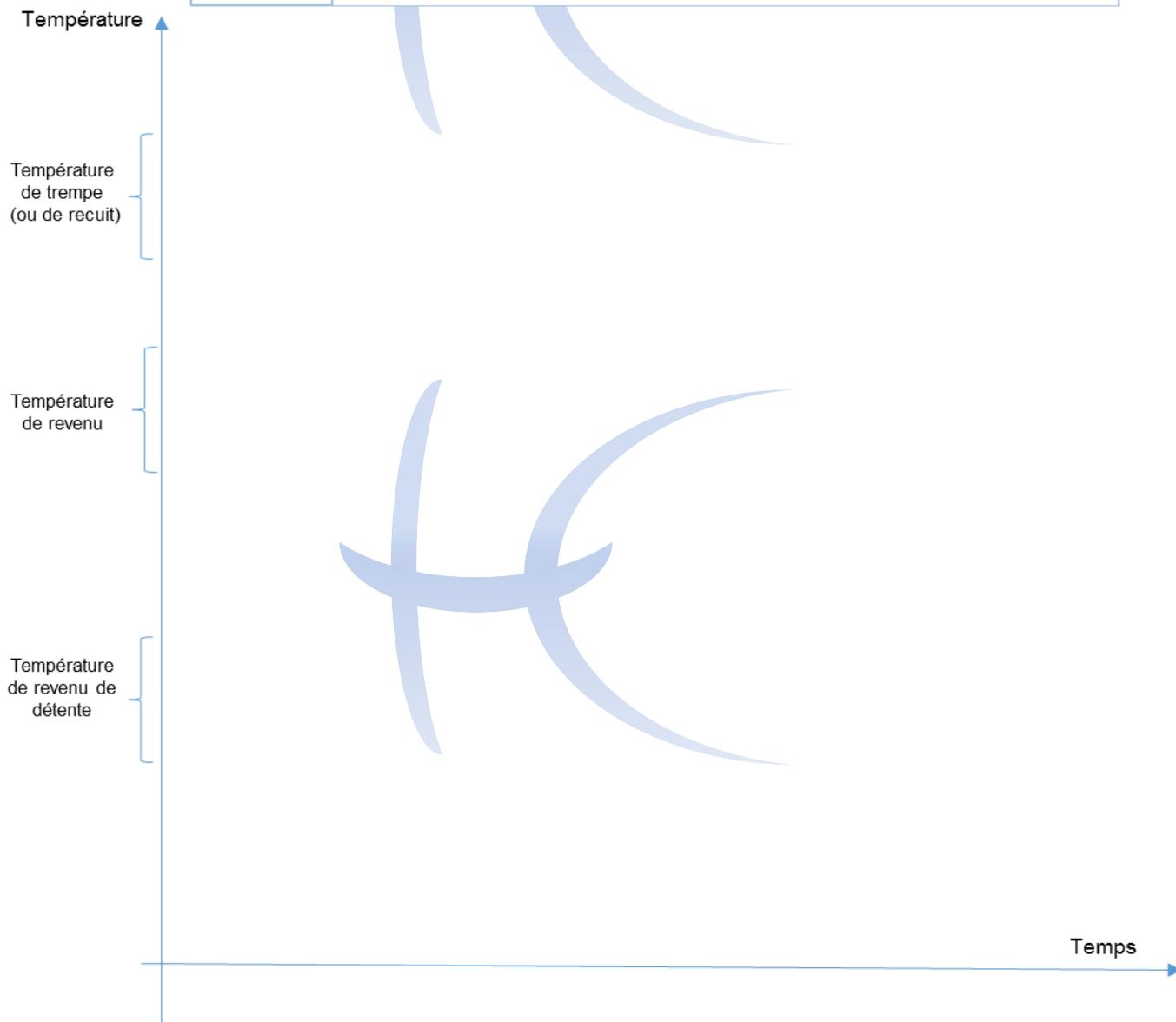
Schémas de chauffage/refroidissement



Application

Dessinez et identifiez les courbes (a1; a2; a3;; c2 et c3) correspondant à :

1-trempe	a) d'une pièce a en C60
2-revenu	b) d'une pièce b en C60 plus mince que A
3-recuit	c) d'une pièce c de même forme que A mais en un matériau à 0.9% C



