

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université El-Echahid HAMMA Lakhdar EL OUED



Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Polycopié de Cours

(Niveau : 2^{ème} année Génie Mécanique)

Science des Matériaux

Elaboré Par :

Dr. Mohammed Iliasse BOULIFA

2^{ème} édition

Année universitaire : 2024-2025

Université El-Echahid Hamma Lakhdar EL-OUED

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Polycopié de Cours

Science des Matériaux

(Niveau : 2^{ème} année Génie Mécanique)

Elaboré Par :

Dr. Mohammed Iliasse BOULIFA

Maitre de conférences "A"

2^{ème} édition

Année universitaire : 2024-2025

SOMMAIRE

Avant-propos	i
Chapitre I : Généralités	1
I.1. Classification des matériaux.....	1
I.1.1. Les métaux et alliages.....	2
I.1.2. Les céramiques et les verres.....	2
I.1.3. Les polymères.....	2
I.1.4. Les matériaux composites.....	3
I.2. Domaines d'utilisations.....	4
I.3. Structure des matériaux : matériaux amorphes et matériaux cristallins.....	5
I.4. Notions de cristallographie.....	9
Chapitre II : Diagrammes d'équilibre	22
II.1. Cristallisation de matériaux.....	22
II.1.1. Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement.....	22
II.1.2. Cristallisation d'un métal pur.....	25
II.1.3. Cristallisation d'un alliage.....	27
II.2. Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles.....	29
II.3. Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles.....	32
Chapitre III : Diagramme d'équilibre fer-carbone	37
III.1. Caractéristiques du fer et du carbone.....	37
III.2. Diagramme d'équilibre fer-cémentite	42
III.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	49
III.4. Désignation normalisée des aciers et des fontes.....	53

III.5. Désignation normalisée d'autres aciers alliés.....	57
Chapitre IV : Traitements thermiques et traitements thermochimiques de diffusion.....	60
IV.1. Traitements thermiques.....	61
IV.1. 1. Buts des Traitements thermiques.....	61
IV.1. 2. Procédés des traitements thermiques.....	62
IV.1. 3. Constituants métallographiques issus de traitements thermiques.....	63
IV.1. 4. Effet de la température d'austénitisation, la teneur en carbone et les éléments d'alliage sur le processus des traitements thermiques.....	64
IV.1. 5. Classification des traitements thermiques.....	66
IV.5.1. Recuit.....	66
IV.5.2. Trempe et Revenu	68
IV.2. Traitements thermochimiques.....	70
IV.2.1. Cémentation.....	70
IV.2.2. Nitruration.....	71
IV.2.3. Carbonitruration.....	72
Chapitre V : propriétés mécaniques des matériaux.....	73
V.I. Définitions.....	73
V.I.1. La ductilité.....	73
V.I.2. La dureté.....	74
V.I.3. L'élasticité.....	75
V.I.4. La fragilité.....	75
V.I.5. La malléabilité.....	76

V.I.6. La résilience.....	77
V.I.7. La rigidité.....	78
V.II. Essais mécaniques.....	79
V.II.1. Essai de dureté.....	79
V.II.2. Microdureté Vickers.....	82
V.II.3. Essai de traction.....	82
V.II.4. Essai de résilience.....	88
V.II.5. Essai de compression.....	90
IV. Références bibliographiques.....	94

Avant-propos

Ce polycopié du cours pour l'enseignement de la science des matériaux, est destiné aux étudiants de la 2^{ème} Année licence génie mécanique du domaine des sciences et techniques. La polycopie présente une version adaptée aux canevas proposés par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Le cours contenant les concepts fondamentaux de la science des matériaux. Ce cours est conforme au programme agréé par le ministère, enrichi par quelques points nécessaires pour mieux comprendre ce domaine à savoir les propriétés mécaniques des matériaux. Le contenu de ce cours est le résultat d'une recherche bibliographique basée sur de nombreux documents et ouvrages.

Chapitre I : Généralités

Objectifs du chapitre

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Classer les matériaux selon la composition chimique et la structure ;
- Sélectionner les matériaux pour une bonne utilisation ;
- Différencier entre les propriétés des corps cristallin et les corps amorphe ;
- Expliquer les notions de base de cristallographie.

I.1. Classification des matériaux

Les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles selon leurs compositions chimiques et structures atomique (la nature des liaisons entre les atomes). On peut distinguer :

- Les métaux et alliages ;
- Les céramiques et les verres ;
- Les polymères ;
- Les matériaux composites.

La figure I.1. présente les principales familles des matériaux

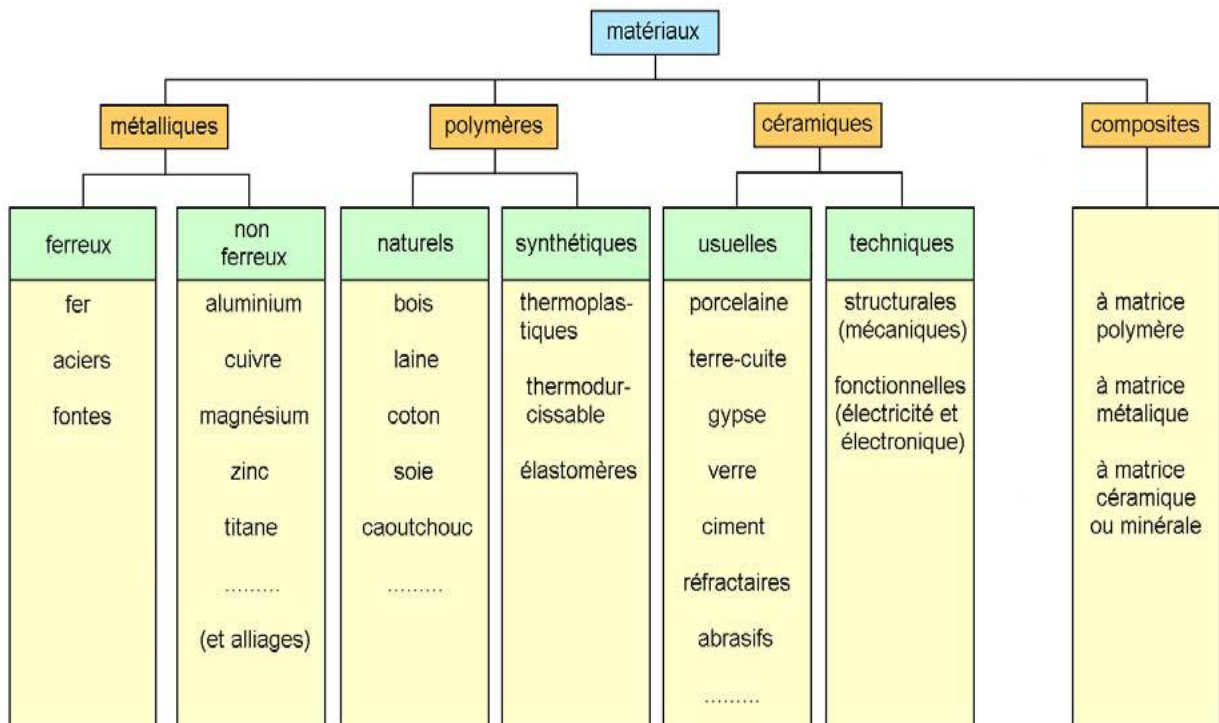


Figure I.1. Principales familles des matériaux

I.1.1. Les métaux et alliages

Les matériaux métalliques, faisant intervenir une liaison métallique : matériaux durs, rigides et déformables plastiquement. Ce sont des métaux ou des alliages métalliques : fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc. Les métaux et leurs alliages sont ordinairement bons conducteurs de la chaleur, de l'électricité, opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent.

On les obtient soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, clinchage...). Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

I.1.2. Les céramiques et les verres

Les matériaux minéraux ou céramiques, liaison ionique et liaison covalente : Ce sont les matériaux inorganiques les plus anciens et les plus couramment utilisés en Génie Civil (pierre, brique, verre...), souvent les mettre en œuvre à l'état pâteux. Ils ne deviennent fragiles qu'après la prise. Ces matériaux sont caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires), résistants à l'abrasion, mais pas aux chocs, moins denses que les métaux, isolants thermique et électrique. Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc. généralement poreux et fragiles.

I.1.3. Les polymères

Les matériaux organiques ou polymères organiques, liaison covalente et liaison secondaire : matériaux constitués de molécules formant de longues chaînes de carbone, matériaux faciles à mettre en forme, ils supportent rarement des températures supérieures à 200 °C. Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétique : bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, caoutchouc, cuir, etc. Ce sont presque toujours des isolants thermique et électrique.

Ces matériaux sont récents. Ce sont de larges macromolécules organiques, comme par exemple le polyéthylène $(C_2H_4)_n$ dont le nombre de monomères n varie entre 100 et 1000 et la masse molaire de $M=100$ à 10^3 kg/mol. Les matières plastiques ont l'avantage de pouvoir être mises en forme par déformation plastique ou injection à l'état liquide. Elles peuvent être thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ou thermodurcissables. Elles sont en général mauvais conducteurs thermique et électrique et très peu denses.

I.1.4. Les matériaux composites

Les matériaux composites sont des assemblages (des combinaisons hétérogènes) d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles, mais dont la structure est définie en fonction de l'application : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone, contreplaqué, béton, béton armé. Ou bien se développe naturellement sous l'effet des sollicitations mécaniques ou thermique (ex. bois : fibres de lignine dans une matrice de cellulose, ou métaux texturés par déformation plastique intense).

Le Tableau I.1. Présente quelques ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux.

Tableau I.1. Ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux

Propriété	Métaux	Céramiques	Polymères
Densité ρ [kg/m ³]	8000 (2000..22000)	4000 (2000..18000)	1000 (900..2000)
Dilatation thermique α [1/K]	$10 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $100 \cdot 10^{-6}$)	$3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-6}$.. $20 \cdot 10^{-6}$)	$100 \cdot 10^{-6}$ ($50 \cdot 10^{-6}$.. $500 \cdot 10^{-6}$)
Capacité calorifique c_p [J/(kg·K)]	500 (100..1000)	900 (500..1000)	1500 (1000..3000)
Conductivité thermique k [W/(m·K)]	100 (10.. 500)	1 (0.1.. 20)	1 (0.1.. 20)
Température de fusion ou de transition vitreuse T_m [K]	1000 (250..3700)	2000 (1000..4000)	400 (350..600)
Module d'élasticité, module de Young E [GPa]	200 (20..400)	200 (100..500)	1 (10^{-3} ..10)
Coefficient de Poisson	0.3 (0.25..0.35)	0.25 (0.2..0.3)	0.4 (0.3..0.5)
Contrainte à rupture σ_Y [MPa]	500 (100..3500)	100 (10..400 tract.) (50..5000 compr.)	50 (10..150 tract.) (10..350 compr.)
Dureté	Moyenne	Haute	Basse
Usinabilité	Bonne	Très mauvaise	Très Bonne
Résistance à l'impact	Bonne	Mauvaise	Très Mauvaise
Résistance au fluage thermique	Moyenne	Excellente	Très mauvaise
Conductivité électrique	Haute	Très faible	Très faible
Résistance à la corrosion	Moyenne	Excellente	Bonne

I.2. Domaines d'utilisations

Voici quelques applications des grandes classes de matériaux :

I.2.1. Les métaux et alliages (Figure I.2) : mobilier urbain en acier galvanisé, tôles en acier, filtres, électrodes de batterie, coupe-flammes en mousse métallique, etc.



Figure I.2. Exemples d'application de matériaux métallique

I.2.2. Les céramiques et les verres (Figure I.3) : vitres, disques de frein en carbone-céramique, outils de machine-outil en carbure de tungstène, pot catalytique en zircone, etc.



Figure I.3. Exemples d'application de céramiques

I.2.3. Les polymères (Figure I.4) : bouteilles d'eau en polytéréphtalate d'éthylène (PET), CD en polycarbonate (PC), vêtements en polyéthylène (PE), Rilsan, Gore-tex, bouteilles de lait, canalisations en polyéthylène haute densité (PEHD), pièces mécaniques en polyamide, mousses d'isolation en polyuréthane (PUR), sacs biodégradables en acide polylactique (PLA), etc.



Figure I.4. Exemples d'application des polymères

I.2.4. Les composites (Figure I.5) : coques de bateaux, pales d'hélicoptères, aubes de turbine, casques de moto, skis, surfs, planches à voile, arbres de transmission, etc.

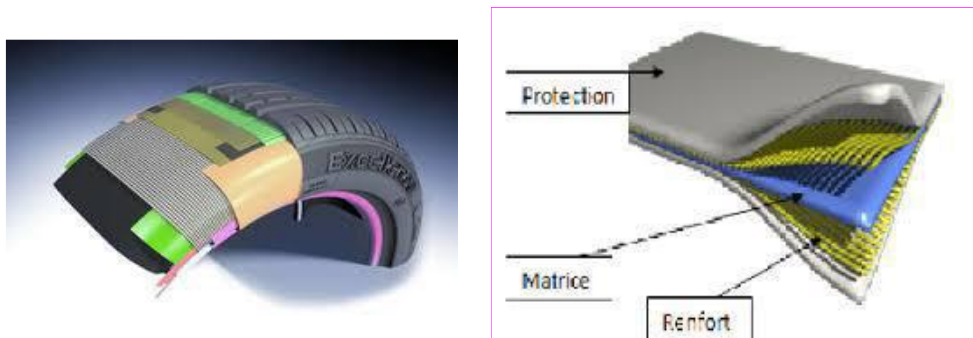


Figure I.5. Exemples d'application des composites

Remarque : Le développement de la protection de l'environnement et du recyclage encourage les entreprises à rechercher de nouveaux matériaux, comme les matériaux biodégradables. L'acide polylactique, extrait de végétaux comme la betterave ou le maïs, en est un bon exemple. Il est actuellement utilisé pour les fils de suture résorbables, pour remplacer les sacs plastiques, ou encore pour les boîtes plastiques.

I.3. Structure des matériaux

I.3.1. Les différents états de la matière

La matière dans la nature existe sous trois états différents : état gazeux, état liquide et état solide (Figure I.6). Ces états se différencient entre elles par les interactions entre ses particules constitutives (atomes, molécules ou ions). Les liquides et les gaz sont des fluides déformables sous l'action de forces très faibles, ils prennent la forme du récipient qui les contient. Par contre les solides ont une forme propre et leur déformation exige des forces importantes.

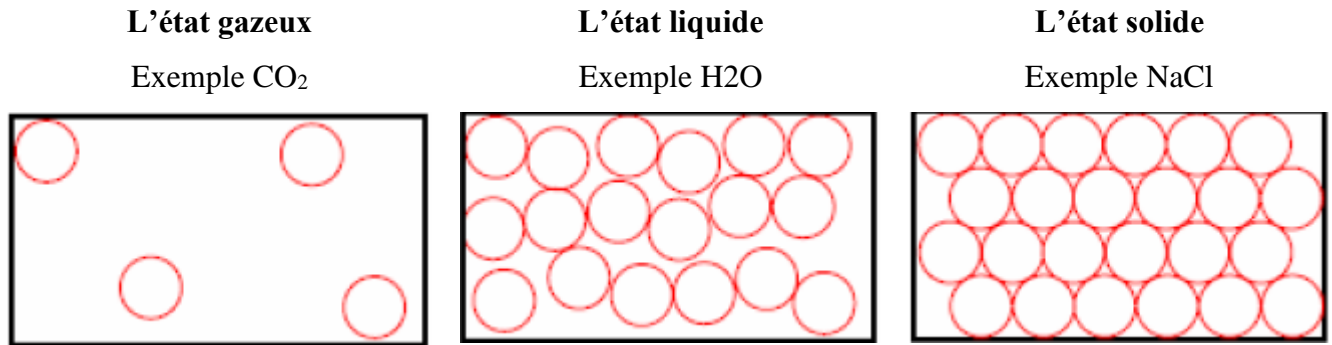


Figure I.6 les trois états de la matière

a. L'état gazeux

Les molécules sont indépendantes les unes des autres. Les variables caractérisant cet état sont : le volume, la pression et la température (V, P, T) ; Exemples : H₂, NH₃, CO₂.

b. L'état liquide

Les molécules ne sont plus libres, les forces exercées entre elles sont plus importantes. Les variables utilisées sont la température et le volume (T, V). Exemple : H₂O. Si on continue à diminuer la température d'un liquide jusqu'à sa température de solidification tout le liquide prend une forme rigide et présente une forte résistance à la déformation.

c. L'état solide

Les forces de liaison entre les particules qui forment le solide (atomes ou molécules) sont plus fortes d'où une grande rigidité. Les solides qu'ils soient naturels ou artificiels peuvent être divisés en deux catégories : les solides amorphes (les matériaux amorphes) et les solides cristallins (matériaux cristallins) (Figure I.7).

Par la structure cristalline on entend l'arrangement des atomes dans un cristal. Un cristal est défini comme étant un corps solide qui a une structure réticulaire et se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se produit périodiquement dans les trois dimensions. L'absence de structure réticulaire caractérise le corps amorphe.

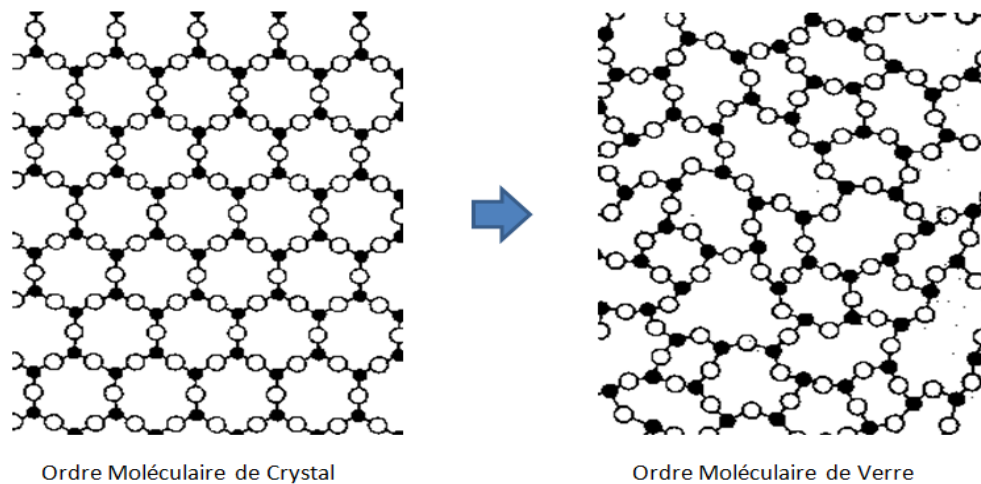


Figure 1.7. Structure cristalline et structure amorphe

I.3.2. Les solides amorphes (les matériaux amorphes)

Les propriétés des corps amorphes diffèrent largement de celle des corps cristallin. Les corps amorphes sont caractérisés par la disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle, ils sont assimilés à des liquides figés.

Exemples : Les verres, les matières plastiques (caoutchouc).

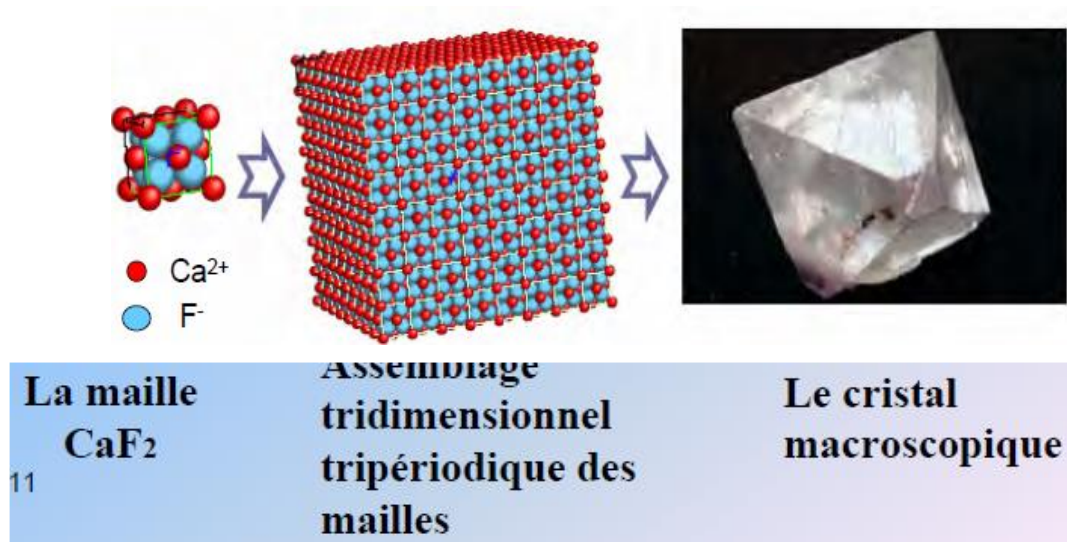
Les corps amorphes sont caractérisés par :

- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée. La température de fusion s'étale sur un large domaine de température. (Analyse thermique) ;
- L'isotropie (mêmes propriétés physiques et chimiques dans toutes directions) surtout les propriétés ;
- le diagramme de diffraction des rayons X (DRX) est continu.

I.3.3. Les solides cristallins (matériaux cristallins) :

- C'est un état ordonné, avec des formes géométriques régulières (cubes, hexagones ...etc.);
- Les atomes sont arrangés de façon régulière et répétitive ;
- Cet ordre est gardé à une longue distance ;
- Les liaisons sont très fortes (ionique, métallique...).

Exemples : Cristaux de NaCl, CaF₂ (Figure I.8).

Figure I.8. Exemple de cristal CaF₂

Le corps cristallin est caractérisé par :

- Les diagrammes de diffraction de Rayon X (DRX) sont discontinus et sous forme de raies ;
- Les températures de fusion franches (Étude par l'Analyse Thermique) ;
- Les propriétés physiques qui varient d'une direction à l'autre : composés anisotropes ;
- Des faces planes qui ont une symétrie (observation par le MEB).

L'étude de ces arrangements ordonnés et ces symétries dans les solides cristallisés est développée par la cristallographie.

Remarques

- On trouve ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallins, le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue ;
- Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont été élaborées à partir de matériaux amorphes.