📖 MATERIAUX AVANCES

➤ Les métaux réfractaires

- *Principe/caractéristiques* : Les métaux réfractaires sont caractérisés par leurs températures de fusion très élevées, qui sont bien au-dessus de ceux du fer, du cobalt, et du nickel. Ils sont utilisés dans des applications exigeantes nécessitant une résistance à haute température et résistance à la corrosion. Les plus fréquemment utilisés de ces métaux sont le tungstène, le tantale, le molybdène et le niobium. Ils sont mutuellement solubles et forment des alliages les uns avec les autres en toutes proportions. Ces quatre métaux réfractaires et leurs alliages sont disponibles sous formes de barres ainsi que des produits tels que des vis, boulons, goujons et tubes.
- *Quelques applications* : Ces métaux sont employés pour des applications requérant une bonne résistance à des températures élevées, une bonne conductivité thermique et électrique et un faible coefficient de dilatation (par exemple : les composants de fours, échangeurs de chaleur, bobines, électrodes de soudage, etc.).
- *Limitations* : Bien que les températures de fusion de ces métaux soient bien au-dessus de 4000 ° C, ils s'oxydent à des températures beaucoup plus basses. De plus, les coûts excessifs de ces matériaux sont prohibitifs.

➤ Les superalliages

- *Principe/caractéristiques* : Un superalliage, appelé aussi « alliage à haute performance » est un alliage métallique présentant une excellente résistance mécanique et une bonne résistance au fluage à haute température (typiquement 0,7 à 0,8 fois sa température de fusion) ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion. Les éléments d'alliages à la base d'un superalliage sont le plus souvent le nickel, le cobalt et le fer, mais aussi le titane et l'aluminium.
- *Quelques applications* : Ces alliages sont utilisés dans l'industrie et fabrication des moteurs à turbine des avions, d'aimants permanents (acier de cobalt) et des outils de coup [(Carboly : carbure de tungstène et cobalt) ; (Stellite : chrome et cobalt)]
- *Limitations* : Les coûts excessifs de ces matériaux sont prohibitifs.

➤ Les nanomatériaux avancés

- *Principe/caractéristiques* : Un nanomatériau est un matériau possédant des propriétés particulières à cause de sa taille et structure nanométrique. Ils sont habituellement issus de la nanotechnologie, à la différence des nanoparticules qui peuvent être d'origine naturelle. Un nano objet, fait de nanomatériau, est essentiellement une nano plaque ou une nano fibre.
- *Quelques applications* :
 - *Nanométalliques* : secteurs antimicrobiens et/ou de la catalyse ; couches conductrices des écrans, capteurs ,
 - *Nanoporeux* : aérogels pour isolation thermique dans les domaines de l'électronique, de l'optique et de la catalyse ainsi que des implants dans le domaine biomédical.
 - *Nanotubes* : mono feuillets pour des applications dans le domaine de l'électronique, et conduites pour les industries pétrolières et gazières
 - *Nanofils* : applications dans les couches conductrices des écrans ou encore les cellules photovoltaïques.
- *Limitations* : Le risque de toxicité élevé est le principal inconvénient lié à ces matériaux..

➤ Les alliages à mémoire de forme

- *Principe/caractéristiques* : Ces matériaux ont la capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique. Ces alliages sont super flexibles (jusqu'à 10 %) et présentent également un effet amortissant. Parmi les principaux alliages à mémoire de forme, on retrouve toute une variété d'alliages de nickel et de titane comme constituants principaux, en proportions presque égales.
- *Quelques applications* :
 - *Applications biomédicales* : arche pour appareil dentaire, agrafes pour consolider une fracture osseuse, stent, ...
 - *Applications aérospatiales* : manchon d'accouplement (pour combler le problème de manque de soudabilité), panneaux solaires de satellites, ...
 - *Applications automobiles* : activateurs électriques ou thermiques (Verrouillage central,

Phares escamotables, amortisseurs variables).

- *Limitations* : La principale limitation à l'usage de ces matériaux est la durabilité de leur capacité à reprendre forme. En effet, la majorité de ces alliages perdent cette capacité après quelques dizaines ou au mieux quelques milliers de transformations.

Principales Sources : Wikipédia - Eric Gaffet. Nanomaterials : a review of the definitions, applications, health effects. How to implement secure development. 2011. - Nimesis - Smart and creative technology