I.4. Notions de cristallographie

I.4.1. Définition de la Cristallographie

- La cristallographie est une science qui étudie les cristaux c'est à dire la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. La cristallographie se dégagèa progressivement de la minéralogie et se rapprocha de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante ;
- La cristallographie est la branche de la science qui se consacre à l'étude de la matière cristalline à l'échelle atomique. Elle s'intéresse essentiellement aux distributions spatiales des atomes ou groupe d'atomes qui sont étroitement liées aux propriétés physico-chimiques d'un cristal.

I.4.2. Etats cristallin

➤ Définition d'un Cristal

Un cristal est un solide polyédrique, à structure régulière et périodique, formée d'un ensemble ordonné d'un grand nombre d'atomes (Figure I.9.), de molécules ou d'ions ayant des faces planes qui se rencontrent le long d'arrêtes droites (Figure I.10.).

Il peut être décrit par translation suivant les trois directions de référence d'une entité de base qu'on appelle la maille. La description du cristal nécessite la connaissance du réseau et celle du motif.

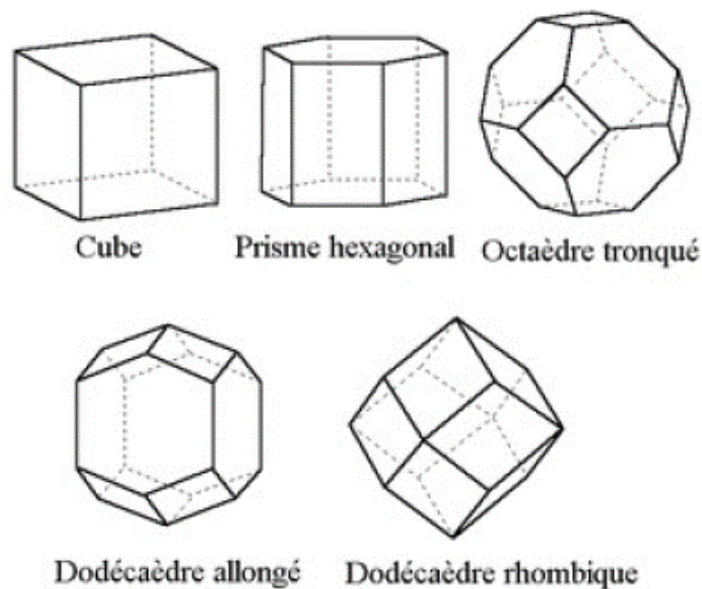


Figure I.9. Représentation de quelques formes polyédriques.

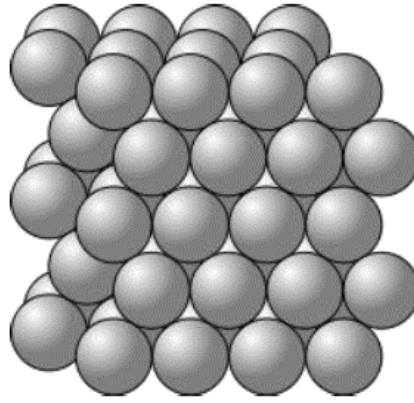


Figure I.10. Arrangement des atomes dans un cristal

Il existe deux types de solides cristallisés :

- ✓ les cristaux moléculaires
- ✓ les cristaux macromoléculaires

Les cristaux moléculaires sont formés par des empilements réguliers des molécules, c'est le cas par exemple du diode I_2 , du dioxyde de carbone CO_2 , de l'eau H_2O .etc.

Dans les cristaux macromoléculaires, la notion de molécule en tant qu'entité chimique indépendante est remplacée par le cristal qui constitue ainsi une molécule. On classe parmi les cristaux macromoléculaires :

- les cristaux ioniques ($NaCl$, $CsCl$, CaF_2) ;
- les cristaux covalents (carbone à l'état graphite et diamant, Si , Ge) ;
- les cristaux métalliques (Na , Fe , Cu).

➤ Cristal idéal

Le cristal idéal ou parfait est constitué d'une répartition régulière des atomes, des ions ou des molécules suivant les trois dimensions de l'espace et l'arrangement régulier des atomes s'étend pratiquement à l'infini. Il peut être caractérisé comme l'association d'un réseau de points obtenu par des translations, d'un motif, plus petite entité discernable qui se répète par translation.

➤ Cristal Réel

Un cristal réel contient un nombre très grand mais fini d'atomes. Il n'est pas parfaitement périodique car il présente des défauts comme des lacunes ou des dislocations. Un cristal réel (ou polycristal) est constitué de plusieurs monocristaux, appelés grains ou cristallites (Figures I.11 et I.12). Ces monocristaux ont des orientations différentes et sont séparés entre eux par des joints de grains.

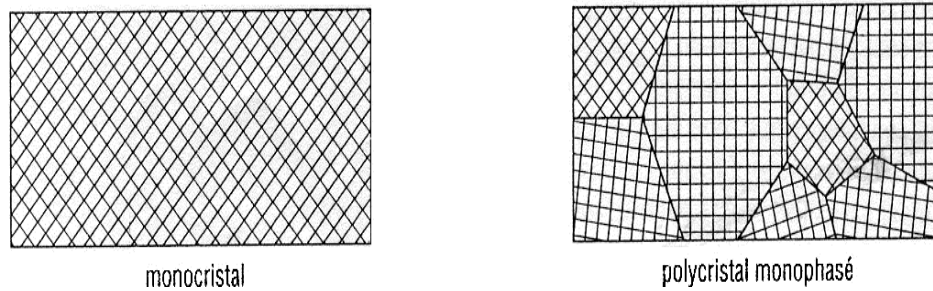


Figure I.11. Représentation schématique d'un monocristal et d'un polycristal

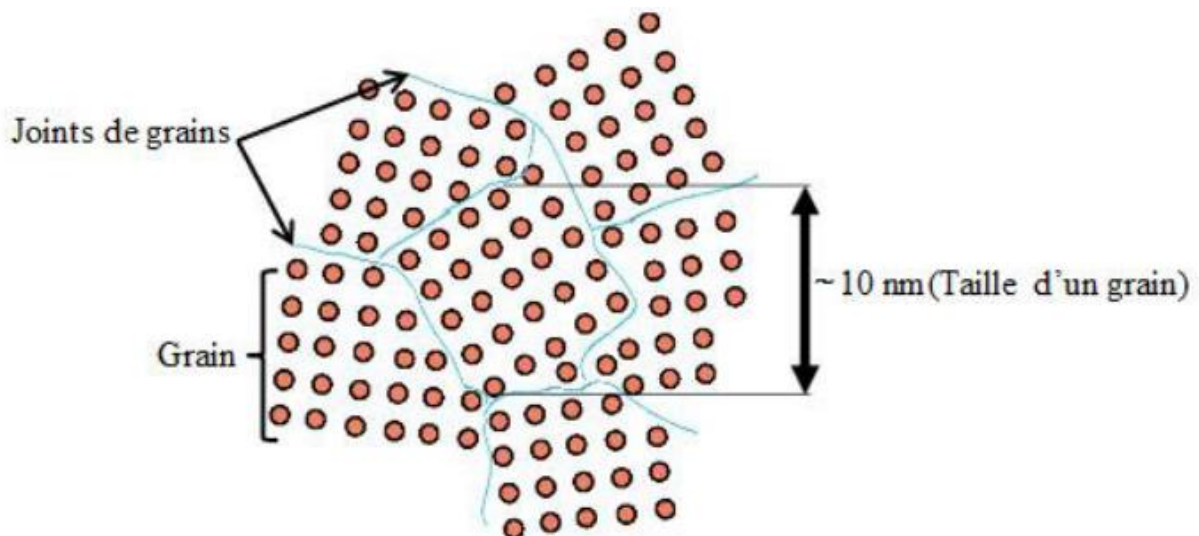


Figure I.12. Représentation d'un cristal réel formé de plusieurs monocristaux

➤ Les propriétés des corps cristallins

Les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- a. Ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions), l'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.
- b. Un matériau cristallin peut présenter soit :
 - ✓ Un monocristal (cristal unique) par exemple le cristal de quartz, de diamant etc.
 - ✓ Un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).
- c. Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels :

$$F + S = A + 2 \quad (1)$$

F : faces, S : sommets, A : arêtes.

Les faces sont caractérisées par deux lois :

- ✓ Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples.
- ✓ Si on fait intervenir la notion de réseau tridimensionnel, la position de tout point du réseau peut être indiquée par des coordonnées par rapport à un système d'axes dont l'origine est placée en un nœud du réseau

d. La plupart des cristaux se comportent d'une façon inattendue par rapport à la lumière. Les rayons lumineux se propagent à des vitesses différentes dans les milieux cristallins.

e. Les propriétés d'un cristal peuvent avoir la même valeur dans plusieurs directions et l'on décèle suivant ces directions une symétrie de diverses natures.

I.4.3. Maille, réseau, motif et structure cristalline

➤ Maille

La maille élémentaire c'est le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini. Elle est définie par trois vecteurs a , b et c (les périodes suivant les axes ox , oy et oz , respectivement) non coplanaires et trois angles α , β et γ (Figure I.13.). Avec cette maille on peut remplir tout l'espace du cristal sans laisser des lacunes.

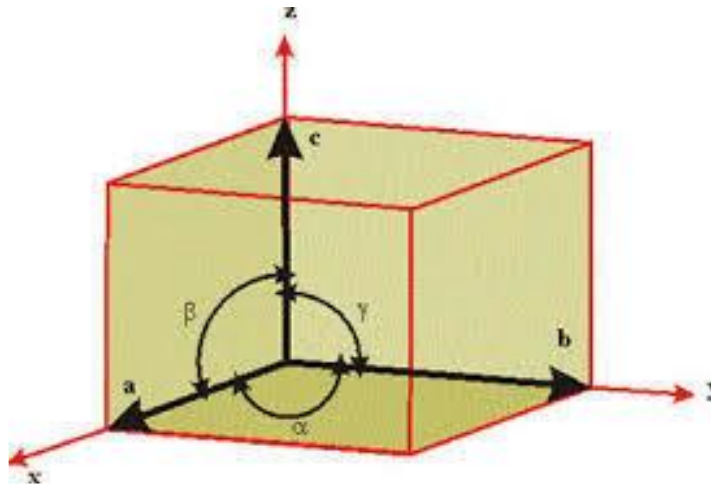


Figure I.13. Maille cristalline (a , b , c , α , β , γ)

Parmi les systèmes cristallins, on trouve (Figure I.14.) :

- ✓ **Maille cubique :**
 - **Maille cubique simple :** atomes présents uniquement aux points du réseau.
 - **Maille cubique centré (système CC) :** il y a un atome supplémentaire au centre du cube.

- **Maille cubique faces centrées (système CFC)** : chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

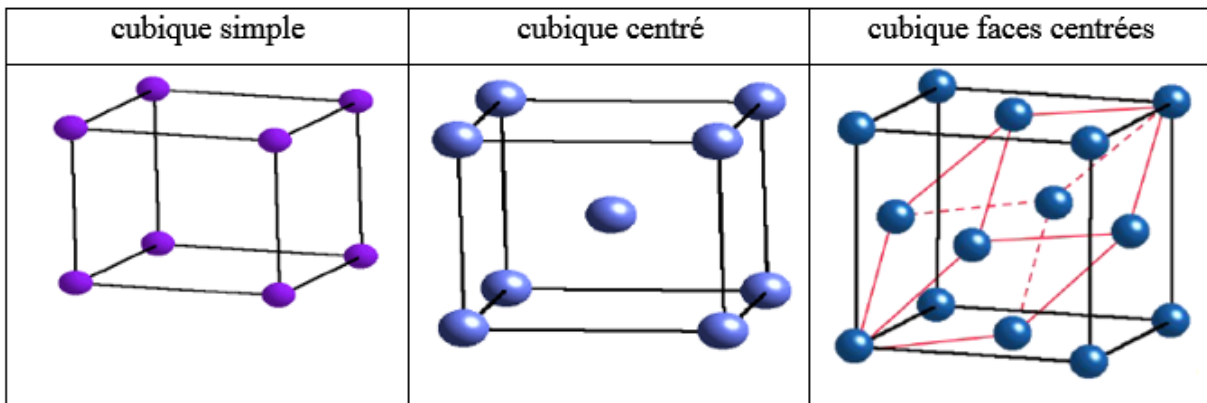


Figure I.14. Les trois structures du système cubique

- ✓ **Maille hexagonal** (Figure I.15.) : le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique.

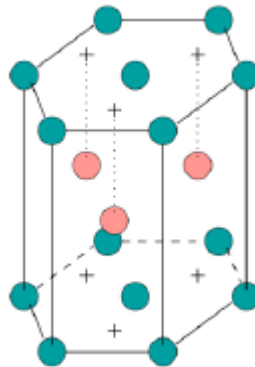


Figure I.15. Structure du système hexagonal

- **Calcul de nombre d'atomes dans les systèmes cubique, et hexagonal compacte** (figure I.16.)

- ✓ **Cubique simple**

$$8 \times \frac{1}{2} = 1 \text{ atome par maille}$$

- ✓ **Cubique à faces centrées (CFC)**

$$1 \text{ atome à chaque sommet : } (8 \times \frac{1}{8})$$

$$\text{atome au centre de chaque face } (6 \times \frac{1}{2})$$

$$\text{donc : } (6 \times \frac{1}{2}) + (8 \times \frac{1}{8}) = 4 \text{ atomes par maille}$$

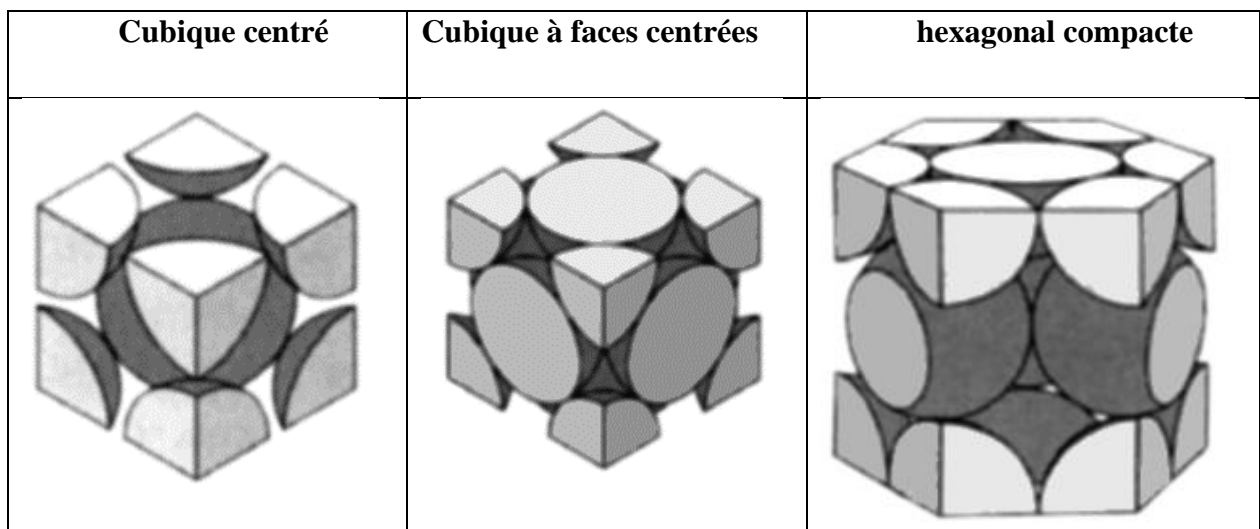
✓ **Cubique centré (CC)**1 atome à chaque sommet : $(8 \times 1/8)$ 1 atome au centre du cube : $(1 \times 1/1)$ donc : $(8 \times 1/8) + (1 \times 1/1) = 2$ atomes par maille✓ **hexagonal compacte (HC)**1 atome à chaque sommet : $(12 \times 1/6)$ atome au centre des 2 bases : $(2 \times 1/2)$ 3 atomes au centre : $3 \times 1/1$ Donc : $(12 \times 1/6) + (2 \times 1/2) + (3 \times 1/1) = 6$ atomes par maille

Figure I.16. Nombre d'atomes dans les trois structures du système CC, CFC et HC

➤ **Maille de Wigner-Seitz**

On appelle maille de Wigner-Seitz, l'ensemble de points les plus proches d'un nœud origine que de n'importe quel autre nœud (Figure I.17.). L'avantage de cette maille est qu'elle est primitive et possède la symétrie du réseau. C'est pourquoi elle est utilisée en physique. L'inconvénient de cette maille est qu'elle n'est forcément pas parallélépipédique. Elle est constituée en traçant les segments qui relient un nœud particulier à tous ses voisins et en construisant les plans médians (en deux dimensions les médiatrices) de ces segments. La maille de Wigner-Seitz est alors le plus petit volume (en 2 D la plus petite surface) enfermé par ces plans (médiatrices).

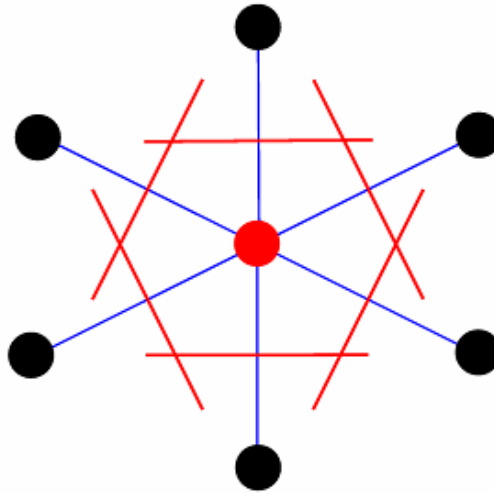


Figure I.17. Méthode de détermination d'une cellule de Wigner-Seitz

➤ Réseau cristallin

Un réseau cristallin (Figure I.18.) est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour nœuds les atomes (sommets des parallélépipèdes). Les droites passant par ces nœuds sont appelées rangés.

Le réseau est engendré par la translation de la maille par les vecteurs de base, tous les nœuds du réseau sont définis par cette translation. Ou autrement dit, le réseau cristallin est une notion purement géométrique, il est constitué de l'ensemble de points, extrémités de tous les vecteurs de translations possibles.

Vecteur de Translation s'écrit : $T = u \cdot a + v \cdot b + w \cdot c$ (2)

Tel que : u, v et w trois entiers. a, b et c les trois périodes suivant les trois directions de l'espace ox, oy et oz, respectivement.

➤ Motif

C'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal. Un motif (Figure I.18.) est un atome (ion ou molécule) ou un groupement d'atomes de même nature ou de nature différente qui se répète, périodiquement, suivant les trois directions de l'espace pour décrire le cristal.

L'ensemble régulier de motifs est appelé réseau :

- ✓ Contrairement au motif le nœud n'a pas de réalité physique.

✓ La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés, c'est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.

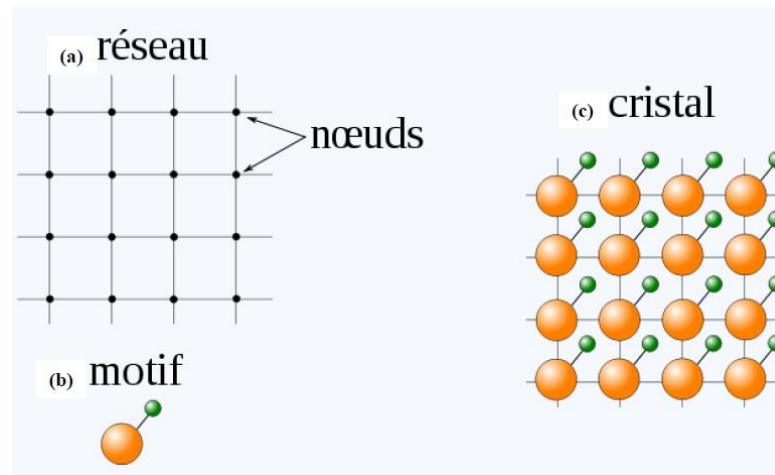


Figure I.18. Représentation à 2 dimensions : (a) réseau (b) motif (c) structure cristalline (cristal)

➤ Structure cristalline

Pour expliquer les particularités observées dans les cristaux, on doit admettre que tout corps cristallin a une structure ordonnée réticulaire (Figure I.19.) qui est indépendante de la nature et de la forme des particules matérielles élémentaires constituant le cristal.

Tous les nœuds sont groupés dans des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires, la distance entre deux plans voisins de la même famille est la distance inter-réticulaire.

Tous les parallélépipèdes qui ont pour sommets les nœuds sont appelés maille du réseau, c'est à dire le volume minimal d'un cristal qui permet de juger de la structure atomique du volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire.

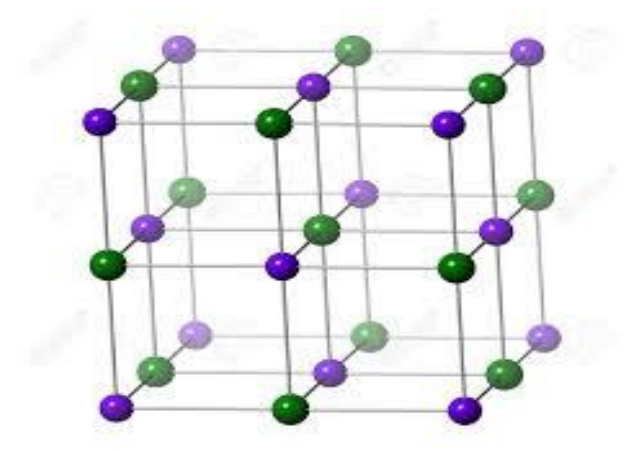


Figure I.19. Structure ordonnée réticulaire

D'une manière plus simple on peut mettre (Figure I.20.) :

Structure cristalline = Réseau + Motif

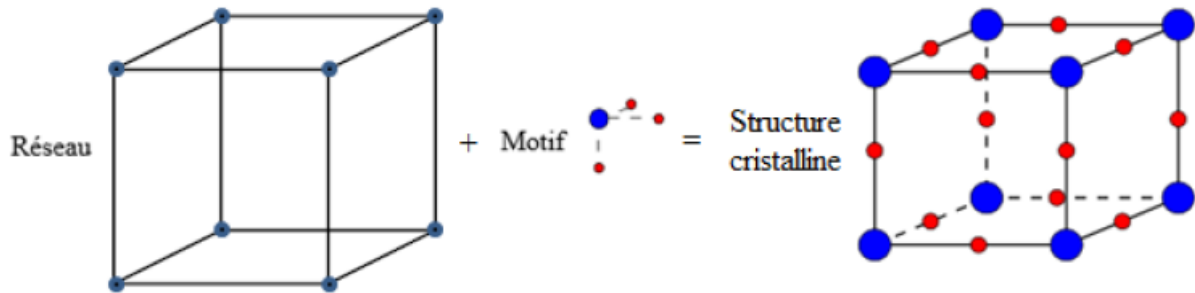
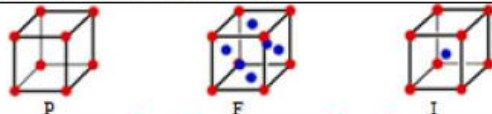

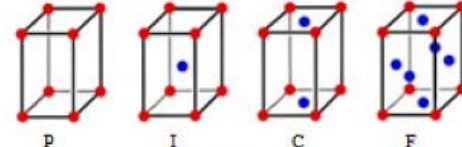
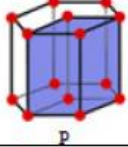
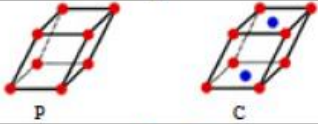
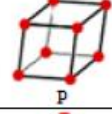



Figure I.20. Structure cristalline tridimensionnelle

I.4.4. Réseaux de Bravais

Le nombre de systèmes cristallins possibles est montré par Auguste Bravais (1848), qu'il était très limité. Il a classé 14 types de réseaux qui sont groupés dans 7 systèmes cristallins. (tableau I.2).

Tableau I. 2. Les sept systèmes cristallins de Bravais

Les 14 réseaux cristallins de Bravais	
Système cubique $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a=b=c$	
Système tétragonal $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a=b\neq c$	
Système orthorhombique $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a\neq b\neq c$	
Système hexagonal $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$ $a=b\neq c$	
Système monoclinique $\alpha=\gamma=90^\circ, \beta\neq 120^\circ$ $a\neq b\neq c$	
Système triclinique $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$ $a\neq b\neq c$	
Système rhomboédrique $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ $a=b=c$	

➤ **Système cubique :**

- ✓ Réseau cubique simple (P) : atomes présents uniquement aux points du réseau.
- ✓ Réseau cubique centré (I) : il y a un atome supplémentaire au centre du cube.
- ✓ Réseau cubique faces centrées (F) : chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

➤ **Système hexagonal :** le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique (P).

➤ **Système orthorhombique :** simple (P), à 2 faces centrées (C), à faces centrées (F), à prismes centrés (I).

➤ **Système monoclinique :** simple (P), à faces centrées (F).

➤ **Système rhomboédrique :** 1 seul réseau (P).

➤ **Système tétragonal (quadratique) :** simple (P), centré (I).

➤ **Système triclinique :** 1 seul réseau (P).

I.4.5. Plans et directions cristallographiques

Pour une structure cubique, du fait de la périodicité du réseau, on peut repérer tout atome du réseau cristallin à l'aide d'indices entiers (x, y et z), et tout plan du réseau cristallin par des indices entiers (indices de Miller), notés généralement $(h k l)$ pour les plans et $[uvw]$ pour les directions.

➤ Méthode pour désigner un plan

1. Dessiner un plan dans la maille élémentaire qui ne passe pas par l'origine ;
2. Exprimer les coordonnées des points d'intersection du plan avec les 3 axes dans la base (a, b, c) ;
3. Prendre l'inverse de ces coordonnées (uniquement pour les plans) ;
4. Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
5. Noter le plan de la façon suivante (hkl) (indices de Miller du plan). Exemple : (Figure I.21.)

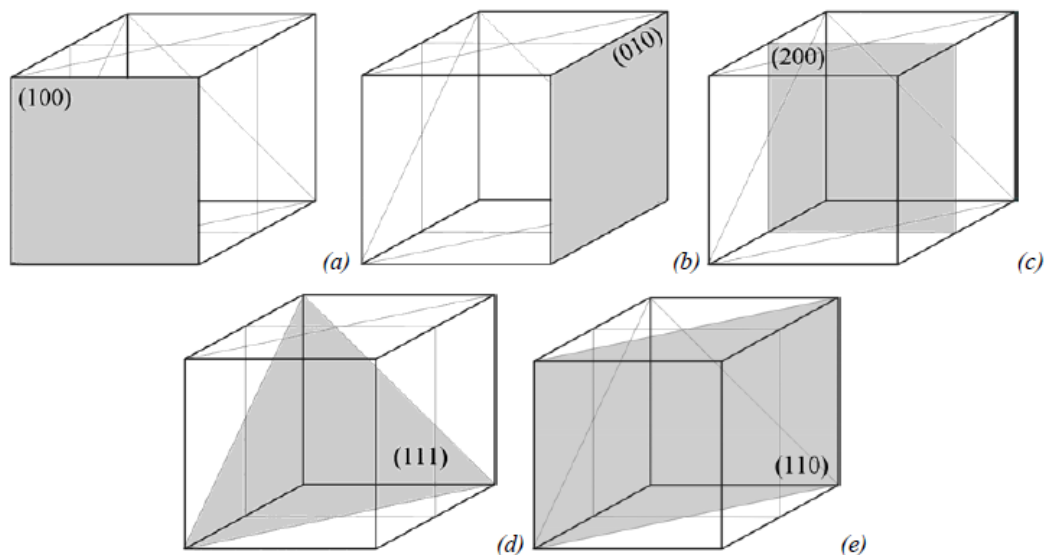


Figure I.21. Exemples des indices de Miller pour les plans

➤ Méthode pour désigner une direction

1. Tracer dans la maille élémentaire un vecteur parallèle à la direction et passant par l'origine ;
2. Projeter le vecteur sur les axes et exprimer ses coordonnées dans la base (a, b, c) ;
3. Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
4. Noter la direction de la façon suivante : $[uvw]$ (indices de Miller de la direction).

Exemples : (Figure I.22.)

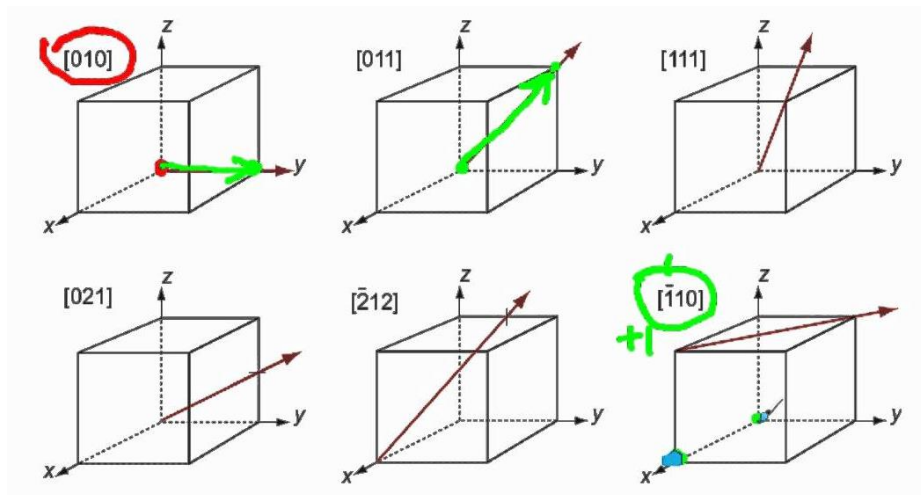


Figure I.22. Exemples des indices de Miller pour les directions

➤ Coordination

La coordination (ou coordinance) d'un atome est le nombre d'atomes voisins les plus proches dans les trois directions de l'espace. Elle s'appelle aussi le nombre de coordination ou l'indice de coordination.

Exemple :

Coordination du cristal de polonium : Pour le polonium la coordination Po/Po vaut 6 (Figure I.23.).

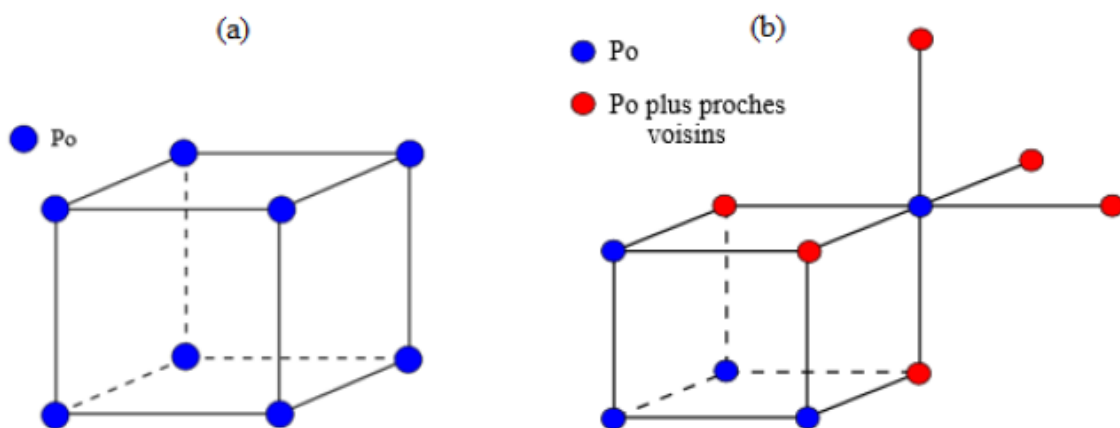


Figure I.23. (a) Cristal de Polonium. (b) Coordination du Polonium.

➤ Compacité (densité d'empilement)

En cristallographie, les constituants du cristal (ions, atomes, molécules...) sont considérés comme des « sphères dures rigides et indéformables ». Donc on cherche le meilleur moyen d'empiler ces

sphères. C'est-à-dire comment les disposer de sorte à en placer un maximum de sphères, dans un espace minimum.

La compacité " C " d'un cristal est le volume occupé par les atomes du motif dans la maille sur le volume de la maille (elle est donc toujours inférieure à 1). La compacité est donnée par la relation :

$$C = \frac{\text{volume occupé par les atomes}}{\text{volume de la maille}} \quad (3)$$

Exemple :

$$V_{\text{maille}} = a^3 V_{\text{motif}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (4)$$

Chpitre II. Diagrammes d'équilibre

Objectifs du chapitre

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Reconstruire et interpréter les courbes de refroidissement des corps pur et des alliages ;
- Examiner un diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles ;
- Examiner un diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles et extraire le point eutectique et le point péritectique.

II.1. Cristallisation de matériaux

II.1.1. Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement

Les diagrammes d'équilibre (autrement dit les diagrammes de phases) sont des représentations graphiques qui résument les constituants d'équilibre d'un système d'alliage, de présenter pour un mélange donné, les phases en présence, en équilibre les unes avec les autres, en accord avec les lois de la thermodynamique.

Pour construire un tel système il faut lier un nombre de composants indépendants (C) qui vont permettre la formation d'un nombre de phases (ϕ). Dans Les diagrammes de phases figurent les zones d'existence des phases dans un repère température - composition. Comme ils montrent aussi des domaines hétérogènes constitués par des mélanges de phases (domaine liquide, solide, liquide + solide)

- Les facteurs physiques influençant sur la nature et la composition des phases en présence sont
 - ✓ La température qui a un rôle particulièrement important lors de la coulée et la solidification des alliages ce qui entraine des modifications de leur propriétés mécaniques ;
 - ✓ la pression qui est généralement négligée car elle n'a d'influence qu'à des niveaux beaucoup élevés.

On peut trouver deux types de transformations dans les diagrammes de phases. Les transformations liquide-solide donne les diagrammes de solidification et les transformations solide-solide permet de prévoir les propriétés d'un alliage après traitement thermique.

➤ Définitions

- ✓ **Une phase est** un domaine du matériau dont les propriétés physiques et chimiques sont uniformes, c'est l'état sous lequel on trouvera un composant A ou un mélange de composants (A + B). Une phase peut être gazeuse, liquide ou solide. Cette région ou cet ensemble de régions sont caractérisés par une structure et par un arrangement atomique identique.

✓ **Un composant** est un corps pur. Il peut être simple (exemples : Ti, Ag, Cu...) ou être un composé chimique (H_2O , Al_2O_3 , SiO_2 ...).

Un composant peut être présent dans différentes phases, comme un glaçon dans de l'eau liquide, c'est-à-dire se trouve en même temps à l'état liquide et à l'état solide. Deux composants mélangés peuvent ne former qu'une seule phase, comme l'eau et l'alcool. S'ils peuvent se mélanger quel que soit le dosage, on dit qu'ils sont totalement miscibles. S'ils ne se mélangent pas, comme l'eau et l'huile, ils forment alors deux phases, distinctes et sont dits non miscibles. Certains métaux ne sont pas miscibles, par exemple le germanium et l'aluminium, pour lesquels, dès le stade de la fusion, les deux phases se retrouvent totalement séparées.

✓ **Solidification** le refroidissement d'un métal ou un alliage en fusion jusqu'à température ambiante entraîne une solidification. Le passage de la phase liquide à la phase solide s'appelle un changement de phase.

La cristallisation (Phénomène de germination et croissance) commence par la formation de germes et se poursuit avec le développement et l'augmentation de leur nombre jusqu'à la solidification totale (figure II.1).

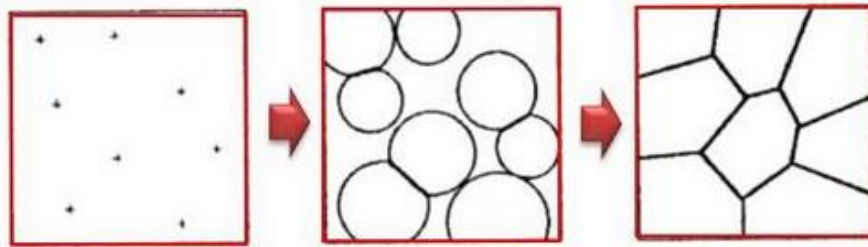


Figure II.1. Représentation schématique de la de germination et croissance

Pour étudier la cristallisation d'un matériau, on le met en fusion, puis on le place à l'état liquide dans un creuset, enfermé dans une enceinte isotherme, afin de limiter la vitesse de refroidissement. La température à l'intérieur du creuset est mesurée à l'aide d'un thermocouple qui est relié à un enregistreur, ce dernier permet de tracer la courbe de refroidissement $T = f(t)$ (Figure II.2.)

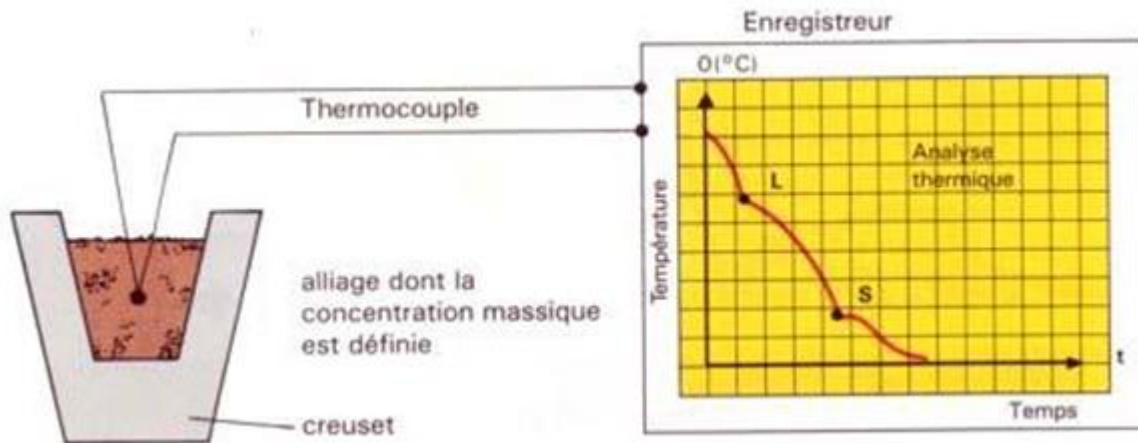


Figure II.2. Méthode de détermination des courbes de refroidissement

✓ **courbe de refroidissement** (figure II.3) est une courbe qui représente le changement de l'état du matériau, généralement d'un gaz à un solide ou d'un liquide à un solide. La variable indépendante (axe des abscisses) est le temps et la variable dépendante (axe des ordonnées) est la température. Cette courbe détermine variation de température, dans une fourchette de temps, jusqu'à atteindre la température ambiante.

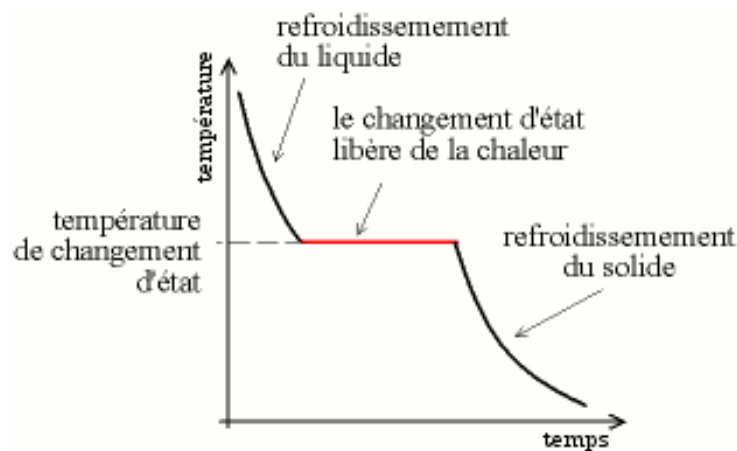


Figure II.3. Courbe de refroidissement

➤ Remarques

Les diagrammes de phases binaires sont les diagrammes les plus simples à établir. Les courbes du diagramme de phases déterminent :

1. les limites de domaines dans lesquels peuvent exister des phases ;
2. la composition chimique ;
3. les proportions de ces différentes phases.

➤ Notion de variance

La variance d'un système est le nombre de facteurs que l'on peut faire varier indépendamment les uns des autres sans provoquer la rupture de l'équilibre.

La Variance d'un système est déterminée par :

$$V = c + 2 - \varphi \quad (5)$$

V : La Variance

C : Le nombre de constituant indépendant

2: Le nombre de variables intensives T et P

φ : Le nombre de phase

Pour ce qui est des phases liquides et solides, la pression n'a que peu d'influence et peut être négligée ce qui permet d'étudier sous un diagramme 2D (l'effet de la température et de la composition).

$$V = c + 1 - \varphi \quad (6)$$

1 : variable intensive (T)

II.1.2. Cristallisation d'un métal pur

Pour un métal, en fusion est refroidi, sous pression constante (pression atmosphérique par exemple), le changement de phase s'effectue toujours à une température fixe (point de fusion), c'est-à-dire la température reste constante pendant toute la durée de solidification. Les deux phases liquide et solide co-existent au niveau de ce point de fusion.

Ce point de fusion est déterminé en enregistrant la courbe de refroidissement (température en fonction du temps). La cristallisation étant un phénomène exothermique, au passage par le point de fusion, la chaleur perdue par le refroidissement du matériau est temporairement compensée, ce que montre la figure II. 4. Ce palier isotherme est d'autant plus marqué que le refroidissement est lent et que la masse de matériau est plus grande.

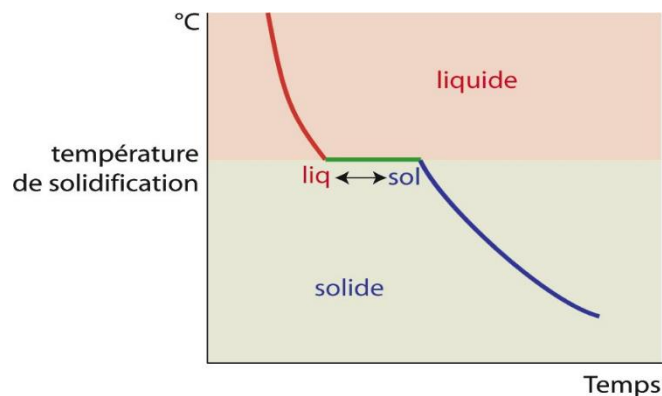


Figure II.4. Courbe de refroidissement d'un métal pur

La cristallisation des métaux à l'état pur, ne se fait que difficilement. Elle s'amorce en dessous de la température de fusion T_f voir (fig. 93). On dit que le métal est en "surfusion".

La surfusion est l'état d'un matériau qui reste en phase liquide alors que sa température est plus basse que son point de solidification. C'est un état dit métastable, c'est-à-dire qu'une petite perturbation existe pour déclencher brusquement le changement vers la phase solide.

Le niveau de surfusion est faible, lorsque le refroidissement est très lent, dans ce cas, la cristallisation se produit à une température voisine de celle de l'état d'équilibre. Le degré de surfusion (ΔT) est déterminé en fonction de la nature et la pureté du métal.

Généralement $\Delta T = (10 \text{ à } 30^\circ\text{C})$, sauf pour les métaux très purs, par exemple $\Delta T(\text{Sn}) = 118^\circ\text{C}$ et $\Delta T(\text{Sb}) = 135^\circ\text{C}$.

La figure II.5. représente une courbe de refroidissement d'un système mono-constituant pur.

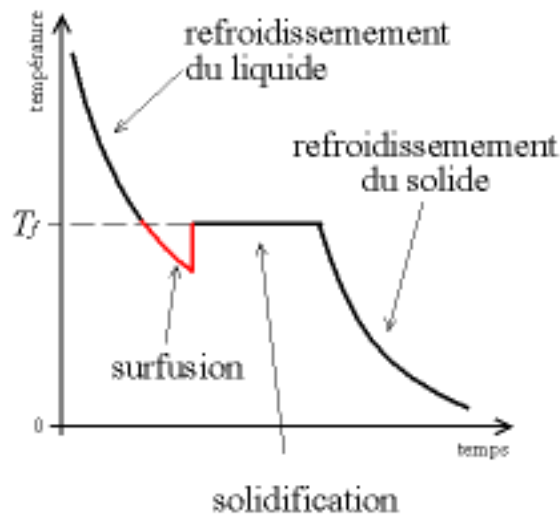


Figure II.5. Courbe de refroidissement d'un métal pur avec surfusion

Le diagramme de phase d'un corps pur dont le diagramme d'équilibre est présenté dans la figure II.6. C'est le cas où il n'y a pas de variables de composition. Les seules variables sont la température T et la pression P . En général, on met en abscisse la température T et en ordonnée la pression P .

Dans les cas de ce type de diagramme, les trois branches du diagramme délimitent les trois états du corps correspondant :

- Un état gazeux dans la zone haute température, basse pression ;
- Un état solide dans la zone basse température, haute pression ;
- Un état liquide dans la zone haute température, haute pression.

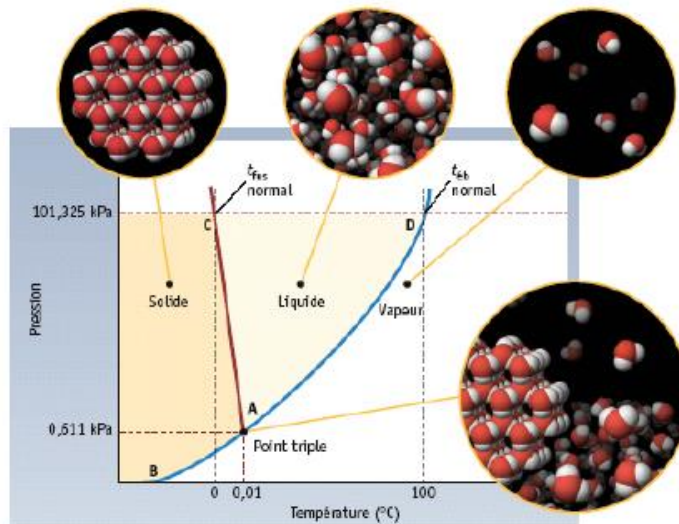


Figure II.6. Diagramme d'équilibre d'un corps pur

Dans la figure II.7. suivante on présente comme exemple le diagramme d'équilibre de l'eau.

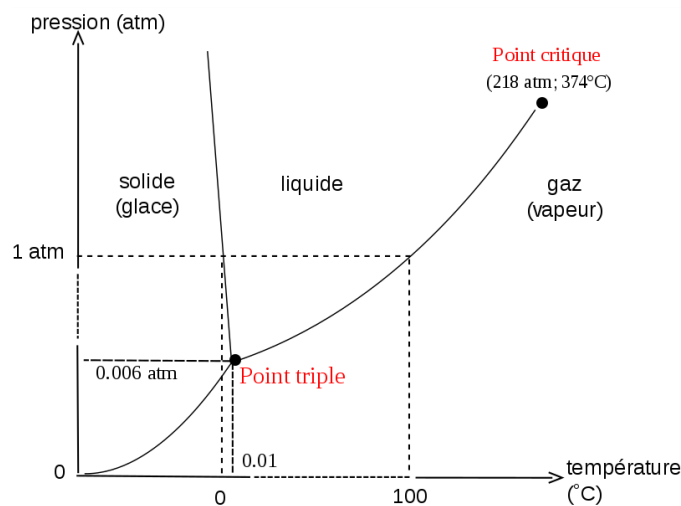


Figure II.7. Diagramme d'équilibre de l'eau

II.1.3. Cristallisation d'un alliage

Un alliage, est un mélange homogène de deux métaux A et B. A l'état liquide, la solubilité de la majorité des métaux qui forment une solution liquide monophasée est illimitée. Le fer et le plomb sont des métaux presque non miscibles l'un dans l'autre à l'état liquides, se séparent en fonction de leur densité en deux couches.

La cristallisation d'un alliage ne se poursuit que pendant la surfusion et de formation de germes stables (aptes à la croissance). La composition des phases d'un alliage dépend de celle de la solution liquide mère. C'est pourquoi les fluctuations structurales et énergétiques d'un alliage ne suffisent pas pour produire un germe stable.

La solidification d'un alliage exige en plus, des fluctuations de concentrations, il s'agit des écarts momentanés de la composition chimique, de petits volumes isolés par rapport à sa composition moyenne. L'origine des fluctuations est, sans doute, liée à la migration des atomes par diffusion, suite à l'agitation thermique de la solution liquide.

Les alliages sont obtenus par fusion, de deux ou plusieurs éléments. C'est à dire l'addition à un métal pur, un ou de plusieurs éléments, métalliques ou non. Ces éléments peuvent modifier profondément ses propriétés. Les substances qui forment les alliages sont appelées : "composants". Selon le nombre de composants, un alliage peut être :

- Binaire (2 composants).
- Ternaire (3 composants).
- Quaternaire (4 composants), etc.

Pour avoir un alliage, des proportions bien définies de ces constituants différents sont fondues et mélangées, puis l'ensemble est refroidi. Le résultat du mélange varie selon les variations relatives de taille des atomes, selon le type de maille d'origine et des propriétés électroniques des différents constituants.

Pendant l'étude les alliages, les courbes de solidification deviennent beaucoup plus complexes. Elles comportent alors plusieurs sections de courbes raccordées par des points d'inflexion (figure II.7). Des fois, elles comportent des paliers de solidification isotherme. Chaque point d'inflexion correspond à une variation du nombre de phases. Ainsi, entre deux points d'inflexion successifs, l'alliage comporte le même nombre de phases.

Le point d'inflexion le plus élevé correspond à l'apparition d'un premier cristal dans l'alliage en fusion, le point d'inflexion le plus bas correspond à la solidification des dernières traces d'alliage en fusion. L'analyse thermique dans ce cas, permet de suivre la solidification d'un alliage de l'état liquide à l'état solide.

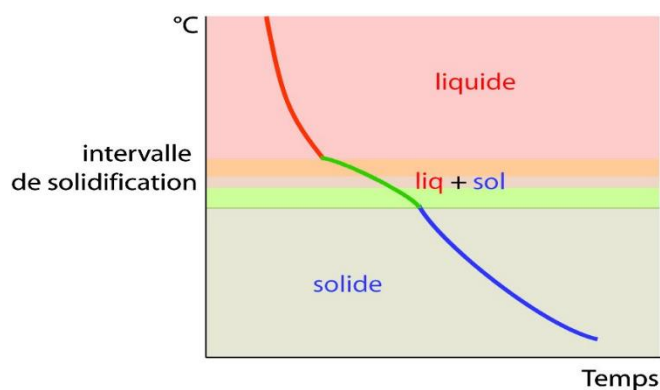


Figure II.7. Exemple de courbe de refroidissement d'un alliage de composition AB

II.2. Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles

À l'état solide, il est très rare que deux métaux soient solubles en toute proportion puisque l'admission d'un atome étranger dans le réseau d'un métal provoque des perturbations.

Dans ce type d'alliage le métal pur se solidifie à une température déterminée, donc les deux éléments forment des solutions solides de même structure cristalline, les paramètres de Maille sont proches.

Dans ce cas on a :

- Les éléments pur cristallisent dans le même réseau ;
- Ont des rayons atomiques proches (écart inférieur à 15 %) ;
- Ont des propriétés physiques et chimiques proches, en particulier des électronégativités (capacité à attirer les électrons) proches.

Au contraire, un alliage possède un intervalle de solidification dont la grandeur dépend de sa composition. A une température T comprise dans cet intervalle, il y a donc deux phases en présence dans l'alliage, une solution liquide et une solution solide.

Dans ce type de diagramme (Figure II.8), les points représentatifs de ces deux phases liquide et solide, décrivent donc deux courbes s'appellent liquidus et solidus. Les lignes liquidus et solidus délimitent dans ce diagramme trois domaines :

Dans le domaine I (liquide), et aux températures supérieures à la ligne liquidus, se présente uniquement une phase qui est le liquide homogène.

Dans le domaine II (liquide + solide), entre le liquidus et le solidus, existent le liquide et les cristaux mixtes comme phase thermodynamiquement stable.

Dans le domaine III (solide), au-dessous de la ligne solidus, où se trouve seulement une phase solide, les cristaux mixtes de substitution dont les paramètres du réseau sont linéaires et dont le composant A pur peut passer dans le composant B pur.

Pour un système homogène, donc le diagramme d'équilibre permet, non seulement, de définir le nombre et type de phases existant pour les différentes températures et concentration mais aussi de déterminer les quantités de ces phases dans la structure. La miscibilité totale des deux composantes à l'état solide et liquide présente un cas limite de la formation d'alliages. Ce type de diagramme est appelé diagramme à un fuseau.

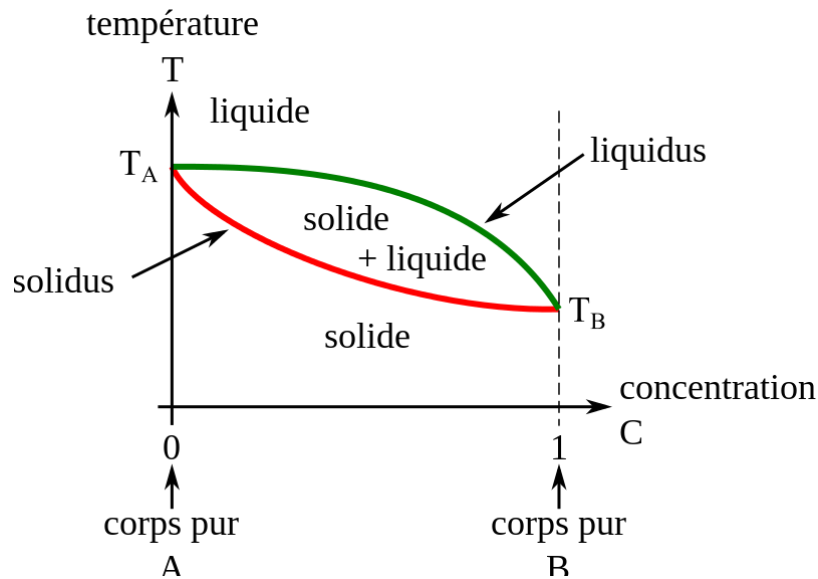


Figure II.8. Schématisation d'un diagramme de phase de deux corps complètement miscibles

Pour construire le diagramme de phase d'un alliage binaire A-B (exemple Cu-Ni figure II.9), il suffit d'enregistrer les courbes de refroidissement pour chaque concentration de B dans A en partant de A, métal pur jusqu'à B, métal pur. Le type de ce diagramme est représenté sur la figure II.10 (exemple Cu-Ni) avec la courbe de refroidissement et structure de la miscibilité des composants A et B.

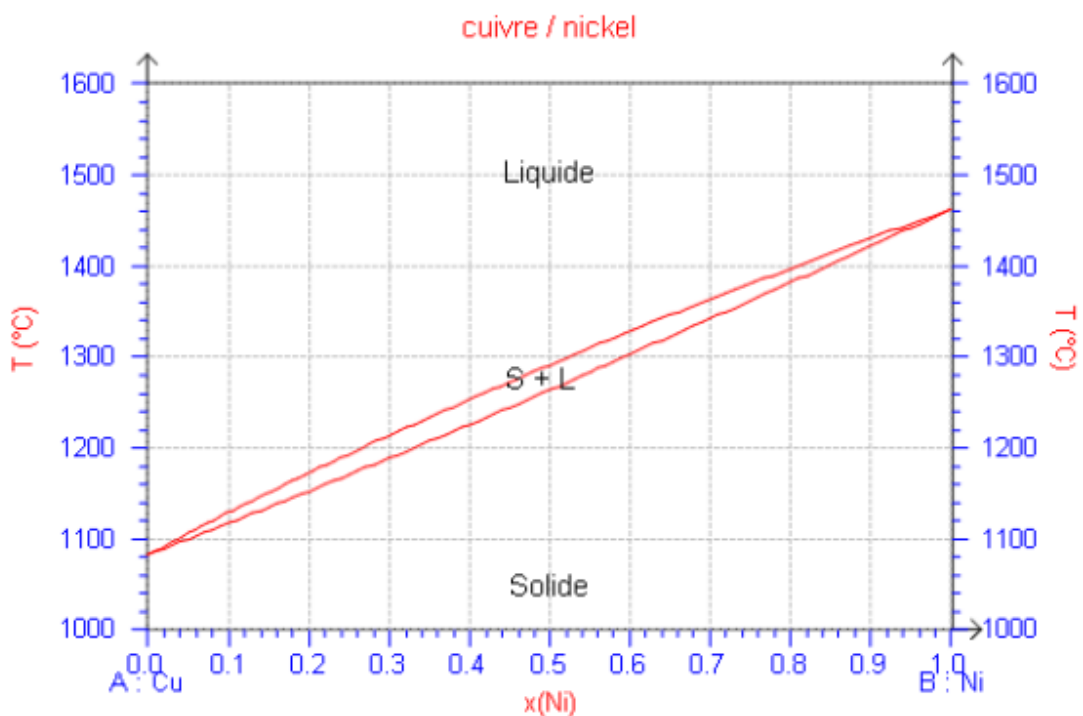


Figure II.9. Exemple de du diagramme de phase de l'alliage Cu-Ni

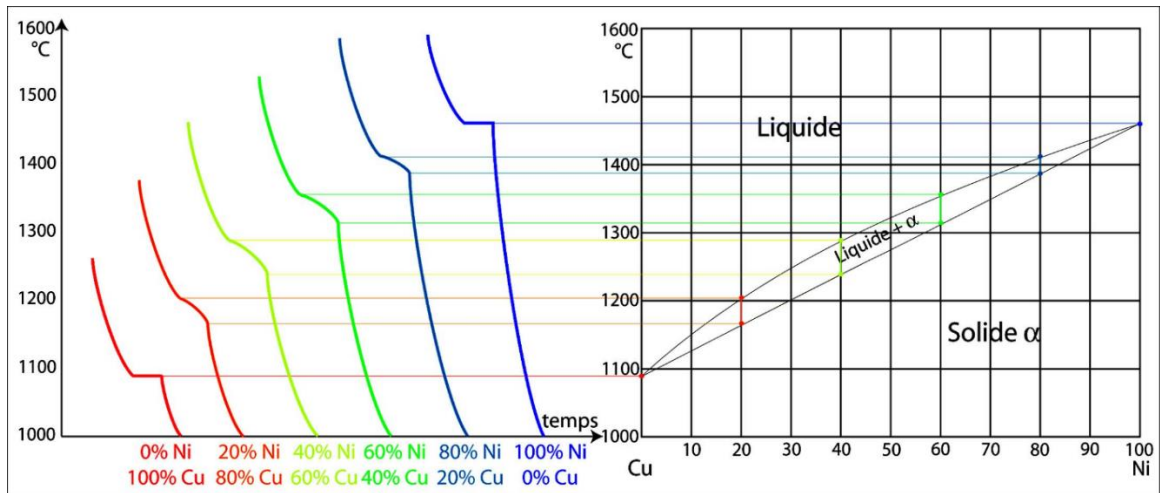


Figure II.10. Exemple de construction du diagramme de phase de l'alliage Cu-Ni

Chaque point du diagramme correspond à un alliage dont la composition est donnée par la projection orthogonale du point sur l'axe des abscisses.

La courbe de refroidissement du cuivre avec un palier à 1084°C et la courbe de refroidissement du nickel avec un palier à 1453°C. Entre ces deux extrêmes, les alliages à différentes concentrations présentent un intervalle de solidification non isotherme. De 0% de nickel à 100% de nickel, les points d'inflexion supérieurs qui correspondent au début de la solidification forment une courbe appelée liquidus, les points d'inflexion inférieurs qui correspondent à la solidification totale forment une courbe appelée solidus.

Règles de miscibilité totale à l'état solide

En général, pour que deux éléments A et B puissent être complètement miscibles à l'état solide, les quatre conditions suivantes doivent être remplies :

- Le diamètre atomique des éléments A et B ne doit pas différer de plus de 15% ;
- Les deux éléments A et B doivent avoir la même structure cristalline ;
- Les valences des deux éléments doivent être égales ;
- L'électronégativité de A et celle de B doivent être semblables.

Si l'une des règles énoncées n'est pas respectée, on parle de miscibilité partielle à l'état solide entre A et B. En effet, l'addition d'atomes de B dans des atomes de A, ou réciproquement, entraîne une distorsion du réseau des atomes A et une augmentation de l'énergie interne du système. Les lois de la thermodynamique conduisent alors le mélange à se séparer en deux phases l'une riche en A, l'autre riche en B ou à former des composés intermédiaires définis de type A_xB_y .

II.3. Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles

Dans ce type de diagrammes, on rencontre deux courbes de différentes enthalpie libre pour l'état solide correspond à deux solution solide α et β . Les alliages binaires c'est certainement le cas le plus fréquent. Il existe deux types de transformations correspond à deux types de diagrammes d'équilibre des solutions limitées en fonction de la position de la température du point triple, par rapport aux températures de fusion des constituants purs : les diagrammes avec point eutectique et les diagrammes avec point péritectique. Dans la majorité de ces alliages, il n'existe pas de miscibilité des constituants en toutes proportions à l'état solide. Dans le cas le cas le plus fréquent, ils existent deux solutions solides :

α : Solution solide primaire de B dans A (riche en A)

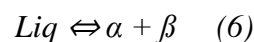
β : Solution solide primaire de A dans B (riche en B)

II.3.1. Diagrammes avec point eutectique

Il existe dans ce type de diagramme, un point fixe dont la température est inférieure à celle de fusion des deux constituants. Les deux fuseaux de solidifications se rencontrent dans la zone centrale du diagramme en faisant apparaître un point d'équilibre invariant entre une phase liquide commune et deux phases appartenant respectivement aux deux solutions solides.

Parmi les avantages de ces alliages eutectiques est de pouvoir être utilisé en assemblage par soudure. L'exemple présenté ici est l'alliage binaire argent-cuivre (figure II.11.). Les températures de fusion de l'argent et du cuivre purs sont respectivement de 962°C et de 1083°C. À 779°C, la solubilité du cuivre dans l'argent est de 8,8% massique et la solubilité de l'argent dans le cuivre est de 8% massique. Pour les alliages compris entre ces deux intervalles, l'ensemble des courbes de refroidissement présente un palier isotherme dont la longueur maximale se situe au point eutectique (point E situé à 779°C avec 60,1% d'argent et 39,9% de cuivre).

Au niveau du point eutectique E, l'équilibre s'établit entre trois phases : une phase liquide d'une part, et deux phases solides d'autre part. À ce point, un liquide se transforme simultanément en deux phases solides :



Les alliages situés à gauche du point eutectique s'appellent des alliages hypo-eutectiques et ceux situés à la droite des alliages hyper-eutectiques. Cette appellation est purement conventionnelle et dépend évidemment de l'orientation du diagramme de phase.

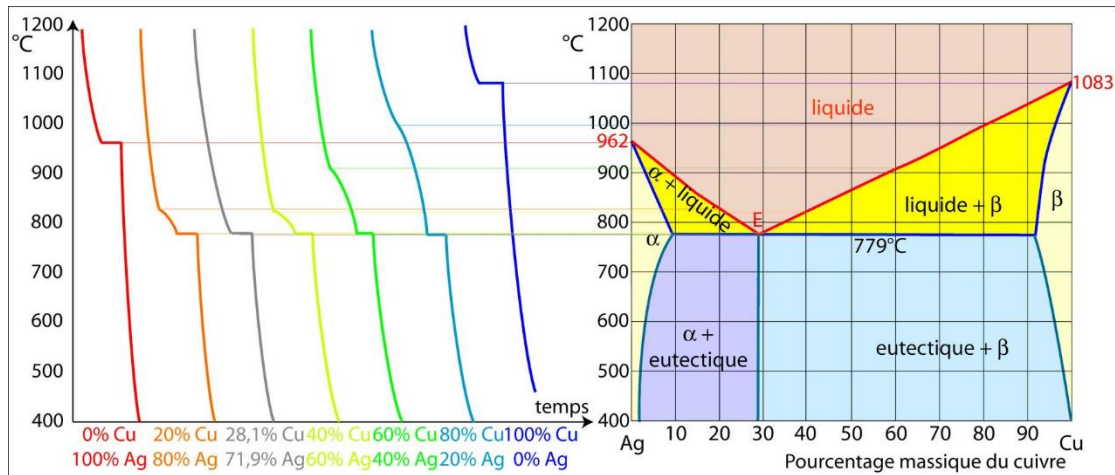
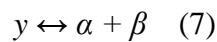


Figure II.11. Construction d'un diagramme de phases avec point eutectique

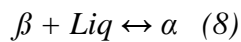
Remarque

Pour les diagrammes avec point eutectoïde, Le mécanisme de la transformation eutectoïde ressemble beaucoup à la transformation eutectique, mais au cours de cette transformation, une phase solide qui se transforme simultanément en deux nouvelles phases solides.



II.3.2. Diagrammes avec point péritectique

Dans une transformation péritectique, la température de l'équilibre péritectique est comprise entre les températures de fusion des deux constituants du système. Cette caractéristique résulte de l'influence différente des constituants sur la fusion des solutions solides qu'ils forment. Une phase liquide et une phase solide se transforment en une seule phase solide de composition définie. Le point péritectique (point P, figure II.12) est invariant, à température fixe avec un équilibre entre les trois phases.



La partie supérieure du diagramme de phases de l'alliage argent platine (figure II.12) illustre l'aspect typique d'une transformation du type péritectique. Le point péritectique se situe à 1185°C pour une composition de 55% m de platine et 45% m d'argent.

À cette composition, juste au-dessus de 1185°C coexistent deux phases, une phase β solide de composition $C_\beta = 86\% \text{ Pt}$ et une phase liquide de composition $C_l = 32\% \text{ Pt}$. À 1185°C, ces deux phases se transforment brutalement en une seule phase solide α de composition

$C_\alpha = 55\% \text{ Pt}$

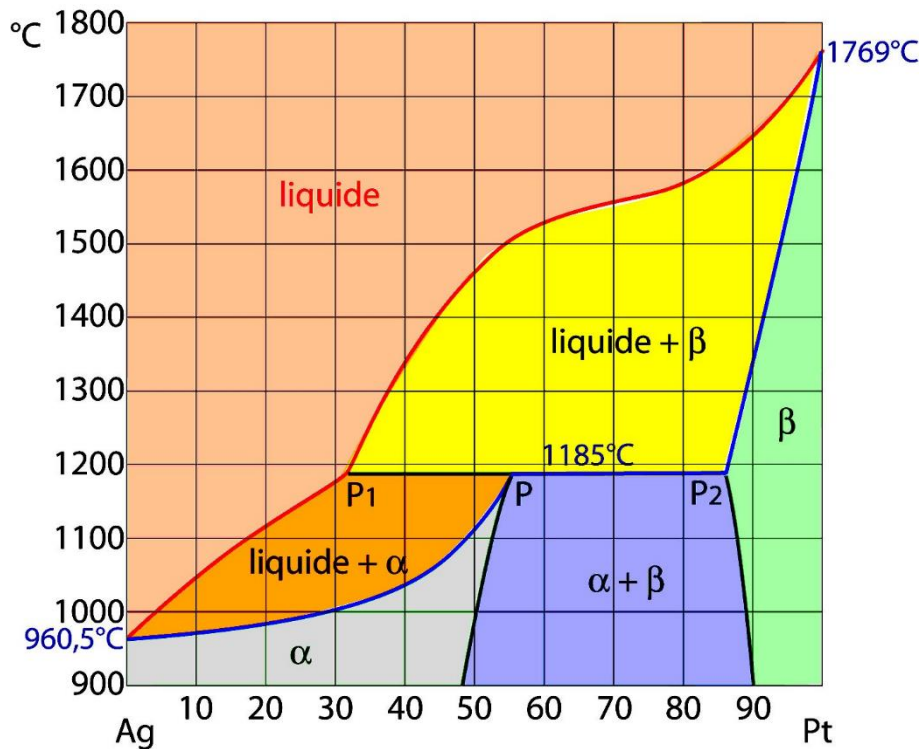


Figure II.12. Diagramme de phase péricectique de l'alliage Ag-Pt

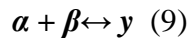
Les alliages dont la composition est inférieure à celle de P1 (32% Pt) et ceux dont la composition est supérieure à P2 (86% Pt) se comportent comme des solutions solides à un seul fuseau.

Les alliages dont la composition est comprise entre P1 et P vont voir apparaître dans un premier temps dans la phase liquide, une phase β dont la composition va évoluer progressivement jusqu'à la concentration en P2 (86% Pt). Lorsque la température péricectique est atteinte, il se produit une transformation isotherme de ce solide β (86% Pt) en solide α (55% Pt). Après cette transformation, il subsiste encore une phase liquide. La solidification va se poursuivre en évoluant vers une phase α unique.

Les alliages dont la composition est comprise entre P et P2 débutent de façon identique aux précédents, mais lorsque la température péricectique est atteinte, une partie de la phase β va disparaître, combinée avec le liquide pour former la phase α . Cependant la quantité de liquide n'est pas suffisante pour faire disparaître la totalité de la phase β . Celle-ci va coexister avec la phase α et donnera donc un alliage biphasé.

Remarque

Pour les diagrammes avec point péricectoïde, le mécanisme de la transformation péricectoïde est très ressemblant à la transformation péricectique, mais au cours de cette transformation solide, ce sont deux phases solides qui se transforment simultanément en une nouvelle phase solide.



Règles de phases

Les formes des diagrammes varient du plus simple (figure II.13) au plus compliqué. En réalité les diagrammes compliqués associent différentes transformations à l'état liquide (fuseau, eutectique, péritectique) ou à l'état solide (eutectoïde). Le système fer-carbone est un bon exemple de telles associations. Dans tous les cas on peut interpréter facilement les diagrammes en les subdivisant en éléments simples et en leur appliquant des règles de lecture également très simples :

➤ Règle de la verticale

Après refroidissement de l'alliage liquide au point P, en P3, sa composition est invariable. L'alliage est constitué d'un mélange de solutions solides α et β .

➤ Règle de l'horizontale

À une température donnée, il existe un équilibre entre les points homologues situés sur les frontières d'un domaine biphasé.

À la température T_1 on dit que le point L est en équilibre avec le point S, ce qui explique que pour la température considérée, dans la zone grise, il existe un mélange biphasé de liquide de composition (massique) L et de solide de composition S.

à la température T_2 on a un mélange biphasé de solution solide β (composition m) et de solution solide α (composition n).

➤ Règle des segments inverses

Étant donné que dans les zones grises, l'alliage est constitué d'un mélange de deux phases (pour un système binaire) bien identifiées, il est important de connaître les proportions (%massiques) de ces deux phases. Ces proportions dépendent de la composition initiale.

On a à :

$$T_1 : \% \text{ liquide} = \frac{100P_1S}{LS} \quad (10) ; \quad \% \text{ Solide} = \frac{100P_1L}{LS} \quad (11)$$

$$T_2 : \% \text{ Solide } \beta = \frac{100P_2N}{MN} \quad (12) ; \quad \% \text{ solide } \alpha = \frac{100P_2M}{MN} \quad (13)$$

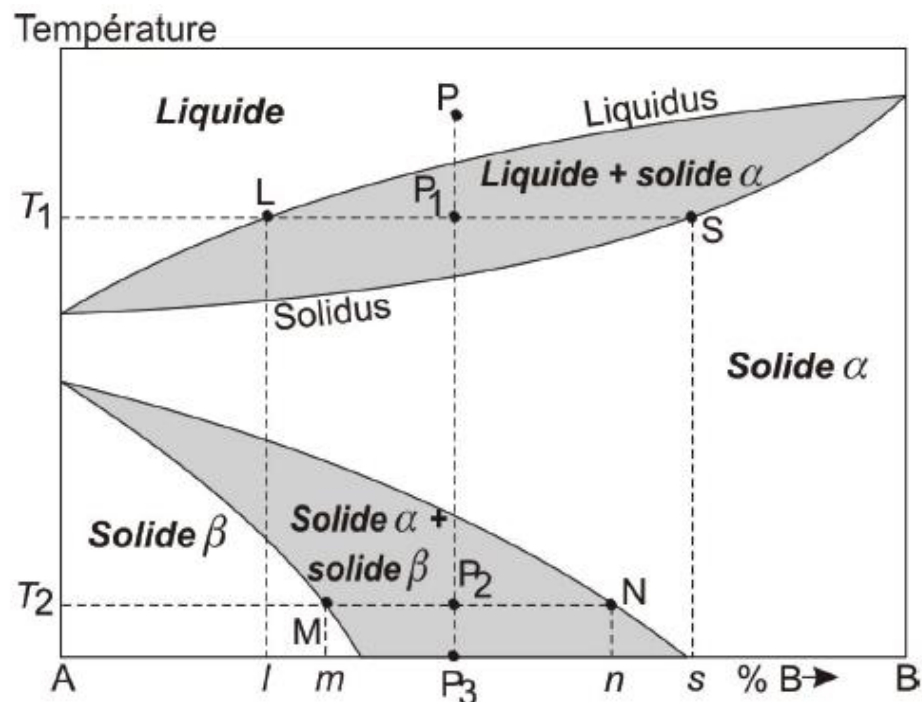


Figure I.13. Allure générale d'un diagramme binaire d'équilibre entre phases. Sauf indications particulières on utilise des pourcentages massiques.

Les diagrammes d'équilibre binaires sont simples à interpréter par rapport aux diagrammes de phase ternaires. Ils peuvent combiner parfois de nombreuses transformations à l'état liquide comme à l'état solide. Pour comprendre l'évolution des phases présentes, il est préférable de dissocier ces différentes transformations. Les diagrammes de phase ternaires permettent d'analyser le comportement au cours d'une solidification ou une fusion de ces alliages. La plupart des alliages commerciaux sont des alliages à plus de trois composants. La constitution, l'analyse et l'interprétation de ces alliages est beaucoup plus complexe.

Chapitre III : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

Objectifs du chapitre

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Connaître les caractéristiques du fer et du carbone ;
- Différencier entre les systèmes fer-graphite et fer-cémentite ;
- Expliquer les différentes phases des diagrammes ;
- Connaître la désignation normalisée des aciers et des fontes.

Le diagramme fer-carbone décrit les différents états du mélange fer et carbone selon la proportion de fer et de carbone dans le mélange. Généralement au-dessus de 2 % de carbone on parle de fontes et en dessous de cette teneur en carbone on parle d'acier. Les fontes sont des alliages Fer-Carbone, Ils s'agissent d'alliages contenant entre 2.11 et 6.67 % de carbone. Contrairement aux aciers, on ne peut pas obtenir d'austénitisation complète à haute température. Lors d'une coulée, il se forme de la cémentite ou du graphite. Le terme « fonte » est parfois utilisé pour désigner des objets moulés.

III.1. Caractéristiques du fer et du carbone

III.1.1. Caractéristiques du fer

Dans l'industrie, le fer est le métal de base le plus important pour l'obtention des alliages techniques. Le fer pur n'est pas employé à l'échelle industrielle, les alliages de fer avec le carbone (les fontes et les aciers) sont les plus employés.

Le fer pur est obtenu avec 99.9 % de fer, il contient toujours des teneurs de différents éléments. Le fer le plus pur est actuellement obtenu avec 99.999 % de fer. Le fer est de couleur blanche, il possède les caractéristiques suivantes :

- Rayon atomique 1.27 Å (CFC).
- Nombre atomique : 26.
- Masse atomique : 55.85.
- Masse volumique 7.8 g/cm³.
- Température de fusion 1539°C.

La dureté HB de fer est de de 60 kp/mm² et sa contrainte limite de traction est d'environ 20 kp/mm², il possède une limite d'élasticité très faible. Il est considéré comme un bon conducteur de chaleur et d'électricité sa résistivité électrique à 20°C est de 9.76.10⁻⁸ Ωm).

Il est très employé dans le domaine de l'électrotechnique à cause de sa grande perméabilité magnétique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande partie de sa pureté et des régimes de traitement thermiques appliqués.

Le fer présente deux formes allotropiques variées (deux réseaux cristallins différents), Le fer α dont le réseau est cubique centré (CC) et le fer γ dont le réseau est cubique à faces centrées (C.F.C).

Le phénomène du changement du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique (Figure III.1.)

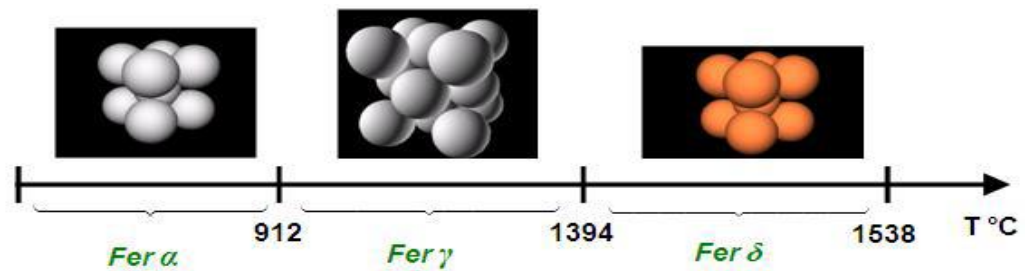


Figure III.1. Changement du réseau cristallin sous l'effet de la température

La courbe de refroidissement présentée dans la figure III.2 explique en détail les transformations allotropiques du fer pur :

- À des basses températures et jusqu'à 912°C (A3), ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : On l'appelle alors Fer α . Le fer α ne dissout pratiquement pas le carbone : 0.02 %C au maximum à 723°C, moins de 0.01%C à 300°C.
- À des températures supérieures à 912 °C et jusqu'à 1394°C (A4) le réseau cristallin est du type cubique à faces centrées (CFC) : on l'appelle Fer γ . Le fer γ dissout facilement le carbone : 0.8% C à 723°C, 2.14 %C à 1147°C.
- Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion à 1538°C, le fer retrouve la structure cubique centrée du Fer α : On l'appelle alors Fer δ . Il dissout un peu mieux le carbone que le Fer α (0.07% C au maximum à 1493°C).
- Jusqu'à 768°C (A2) point de Curie, le fer est ferromagnétique, au-delà il devient paramagnétique. Le caractère ferromagnétique se dit d'une substance qui peut prendre une forte aimantation.

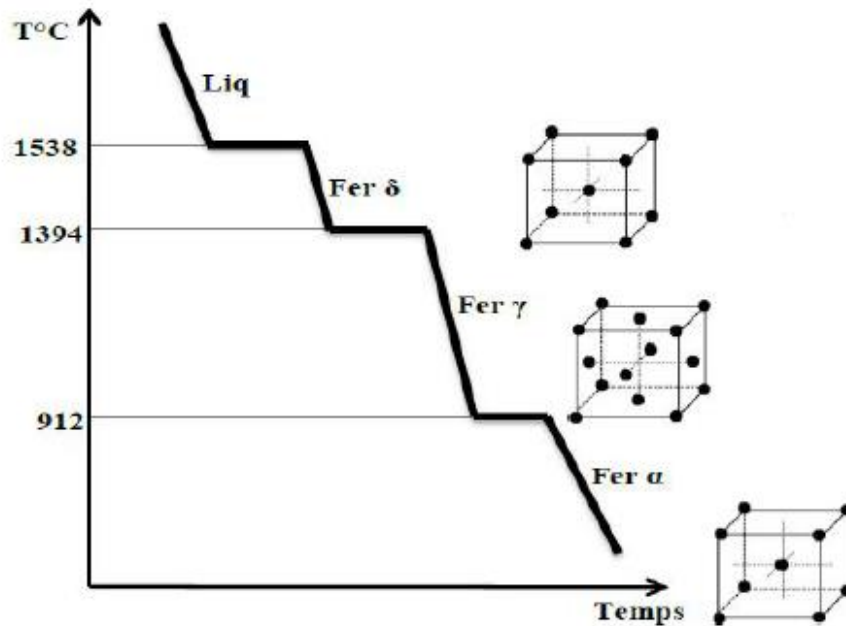


Figure III.4. Transformation allotropiques du fer pur

III.1.2. Caractéristiques du carbone

Le carbone est un élément non métallique très abondant, (0.1% en masse dans l'écorce terrestre). Il se trouve rarement à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille, etc.

C'est un élément polymorphe. Dans les conditions ordinaires, il se trouve sous la forme d'une variété de graphite, mais il peut exister également sous la forme d'une variété métastable de diamant. Le carbone est soluble dans le fer à l'état liquide et solide, mais peut aussi former une combinaison chimique, la cémentite Fe_3C .

Il possède les caractéristiques suivantes :

- Rayon atomique : 0,77 Å ;
- Numéro atomique : 6 ;
- Masse atomique : 12 ;
- Masse volumique : 2.5 g/cm³ ;
- Température de fusion : 3500°C.
- C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite.

Le diamant est une macromolécule métastable du type cristal covalent parce que tous ses atomes sont associés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Sa forme cristalline est cubique à face centrées.

- La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique.
- Le graphite a une structure lamellaire qui très facilement clivable. Il est formé de molécules géantes planes ayant des atomes placés aux nœuds d'un réseau hexagonal régulier.
- C'est un matériau réfractaire qui relativement bon conducteur d'électricité. On l'utilise à l'état de poudre pour mines de crayon.
- Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe_3C appelée cémentite. ou carbone de fer. (HB = 800kp/mm²).

III.1.3. Les différentes phases du système Fer-Carbone

➤ La ferrite α

Est une Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , existe en dessous de 906°C, se cristallise dans le système cubique centré, le côté du cube élémentaire mesure 2.87×10^{-8} cm à la température 20°C. (Solubilité maximale : 0.02% C à 723 0C). Elle est relativement tendre (HB≈80), peu tenace (R≈300 MPa), mais très ductile (A≈35%). Ferromagnétique jusqu'à 768°C, entre 768 et 906°C le fer α n'est plus ferromagnétique.

➤ La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC, le côté de sa maille mesure 2.93×10^{-8} cm. Le fer δ existe de 1401°C jusqu'à la température de fusion 1528°C. Il est amagnétique et dissout un peu mieux le carbone (0.07% au maximum à 1487°C) que le fer α .

➤ L'austénite γ

Est une Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , existe entre 906 et 1401 °C, à structure cubique à face centrée, le côté du cube élémentaire mesure 3.63×10^{-8} cm à 1100°C. , le carbone et dont la solubilité croît de 0.85% de carbone à 721°C jusqu'à 1.7% à 1145°C puis décroît jusqu'à 0.17% à 1487°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile. Le fer γ est amagnétique, dissout facilement, il est plus dense et plus dilatable que le fer α .

➤ La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure (HB≈200), résistante (Rm≈850 MPa) et assez ductile (A%≈10).

➤ La lédéburite

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec 4.3 % de carbone à la température eutectique.

➤ La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini. Sa décomposition égale à 6.67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

➤ Le graphite

Le graphite présent dans toutes les fontes grises est une variété cristallisée du carbone. Les lamelles, nodules ou sphères de graphite sont des empilements d'atomes de carbone disposés sur des mailles hexagonales. Le graphite est un corps très stable qui ne se dissocie qu'à 3650 °C par sublimation. En conséquence, aucun traitement thermique ne peut altérer les plages de graphite.

Le tableau III.1 ci-après, résume les caractéristiques des principales phases :

Tableau III.1. Caractéristiques des principales phases

Phase	Réseau Cristallin	Constante du Réseau en mm	Domaine D'existence	Solubilité Maximale	Désignation structure
$Fe\delta$	CC	$a = 29,3$ - $T = 1425^\circ C$	$1536 > T > 1392^\circ C$	$0,10\% - T = 1493^\circ C$	δ -Ferrite
$Fe\gamma$	C.F.C	$a = 36,4$ - $T = 1100^\circ C$	$1392 > T > 911^\circ C$	$2,06\% - T = 1147^\circ C$	Austénite
$Fe\alpha$	CC	$a = 28,66$ - $T = 20^\circ C$	$T < 911^\circ C$	$0,02\% - T = 723^\circ C$	Ferrite
Fe_3C	Rhombodrique	$a = 45,15$ $b = 50,84$ - $T = 20^\circ C$ $c = 67,30$	$T < 1330^\circ C$		Cémentite

Diagramme stable-diagramme métastable

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :

➤ La première produit une phase riche en carbone de formule Fe_3C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit métastable ou à cémentite.

➤ La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur C_{gr} , qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite.

Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres, le diagramme d'équilibre métastable Fe- Fe_3C (cémentite) et le diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

III.2. Diagramme d'équilibre Fer-Cémentite

C'est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable (figure III.5.) représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite (Fe_3C). Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008% C et 2% C) et les fontes (de 2% C à 6.67% C).

Pour chaque température et pour chaque teneur en carbone, ce diagramme indique la nature des phases et des constituants de l'alliage considéré, mais ne renseigne en rien sur la répartition de ces constituants c'est à dire sur la structure micrographique.

Pour des températures élevées, la cémentite se décompose en fer et en carbone et c'est la cause qui ne laisse pas connaître la température de fusion de la cémentite, on considère sa température de fusion à environ 1392°C et peut être plus élevée.

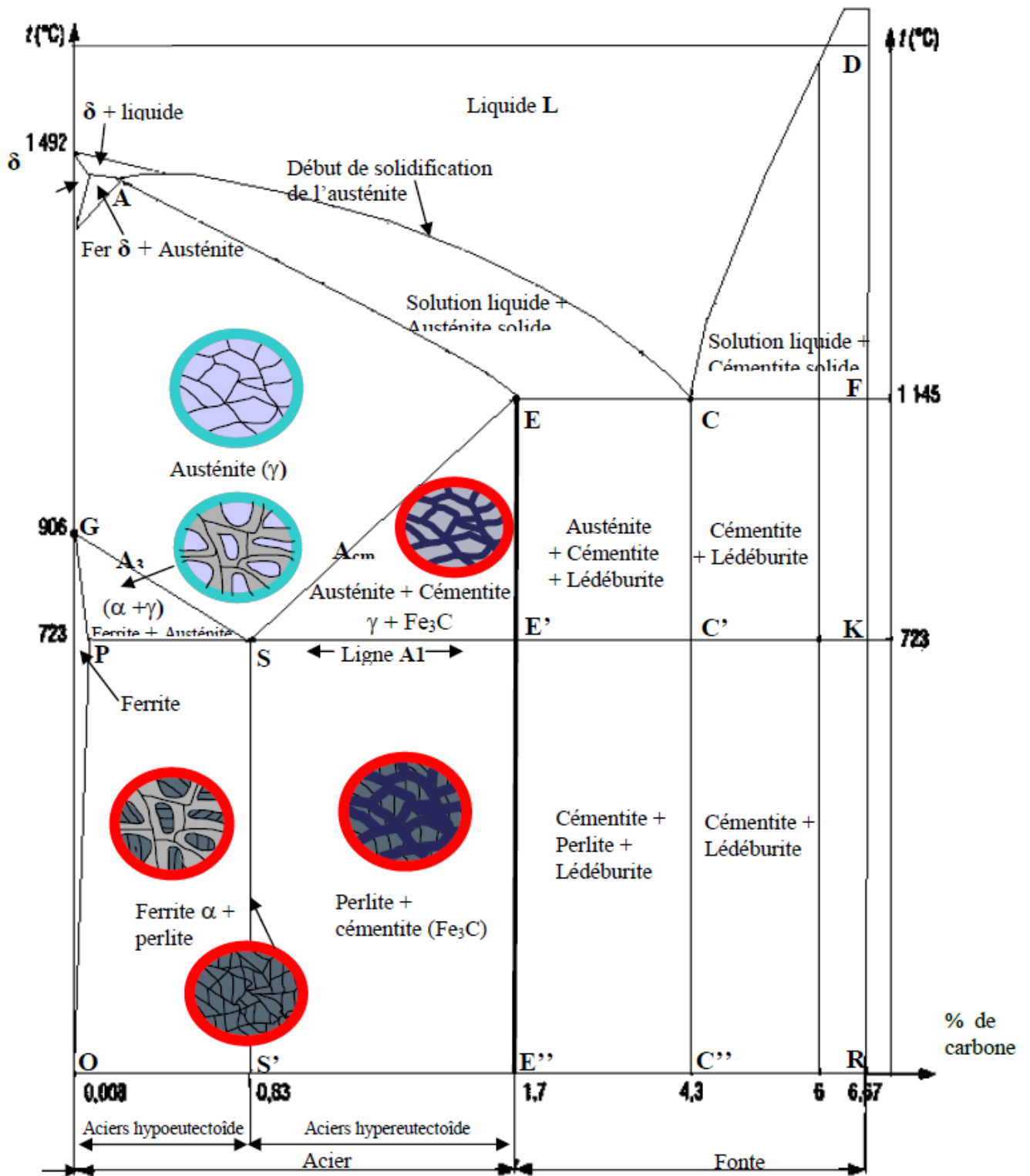


Figure III.5. Diagramme d'équilibre fer-cémentite

Analyse du diagramme Fer- cémentite

a. Les points caractéristiques du diagramme

- A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).
- D : correspond à la température de fission de la cémentite (1392°C).
- E : 2,1 % C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).
- S : 0,8 % C dans l'austénite à la température eutectoïde 727°C.
- P : 0,02 % C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoïde 727°C.
- C : 4,3 % C transformation eutectique à la température 1147°C.

b. Lignes et courbes

- ECF : cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé lédéburite (L_b).
- PSK : cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectoïde appelé perlite (P).
- A_{cm} : indique la fin de la dissolution après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
- A_1 : précise la fin de la transformation au refroidissement de l'austénite. L'austénite n'existe plus au-dessous de cette ligne.
- A_3 : précise la fin de la transformation au chauffage de la ferrite en austénite. La ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne.

c. Les transformations

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- Eutectique à 1147°C : il marque la température minimale d'existence du liquide.
- Eutectoïde à 723°C (A_1). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus
- Péritectique à 1487°C, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.

d. les Réactions

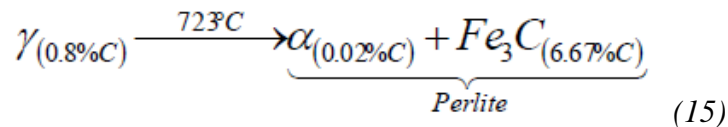
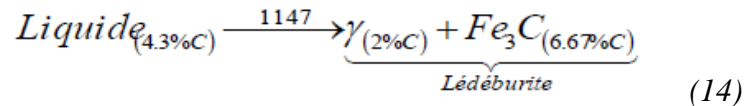
➤ Réaction eutectoïde

Un premier point remarquable doit être noté, correspondant à la teneur de 0.8% C à 723°C, ce point est dit eutectoïde, les aciers qui contiennent moins de 0.8% C sont dits hypoeutectoïdes et ceux qui sont plus carburés hypereutectoïdes.

➤ Réaction eutectique

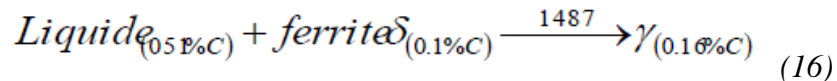
Un deuxième point remarquable doit être noté correspondant à la teneur de 4.3% de carbone à 1147°C, ce point est dit eutectique. A la température eutectique il existe trois phases en équilibre.

Le liquide se solidifie, pour former les phases d'austénite et de cémentite on l'appelle lédéburite. Les fontes qui contiennent moins de 4.3%C sont dits hypoeutectiques et ceux qui sont plus carburés hypereutectiques.



➤ Réaction péritectique

Un troisième point remarquable correspondant à la teneur de 0.51% de carbone à 1487°C, ce point est dit péritectique.



A partir du diagramme fer-cémentite, on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone (tableau III.2 et figures III.6, III.7, III.8, III.9, III.10, III.11)

Tableau III.2. Désignation des aciers et des fontes suivant la teneur en carbone

% de carbone	Désignation
0,02 à 0,8	Aciers hypoeutectoides
0,8	Aciers entectoides
0,8 à 2,06	Aciers hypereutectoides
2,06 à 4,3	fontes hypoeutectiques
4,3 à 4,3	Fontes eutectiques
4,3 à 6,67	Fontes hypereutectiques

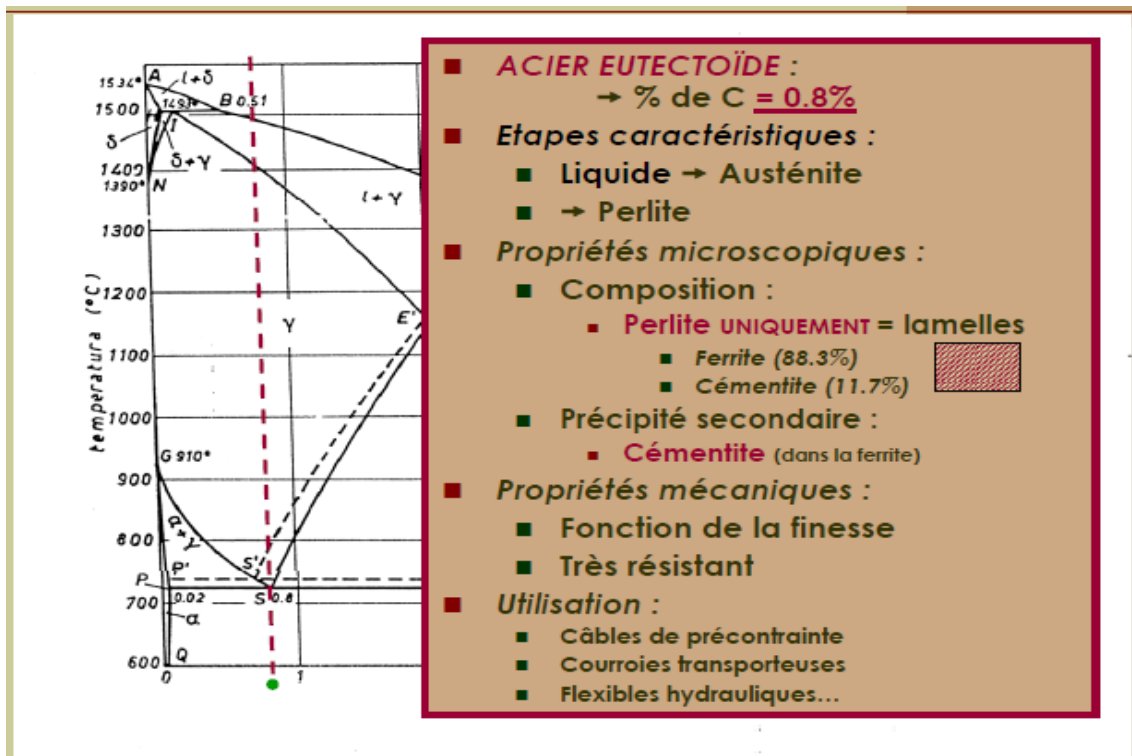


Figure III.6 Aciers entectoïdes

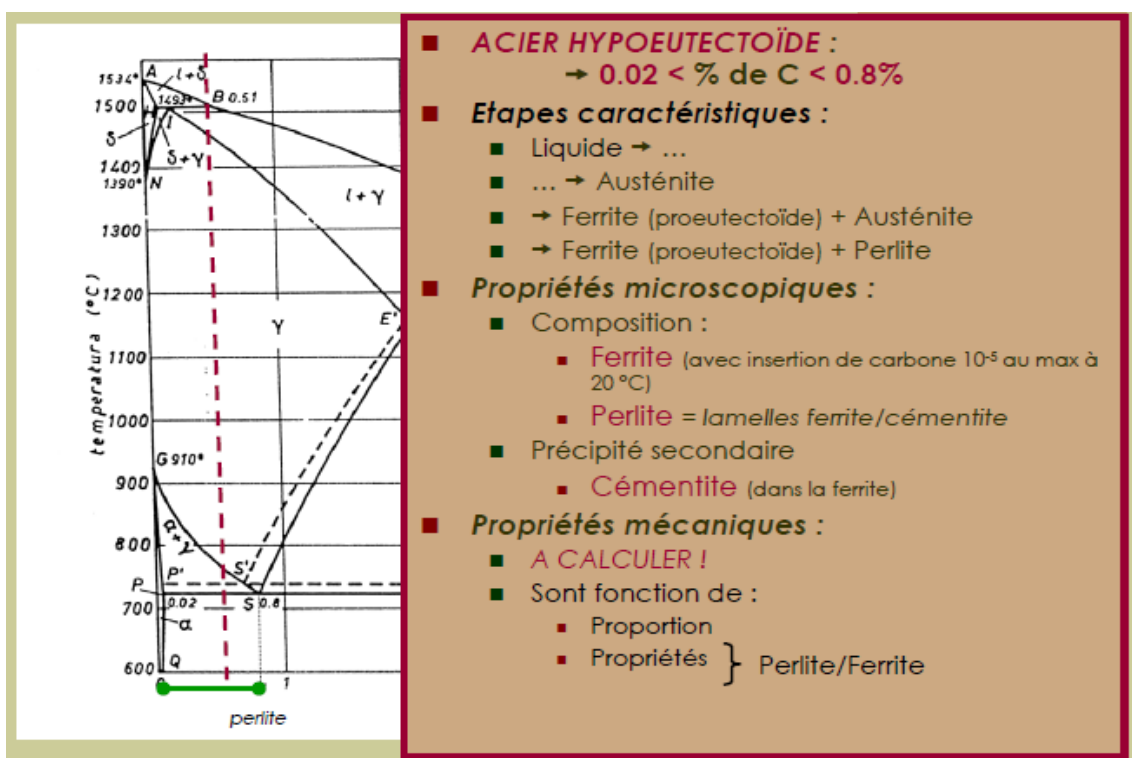


Figure III.7 Aciers hypoeutectoides

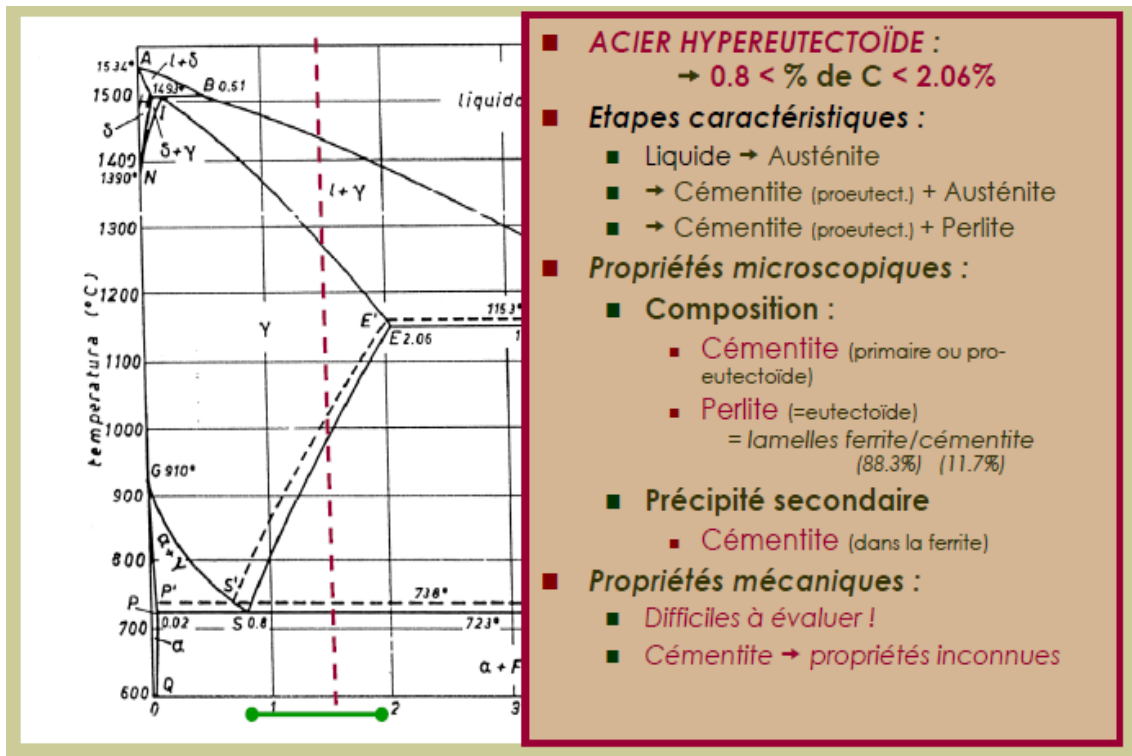


Figure III.8. Aciers hypereutectoides

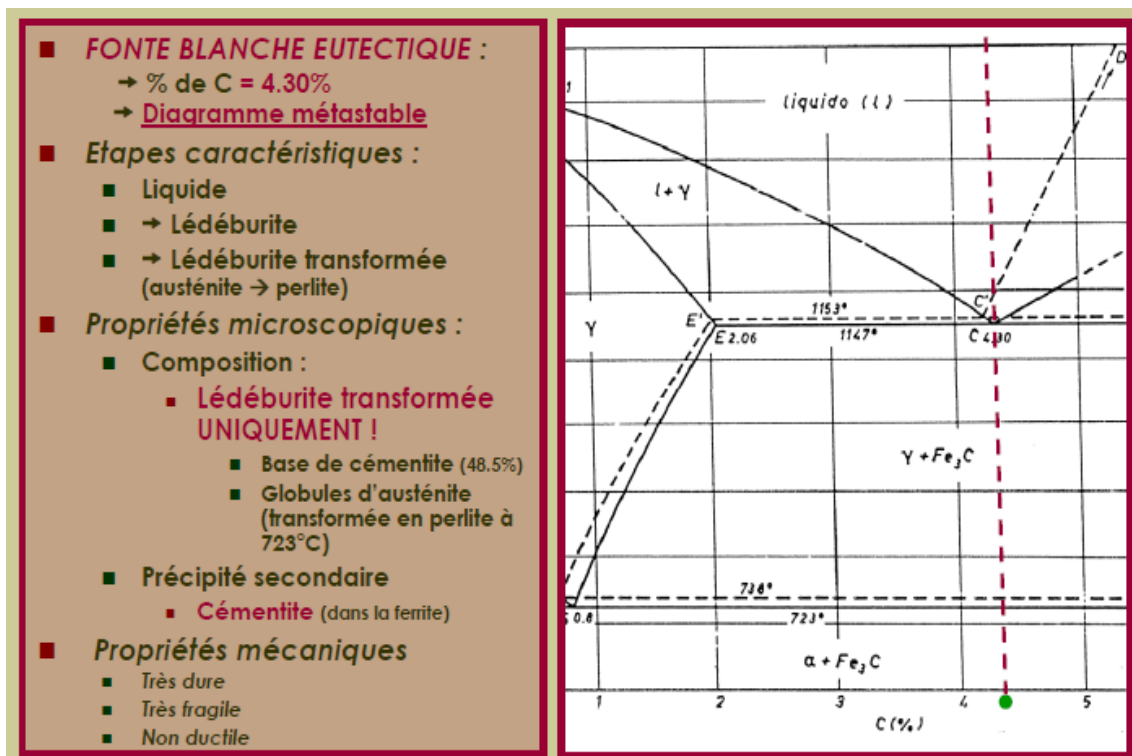


Figure III.9. Fontes eutectiques

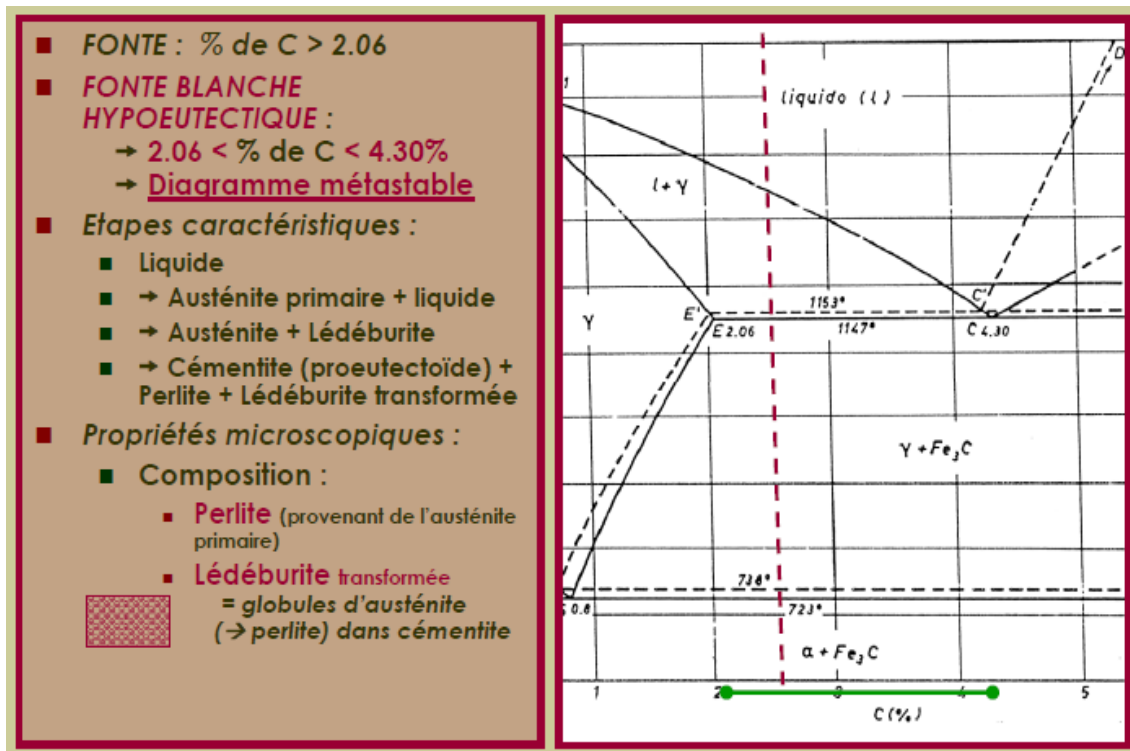


Figure III.10. Fontes hypoeutectiques

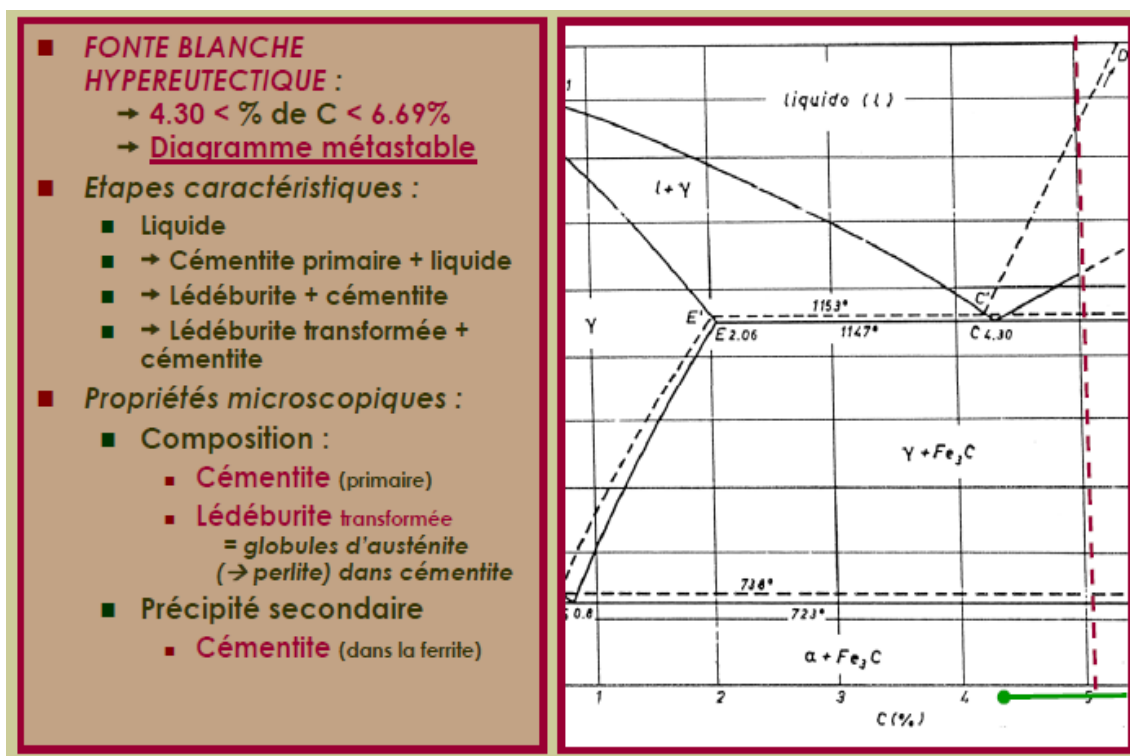


Figure III.11. Fontes hypereutectiques

III.3. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

L'étude du diagramme fer-carbone est analogue à celle du diagramme fer-cémentite faite précédemment (voir figure III.12), il suffit donc de remplacer le mot cémentite par le mot graphite. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. On doit seulement noter que les températures de l'eutectique et de l'eutectoïde sont plus élevées de quelques degrés (1153°C au lieu de 1148°C et 738°C au lieu de 727°C). Il s'ensuit que toutes les teneurs en carbone des points d'intersections des isothermes (paliers) correspondants avec les branches obliques du diagramme sont légèrement abaissées. C'est ainsi que la teneur en carbone de l'austénite à 1153°C est de 1.55% au lieu de 1.7% et que la lédéburite ne contient que 4.25% au lieu de 4.3%. De même la perlite ne contient que 0.69% au lieu de 0.77%.

Dans le système stable fer-graphite, La phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur qui a une miscibilité nulle avec le fer. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe_3C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium. C'est à dire la formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement). La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite). Le graphite primaire cristallise aux températures inférieures à celle de la courbe CD, et le graphite secondaire (eutectique) à celles de la courbe ECF. La courbe SE délimite le domaine de précipitation du graphite secondaire. PSK délimite le graphite eutectoïde.

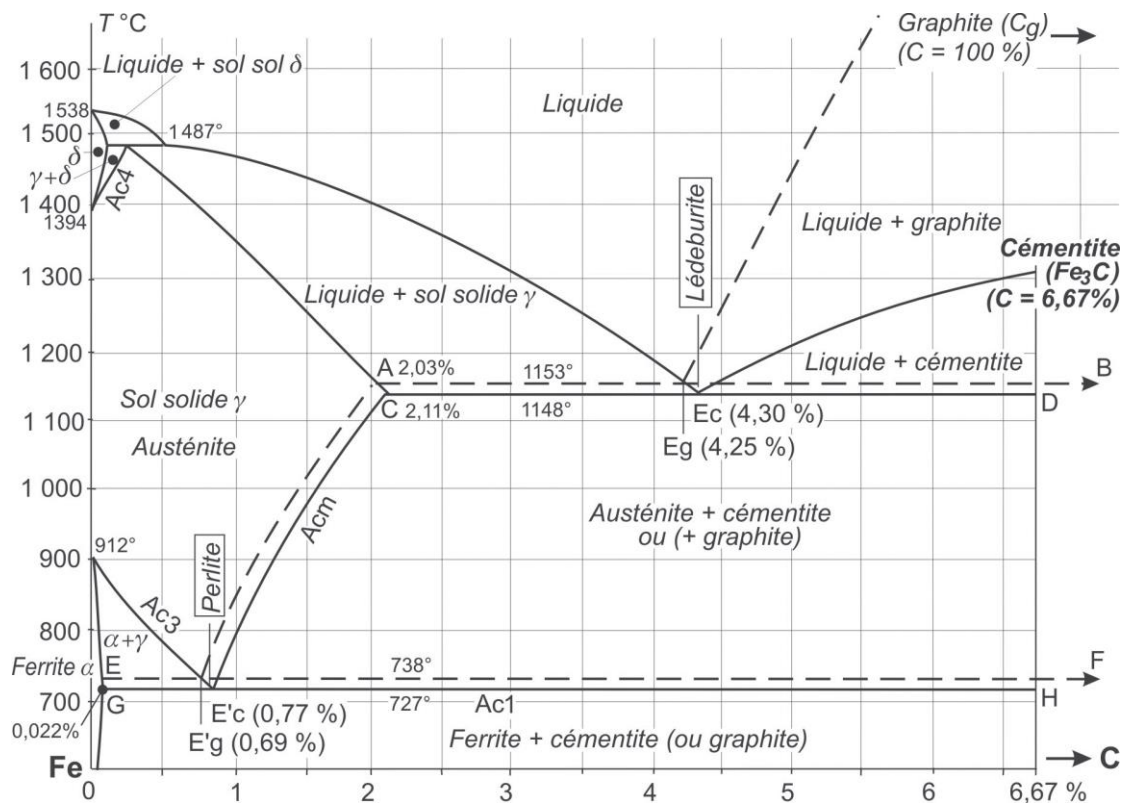


Figure III.12. Diagramme fer-cémentite (en traits pleins) et diagramme fer-graphite (en traits interrompus).

Influence des éléments d'alliages

La mise en solution solide d'éléments d'alliage dans le fer modifie la position des points critiques du diagramme. Ces éléments sont classés selon leurs influences sur la position de ces points. Les propriétés mécaniques et de services du métal dépendent essentiellement de leurs structures. Ces dernières sont déterminées essentiellement par la composition chimique. La présence des éléments normaux tels que C, Si, Mn, P et S ou des éléments spéciaux tels que Ti, Ni, Nb, Cr, V, Mo etc. dans le métal et en fonction de leur teneur ont une influence importante sur la formation de la structure de ce dernier.

A partir de la distribution de l'élément d'alliage dans le métal, les éléments peuvent être classés comme suit :

➤ **Éléments graphitisants** : Ces éléments diminuent la stabilité des carbures et favorise la formation du graphite, comme le silicium (Si), le nickel (Ni), le cobalt (Co), l'aluminium (Al), titane (Ti) etc. ;

➤ **Éléments antigrafitisants** (formant des carbures exemple la cémentite) : Ces éléments sont le chrome (Cr), le tungstène (W), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le titane (Ti), le niobium (Nb),

le tantale (Ta), le zirconium (Zr). Ils forment des carbures durs (souvent complexes), augmentent la dureté et la résistance. La figure 14 montre la tendance des éléments d'alliage à former des carbures, et leur dissolution dans le fer.

En plus de leur effet graphitisant ou antigraphitisant, ils peuvent se classer en :

➤ **Elément stabilisateur d'austénite (gammagène) :** Ces éléments augmentent le domaine d'existence de γ . Ils ont le même réseau cristallin que l'austénite (CFC), augmentent la température de formation d'austénite à partir de la phase liquide et diminuent celle de A_3 . Ces éléments sont le nickel (Ni), le manganèse (Mn), le cobalt (Co) et le cuivre (Cu) ;

➤ **Elément stabilisateur de ferrite (alphagène) :** Ces éléments diminuent le domaine d'existence de l'austénite (γ). Ils ont le même réseau cristallin que la ferrite (CC), diminuent la température de formation d'austénite à partir de la phase liquide, augmentent celle de A_3 et diminuent la solubilité de carbone dans l'austénite. Ces éléments sont le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), l'aluminium (Al) et le silicium (Si) [23].

Le tableau III.3 synthétise les éléments d'alliage alphagène et gammagène et leur effet dans la fonte.

Tableau III.3. Eléments stabilisateurs de ferrite et d'austénite

Effet	Eléments d'alliage	Effet
stabilisateur de ferrite (alphagène)	Cr, Si, Al, Mo, W, Ti, V	favorise l'existence de ferrite α
	B, S, Zr, Nb, Ce, Ta	rétrécit le domaine d'austénite γ
stabilisateur d'austénite (gammagène)	C, N, Cu	élargit le domaine existence d'austénite γ
	Ni, Mn, Co	favorise l'existence de la structure austénitique à la température ambiante

Les figures III.13 montre l'effet des éléments d'alliage sur le domaine de la phase γ .

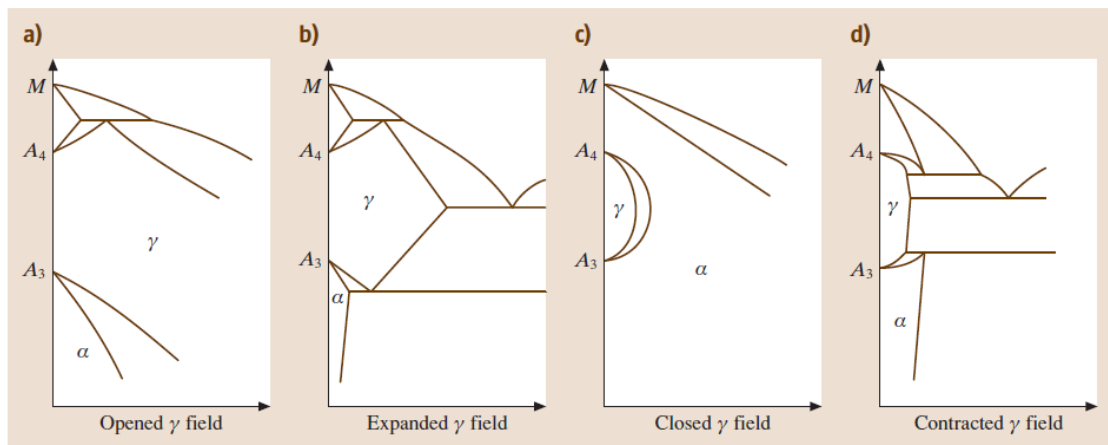


Figure III.13. Classification des phases des fontes alliées : a) ouverture du domaine de phase γ , b) augmentation du domaine de phase γ , c) fermeture du domaine de phase γ , et d) contraction du domaine de phase γ

Figure III.14. Montre la synoptique des diverses possibilités de phases et structure des alliages fer – carbone

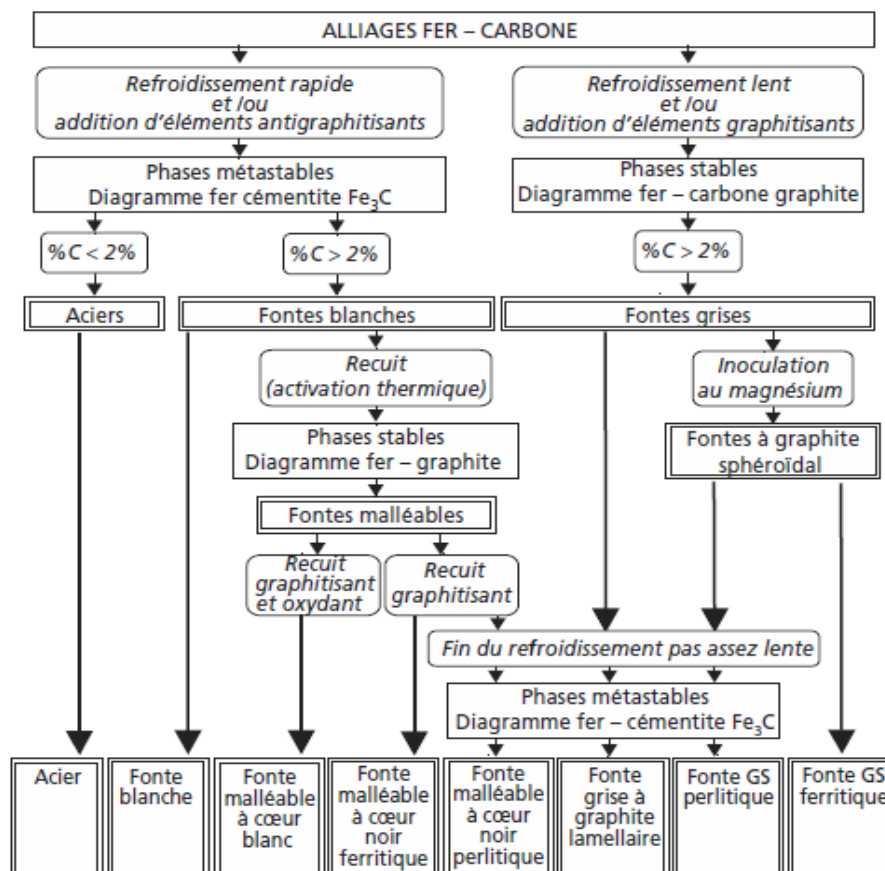


Figure III.14. Synoptique des diverses possibilités de phases et structure des alliages fer – carbone

III.4. Désignation normalisée des aciers et des fontes

Outre les désignations commerciales propres aux producteurs, la désignation des alliages métalliques fait l'objet de normes européennes, qui se sont substituées aux anciennes normes, (AFNOR pour la France par fois encore utilisées à tort). Des exemples de correspondances avec des normes internationales sont donnés aussi souvent que possible dans ce chapitre.

Les teneurs utilisées pour exprimer les compositions des différents constituants sont en pourcentages massiques.

III.4.1. Désignation des aciers

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone avec éventuellement des éléments d'addition. 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 le Mn (Manganèse)), les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés (aciers inoxydables).

Aciers non alliés

➤ Désignation selon la composition chimique

Ils contiennent une faible teneur en carbone. Ils sont très utilisés en construction mécanique. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées. Utilisation : ce sont des aciers dont l'élaboration n'a pas été conduite en vue d'une application déterminée.

Ces aciers sont désignés par la lettre **C** suivi d'un chiffre représentant la teneur moyenne en carbone multiplié par **100**

Exemple :

C 45 Cet acier non allié (C) possède une teneur en carbone de 0.45 %

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

Exemple :

GC35 : Acier au carbone, moulé de 0.35% en carbone.

Les teneurs de ces aciers en divers éléments considérés comme des impuretés, ne doivent pas dépasser des limites définies par la norme NF EN 10020.

➤ Désignation selon l'emploi

Ils sont caractérisés par une faible teneur en carbone, ce sont les plus utilisés. Ils existent dans des qualités diverses et des variantes réservées à des usages particulières (moulage, soudage...). La plupart sont disponibles sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, tôles...) aux

dimensions normalisées. Certains sont proposés en semi-fini : pré-laqués, galvanisés, nervurés, ondulés, etc. Ils sont appliqués généralement en (construction soudée, formage à froid ou à chaud, emboutissage, étirage, laminage, pliage...) : carrosseries, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plateforme pétrolière, trains, chaudronnerie, ameublement, électroménager, biens de construction...

La désignation commence par la lettre « **S** » pour les aciers d'usage général et par la lettre « **E** » pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élastique en Méga Pascals.

✓ **Aciers non-alliés d'usage général**

S + Re : Re est la valeur minimale de la limite d'élasticité en Mpa

Exemple : **S 235** (acier d'usage général, de limite élastique 235MPa)

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

Exemple : GS235.

✓ **Aciers non-alliés pour la construction mécanique**

E + Re : Re est la valeur minimale de la limite d'élasticité en Mpa

Exemple :

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa)

Remarque : S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

Exemple : GE335.

III.4.2. Désignation des Fontes

Les fontes sont alliages de fer et de carbone tel que leurs teneurs en carbone est comprise entre 2.14 et 6.67%. Elles possèdent une bonne coulabilité. Cette dernière permet donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) aux formes complexes. Elles sont en général assez fragiles (cassantes) à cause du pourcentage élevé de carbone qu'elles contiennent, peu ductiles (inadaptées aux déformations à froid : forgeage, laminage...) difficilement soudables et ont une bonne usinabilité.

On distingue :

➤ **Les fontes blanches.** Ce sont des fontes dont la cassure a une teinte très claire. Elles sont caractérisées par des teneurs en carbone et en silicium relativement faibles et par une teneur élevée de manganèse.

➤ **Fontes grises.** Ce sont des fontes industrielles dont la majeure partie de carbone se trouve sous forme de graphite. Selon la forme du graphite on distingue :

✓ Les fontes à graphite lamellaire

Les fontes grises à graphite lamellaire (FGL). Les lamelles de graphite des fontes grises agissent en tant que canalisations verticales d'effort qui lancent et propagent des fissures rendant le matériel fragile. La forme lamellaire du graphite agit comme des entailles diminuant la résistance à la traction, tout particulièrement lorsque les lamelles sont très grandes. C'est fontes sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- Sont économiques ;
- Amortissent bien les vibrations ;
- Ont une bonne coulabilité et usinabilité ;
- Sont peu oxydables ;
- Ont une bonne résistance à l'usure par frottement ;
- Résistant bien aux sollicitations de compression.

À cause des propriétés précédentes les fontes grises lamellaires sont utilisées dans l'industrie de carters, bâtis de machine, blocs moteur, supports, pièces aux formes complexes, ...

Désignation :

La désignation de fontes a graphite lamellaire est composée de :

- Le préfixe **EN** suivi d'un tiret
- Les lettres **GJL** qui représente la fonte a graphite lamellaire
- Un tiret
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par traction en MPa (méga Pascals).

Exemples :

EN- GJL-250 Cette fonte à graphite lamellaire possède une résistance à la traction d'au moins 250 MPa.

EN- GJL-300 (fonte à graphite lamellaire de résistance $R_{e\ mini} = 300\text{MPa}$)

✓ Les fontes à graphite sphéroïdale

La fonte ductile à graphite sphéroïdal (**FGS**), appelée aussi fonte nodulaire. En ajoutant des quantités minimales de magnésium à la fonte avant coulée, le graphite prend une forme sphérique et non en lamelles.

C'est fontes sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises ;
- bonne ductilité, résilience et usinabilité.

À cause de ces propriétés les fontes à graphite sphéroïdal sont utilisées dans l'industrie de vilebrequins, arbres de transmission, tuyauteries...

Désignation :

La désignation de fontes à graphite sphéroïdale est composée de :

- Le préfixe **EN** suivi d'un tiret
- Les lettres **GJS** qui représente la fonte à graphite sphéroïdale
- Un tiret
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par traction en MPa.
- Un tiret
- Un nombre correspondant au % d'allongement après rupture.

Exemples :

EN- GJS-500-7 Cette fonte à graphite sphéroïdale possède une résistance à la traction d'au moins 500 MPa et une valeur minimale d'allongement de 7%.

EN-GJS-400-18 (fonte à graphite sphéroïdale de résistance maximale par traction $R_{e\ mini} = 400\text{MPa}$ et d'allongement maximal $A\% = 18$).

✓ Les fontes malléables

La fonte malléable est produite par malléabilisation (un traitement thermique de longue durée) de la fonte blanche, sorte de recuit et ont des propriétés voisines de celle de l'acier. Elles peuvent être moulées en faibles épaisseurs et sont facilement usinables.

À cause de ces propriétés les fontes à graphite sphéroïdal sont utilisées dans l'industrie de carters, boîtiers...

Désignation :

La désignation de fontes malléables est composée de :

- Le préfixe **EN** suivi d'un tiret
- Les lettres **GJM** qui représente la fonte malléable
- la lettre **W** pour le cœur blanc (white) ou la lettre **B** pour le cœur noir (black)
- Un nombre correspondant à la résistance minimale à la rupture par extension en MPa.
- Un tiret
- Un nombre correspondant au % d'allongement après rupture.

Exemples :

EN- GJMW-450-7 Cette fonte malléable à cœur blanc possède une résistance à la traction d'au moins 450 MPa et une valeur minimale d'allongement de 7%

EN-GJMB 300-6 Cette fonte malléable à cœur noir possède une résistance à la traction d'au moins 3000 MPa et une valeur minimale d'allongement de 6%.

III.5. Désignation normalisée d'autres aciers alliés

III.5.1. Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur de chaque élément d'addition est inférieure à 5 % et dont la teneur en manganèse est inférieure à 1%. Ils sont choisis lorsque l'on a besoin d'une haute résistance. Ils sont utilisés en état brut de coulée ou avec traitement.

La désignation est fonction de la composition :

Ces aciers sont désignés par :

- pourcentage de carbone multiplié par 100 ;
- symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre des teneurs décroissantes;
- les teneurs des principaux éléments d'addition multipliés par un facteur dépendant du matériau : 4, 10, 100 ou 1000 (voir tableau III.4 ci-contre) ;
- éventuellement, des indications supplémentaires concernant la soudabilité (**S**), l'aptitude au moulage (**M**), ou à la déformation à froid (**DF**).

Remarque : Les pourcentages des éléments d'alliage minoritaires ne figurent pas forcément dans la désignation mais sont néanmoins précisés dans la norme de définition de la nuance concernée.

Tableau III.4. Facteurs multiplicatifs des pourcentages de différents éléments d'alliage dans les aciers faiblement alliés.

Eléments	Facteur
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Exemples :

20MoCr5

- Acier faiblement allié possède une teneur en carbone de 0.2 %
- La teneur en molybdène est de 0,5 %.
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome.

35 Cr Mo 4S acier avec 0.35% de Carbone, 1% de chrome, moins de 1% de Molybdène. Cet acier est soudable

Remarque : si l'acier est moulé, la désignation est précédée d'un **G**

G18NiCrMo6

-Acier faiblement allié est moulé et possède une teneur en carbone de 0.18 %.

-La teneur en Nickel est de 1.25 %.

-Il y a des traces (non quantifiées) de chrome et de molybdène Aciers fortement alliés.

III.5.2. Aciers fortement alliés

Les aciers fortement alliés possèdent au moins un élément d'addition dont la teneur dépasse la teneur de 5% en masse. Ces aciers sont réservés à des usages particuliers.

Par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%).

La désignation normalisée commence par la lettre **X**, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés. La seule différence : pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni10, ni4...).

La désignation de ces aciers est désigné par :

- La lettre « **X** »,
- pourcentage de carbone multiplié par 100
- Les symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes,
- Les teneurs des éléments d'alliage séparées par un trait d'union.

Si les aciers désignés sont moules, leur désignation est précédée d'un **G**

Exemples :

X6 Ni Cr Ti 17-12

- Cet acier fortement (X) allié possède une teneur en carbone de 0.06 %
- Il est allié a du nickel (Ni) du chrome (Cr) et du titane (Ti).
- La teneur en nickel est de 17 % (17).
- La teneur en chrome est de 12 % (12).
- Il y a des traces (non quantifiées) de titane.

GX6CrNiTi18-11 : Acier fortement allié, moulé, contenant 0,06 % de carbone, 18% de chrome, 11% de Nickel et des traces de titane (< 1%).

Le tableau III.6 suivant résume la désignation normalisée des aciers et des fontes selon la norme européenne.

Le tableau III.6. Désignation normalisée des aciers et des fontes selon la norme européenne

ALLIAGES FERREUX			SYMBOLES CHIMIQUES DES ELEMENTS D'ALLIAGE	
FONTES	ACIERS		Symbole	Elément d'alliage
	ACIERS NON ALLIES	ACIERS ALLIES		
<p>A) LES FONTES A GRAPHITE LAMELLAIRE : Exemple de désignation symbolique : EN-GJL-200 Préfixe ——— Rr en Mpa Symbole du type de fonte</p> <p>* Rr = Limite à la rupture en Mpa (N/mm²)</p> <p>B) LES FONTES MALLEABLES : Exemple de désignation symbolique : EN-GJMB-450-6 Préfixe ——— Rr en Mpa ——— A% Symbole du type de fonte</p> <p>* A% = Pourcentage d'allongement après rupture</p> <p>C) LES FONTES GRAPHITE SPHEROÏDAL : Exemple de désignation symbolique : EN-GJS-400-18 Préfixe ——— Rr en Mpa ——— A% Symbole du type de fonte</p>	<p>A) LES ACIERS D'USAGE GENERAL : S B) LES ACIERS DE CONSTRUCTION MECANIQUE : E Exemple de désignation : S 235 E 335 Symbole ——— Re en Mpa</p> <p>* Re = Limite minimal délasticité en Mpa (N/mm²)</p> <p>C) LES ACIERS POUR TRAITEMENT THERMIQUE ET FORGEAGE : C Exemple de désignation : C 40 Symbole ——— % de carbone x 100</p> <p>⚡ Acier non allié – 0,4% de carbone</p> <p>D) LES ACIERS NON ALLIES MOULES : Si un acier est moulé, sa désignation est précédée de la lettre G Exemples : GS 235 GS 335 GC40</p>	<p>A) LES ACIERS FAIBLEMENT ALLIES : (Aucun élément d'alliage n'atteint 5%) Exemple de désignation : 30 Ni Cr Mo 8-6 % de carbone x 100 Symbole des éléments d'alliage par teneur décroissante</p> <p>% des éléments d'alliage x4 pour Cr, Co, Mn, Ni, Si, W x10 pour Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr x100 pour Ce, N, P, S x1000 pour B</p> <p>⚡ 16 Ni Cr Mo 8-6 : 0,16 % de carbone – 2% de Nickel – 1,5% de Chrome – faible % de Molybdène</p> <p>B) LES ACIERS FORTEMENT ALLIES : (Au moins un élément d'alliage atteint 5%) Exemple de désignation : X 5 Cr Ni 18-10 Symbole ——— % réel des éléments d'alliage ——— % de carbone x 100 ——— Symbole des éléments d'alliage par teneur décroissante</p> <p>⚡ X 5 Cr Ni 18-10 : 0,05% carbone – 18% de Chrome – 10% de Nickel</p>	Al	Aluminium
			Sb	Antimoine
			Ag	Argent
			Be	Béryllium
			Bi	Bismuth
			B	Bore
			Cd	Cadmium
			Ce	Cérium
			Cr	Chrome
			Co	Cobalt
			Cu	Cuivre
			Sn	Etain
			Fe	Fer
			Ga	Gallium
			Li	Lithium
			Mg	Magnésium
			Mn	Manganèse
			Mo	Molybdène
			Ni	Nickel
			Nb	Niobium
			Pb	Plomb
			Si	Silicium
			Sr	Strontium
			Ti	Titane
			V	Vanadium
			Zn	Zinc
			Zr	Zirconium

Chapitre IV : Traitements thermiques et thermochimiques de diffusion

Objectifs du chapitre

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Expliquer les cycles de traitements thermiques et thermochimiques ;
- Différencier entre les différents types de traitements thermiques et thermochimiques ;
- Connaître les effets des traitements thermiques et thermochimiques sur les propriétés mécaniques.

La fabrication de pièces travaillant dans des conditions extrêmes, oblige les constructeurs à faire très bien attention aux matériaux à partir desquels ils vont les fabriquer. En effet ; ils se trouvent dans l'obligation de modifier les caractéristiques de ces matériaux soit avant la fabrication soit à la fin de la fabrication. Pour des exigences des propriétés d'emplois on fait appel à des aciers alliés (aciers faiblement alliés et aciers fortement alliés), sauf les aciers de classe S et E, tout le reste des aciers sont capables de donner des performances mécaniques meilleurs par traitements thermiques, traitements thermochimiques et traitements thermomécaniques (Figure IV. 1).

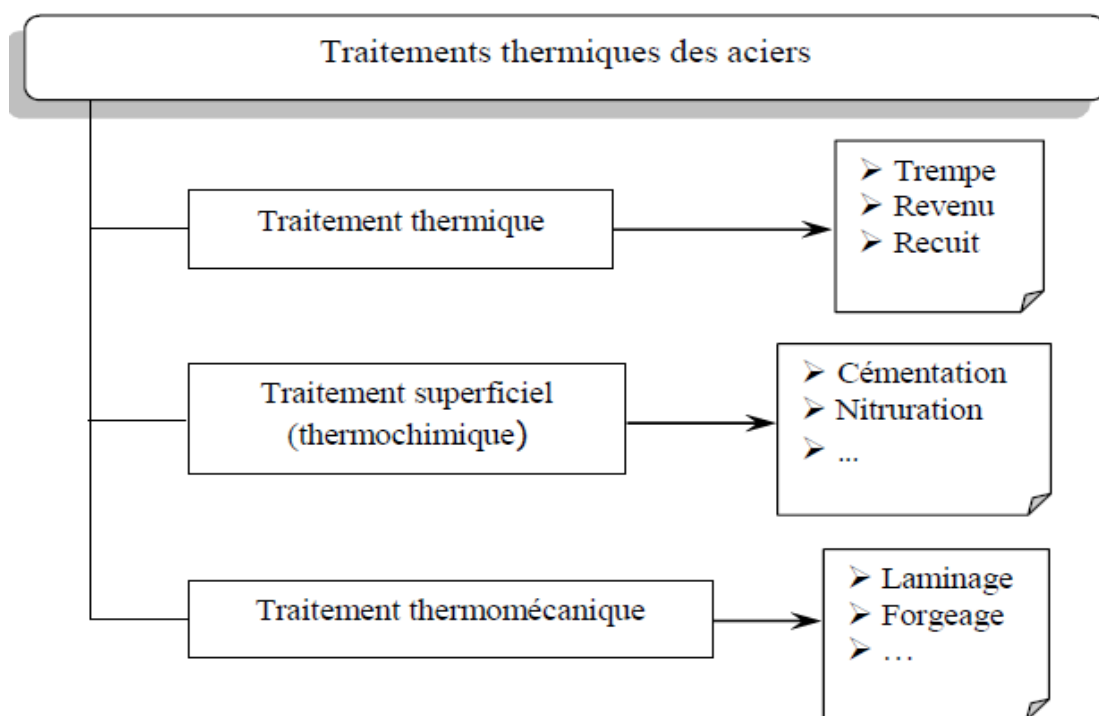


Figure IV.1. Différent types de traitements des métaux et alliages

IV.1. Traitements thermiques

La définition maintenue par la norme NF EN 10052 pour traitement thermique est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

Les traitements thermiques des métaux et alliages conduisent à des transformations structurales issues de transformations de phases, cristallisation et diffusion.

Le but final des traitements thermiques est de faire varier les propriétés mécaniques des alliages traités, c'est-à-dire l'obtention d'une répartition optimale des précipités dans la matrice par un durcissement structural grâce à une série de chauffages et de refroidissements contrôlés. Dans ce cas le métal ou alliage est porté à une température plus ou moins élevée et ensuite refroidi lentement ou rapidement selon l'objectif tracé. Les propriétés mécaniques des alliages traités dépendent de la répartition des précipités, de leur taille et de leur distance moyenne.

IV.1.1. Buts des Traitements thermiques

Les traitements thermiques ont le but de :

a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.

- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). La figure IV.2 résume le but final des traitements thermiques (amélioration des propriétés mécaniques d'une pièce métallique).

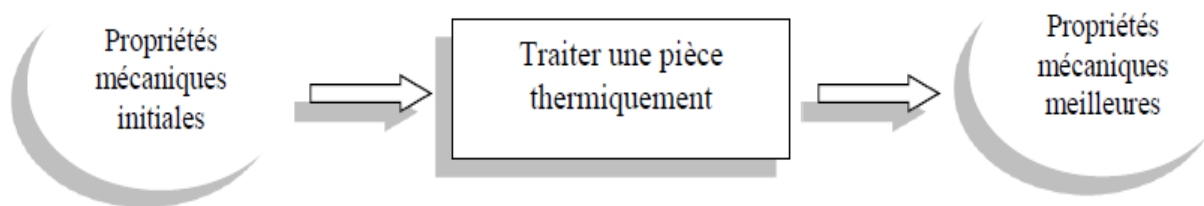


Figure IV. 2. But final des traitements thermiques d'une pièce métallique

IV.1. 2. Procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Ce traitement consiste, donc, à jouer sur trois éléments : la température, le temps et le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif) lors de trois périodes différentes : la montée en température, le maintien à température et le refroidissement.

En général, cette dernière période est essentielle et critique. La vitesse convenable pour obtenir les propriétés attendues exige le choix d'un milieu de refroidissement convenable comme l'air, l'eau, l'huile, bain de sel, gaz ou mélanges gazeux sous pression en fonction la trempabilité et des dimensions des pièces à traiter. Le procédé de traitement thermique se compose de cycle suivant (Figure IV. 3).

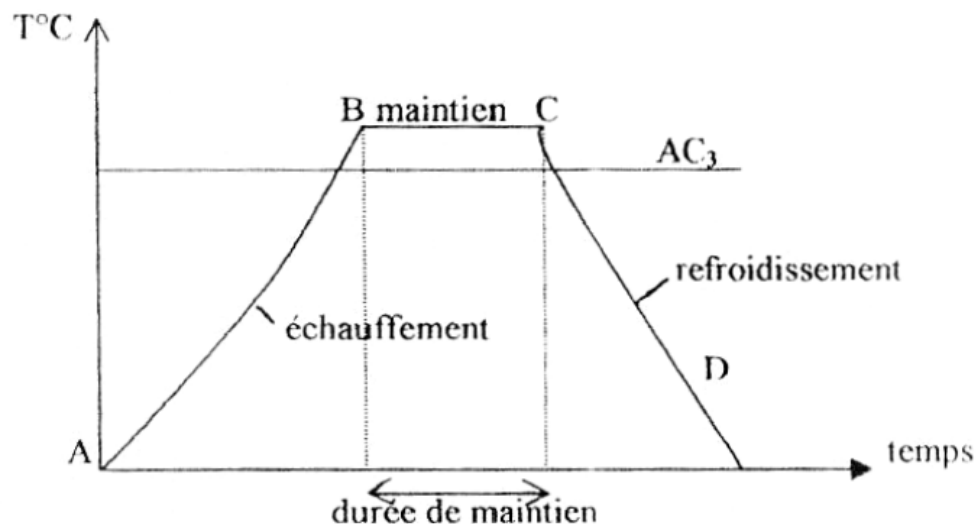


Figure IV. 3. Cycle de traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃) ;
- BC : Maintient à une température définie ;
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - ✓ lente (dans le four, à l'air) ;
 - ✓ Assez rapide (dans l'huile) ;
 - ✓ Très rapide (dans l'eau).

IV.1. 3. Constituants métallographiques issus de traitements thermiques

En plus des Constituants microstructuraux d'équilibre de fer montré dans le chapitre III, Diverses constituants métastables sont observés après les traitements thermiques lors du refroidissement des métaux dans des conditions s'écartant de l'équilibre thermodynamique, notamment la martensite. Ces transformations se décrivent facilement par des diagrammes TTT (Température-Temps-Transformation) et TRC (Transformation en Refroidissement Continu) (figure IV. 4). Pour les aciers hypoeutectoïdes, la transformation perlitique est précédée par l'apparition de ferrite, pour les aciers hypereutectoïdes, elle est précédée par l'apparition de cémentite.

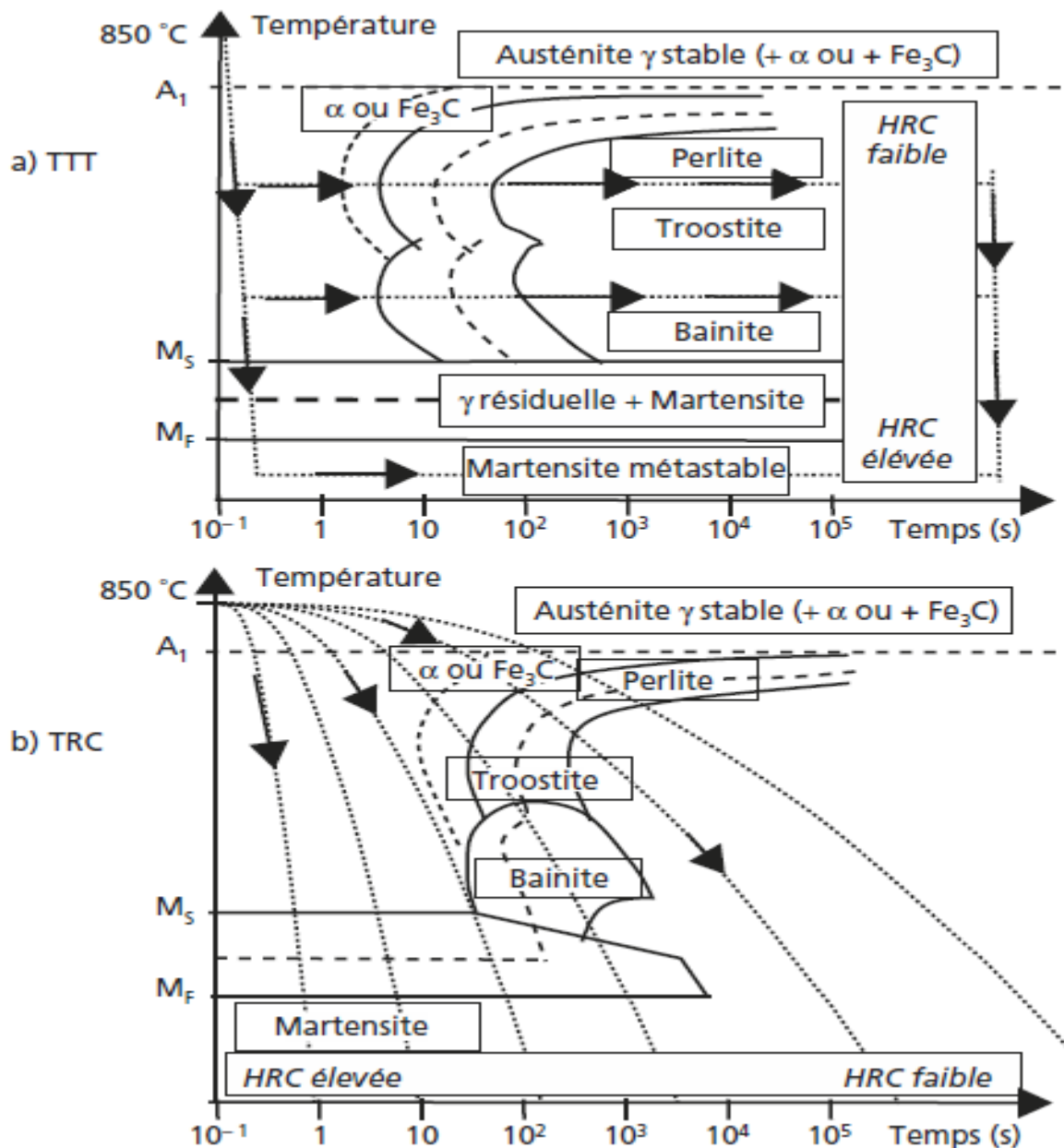


Figure IV.4. Schéma typique des diagrammes TTT et TRC d'un acier au carbone

➤ Martensite

Est une solution solide de fer sursaturée en carbone. C'est un constituant de trempe produit au cours de la décomposition de l'austénite, la structure se présente sous la forme d'aiguilles obtenue uniquement si la vitesse de refroidissement est supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. La martensite est une ferrite au réseau détendu sursaturé de carbone, elle est très dure entre 500 - 650 HB selon la teneur en carbone, ferromagnétique, et difficilement usinable.

➤ Bainite

Est un Constituant de trempe intermédiaire, la structure à un aspect voisin de celui de la martensite, c'est un agrégat de ferrite et de carbures (cémentite) c'est à dire présente les mêmes phases que la perlite (ferrite et cémentite), mais de structure vraiment fine, souvent en aiguilles ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Elle accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés. Elle est moins dure, moins fragile que la martensite et facile à usiner.

En fonction de la température de traitement, on rencontre la bainite inférieure et la bainite supérieure.

➤ Troostite

C'est un agrégat lamellaire analogue à la perlite, constituée de très fines lamelles de ferrite et cémentite (fer α et Fe_3C). Obtenue par refroidissement rapide, elle est précipitée par une trempe douce au cours de la décomposition de l'austénite. Fréquemment associée à la bainite et à la martensite dans les aciers trempés. Sa dureté est supérieure à 400 HB.

➤ Sorbite

Est un constituant extrêmement fin qui se forme au cours du réchauffage des aciers trempés et revenus. Elle a une structure spécifique issue de la décomposition de la martensite et de l'austénite résiduelle, sa structure est constitué par de fins carbures de fer (Fe_3C cémentite) dans une matrice ferritique, la sorbite possède une bonne résilience, dureté 250-400 HB.

IV.1. 4. Effet de la température d'austénitisation, la teneur en carbone et les éléments d'alliage sur le processus des traitements thermiques.**➤ Effet de la température d'austénitisation**

L'élévation de la température d'austénitisation produit rapidement une austénite homogène. Cette action conduit à une augmentation des temps d'incubation, et donc à une diminution des vitesses critiques de transformation (décalage vers la droite des domaines d'apparition de la perlite et de la bainite dans les diagrammes **TTT** et **TRC**. Mais il peut aussi en provoquer un grossissement du grain

austénitique, donc l'obtention après transformation d'une microstructure plus grossière, défavorable aux propriétés mécaniques.

➤ **Effet de la teneur en carbone**

Il provient de deux mécanismes opposants :

✓ La martensite obtenue après trempe est d'autant plus dure qu'elle emprisonne plus de carbone en sursaturation. De plus, l'augmentation de teneur en carbone augmente légèrement les temps d'incubation, améliorant ainsi la trempabilité.

✓ L'augmentation de teneur en carbone abaisse les points MS et MF. MF devient inférieure à 20 °C à partir d'environ 0,7 %C. Pour une température finale de trempe de 20 °C, il en résulte donc une diminution de la teneur en martensite du mélange (martensite + austénite résiduelle) d'où une diminution de dureté.

➤ **Effet des éléments d'alliage**

Dans l'ensemble, comme le carbone, ils augmentent les temps d'incubation, repoussent les domaines de transformation perlitique et bainitique vers les temps longs et améliorent la trempabilité.

IV.1. 5. Classification des traitements thermiques

En général, les traitements thermiques sont classés en deux familles (Figure IV.5). On distingue les traitements sans changement de la matrice (structure initiale) appliqués surtout pour les alliages (alliage d'aluminium, alliage de cuivre...) et les traitements avec changement allotropique de la matrice remarqués dans les traitements des aciers.

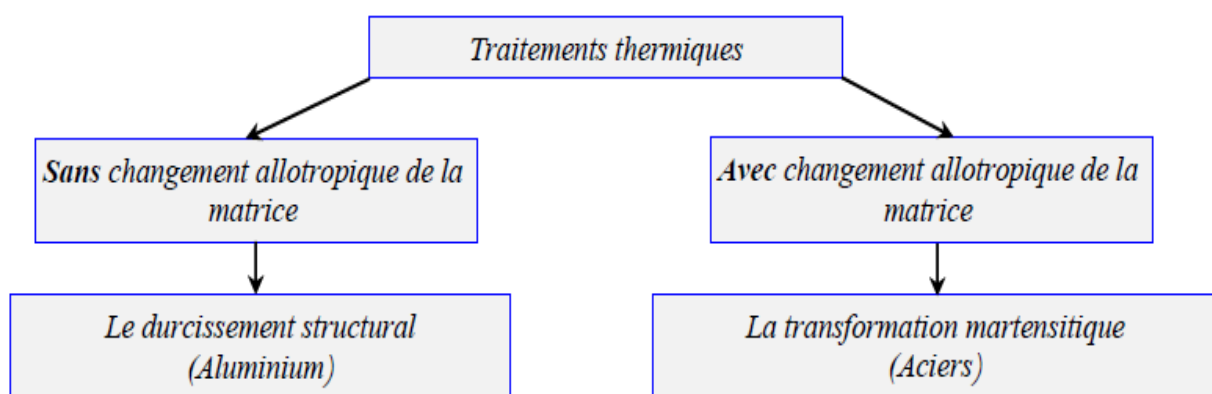


Figure IV. 5. Classification générale des traitements thermiques des matériaux métalliques

IV.5.1. le recuit

Le recuit est un traitement thermique permet d'annuler les effets néfastes de traitements thermiques ou mécaniques précédents notamment de la ségrégation, l'écroissage et les contraintes de soudage etc. C'est à dire de se débarrasser de certains états hors équilibre. D'une manière générale, le recuit a comme conséquence le retour à un équilibre physico-chimique et/ou mécanique plus ou moins complet, lié éventuellement à une tendance vers l'équilibre structural.

- Equilibre physique : équilibre des phases.
- Equilibre chimique : composition chimique.
- Equilibre mécanique : contraintes internes.
- Equilibre structural : taille des grains, défaut de structure.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture).

➤ Buts de recuit

Le recuit a pour but de :

- ✓ Diminuer la dureté d'un acier trempé ;
- ✓ Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques;
- ✓ Régénérer un métal écroui ou surchauffé ;
- ✓ Homogénéiser les textures hétérogènes ;
- ✓ Réduire les contraintes internes.

➤ Le cycle thermique de recuit comprend :

- ✓ Chauffer la pièce à une température déterminée dite température de recuit (le choix de la température dépend des objectifs, elle peut aller de 450 et 1100°C) ;
- ✓ Maintenir cette pièce à cette température pendant un temps donné ;
- ✓ Refroidir à la vitesse adéquate afin d'obtenir après retour.

➤ Différents types de recuit

✓ Recuit d'homogénéisation (ou de diffusion)

Il s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique de l'austénite. Il sert à limiter ces hétérogénéité chimique qui se trouvent dans le solide. Le recuit a lieu de 950 à 1200°C puis est suivi par un refroidissement de 20 à 60°C par heure.

- Diminue les hétérogénéités chimiques ;
- Se fait au-dessus d' A_3 ;
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe (pour éviter la transformation martensitique).

✓ **Recuit de recristallisation**

Sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation.

- Régénère une structure nouvelle à partir d'une structure écrouie ;
- Se fait en dessous d' A_1 ;
- Refroidissement lent.

✓ **Recuit de détente (ou stabilisation ou relaxation)**

Le recuit de détente permet d'éliminer les contraintes physico-chimiques internes qui se trouvent dans le solide produites par le soudage ou la mise en forme. Il s'effectue entre 600 et 650°C suivi d'un refroidissement lent.

- Réalise l'équilibre mécanique ;
- Se pratique en dessous d' A_1 ;
- Refroidissement lent pour ne pas introduire des contraintes internes.

✓ **Recuit d'adoucissement**

Il détruit les effets des traitements thermiques antérieurs. Cela permet d'abaisser la dureté du matériau. Il est utile pour la mise en œuvre à froid.

- Destiné à faciliter l'usinage des pièces ;
- Se fait au-dessus d' A_3 ;
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

✓ **Recuit de normalisation (ou régénération)**

Il affine les grains du métal et s'applique aux pièces forgées. Le but est d'avoir une structure avec de très fins grains bien répartis dans tout le matériau qui a subi un maintien à haute température (moulage, forgeage...).

- Diminue la taille des grains due à une surchauffe au cours d'une soudure ou d'un forgeage (à chaud).
- Se fait au-dessus d' A_3 .
- Refroidissement inférieur à la vitesse critique de trempe.

IV.5.2. La trempe et revenu

➤ La trempe

Contrairement au recuit d'adoucissement, le but de la trempe est d'augmenter la dureté du matériau. Il est utilisé pour les aciers dont la teneur en carbone dépasse 3%.

✓ Les trois facteurs de trempe sont :

- La teneur en carbone qui conditionne l'augmentation possible de dureté ;
- La température de trempe, elle doit permettre la formation d'austénite (la température doit être supérieure de 50°C par rapport au seuil de formation de l'austénite) ;
- La vitesse de trempe, le refroidissement doit être suffisamment rapide pour permettre l'augmentation de dureté.

On peut classer par ordre de vitesse croissante les constituants formés grâce à la trempe :

Perlite < Troostite < Bainite < Martensite

La trempe est souvent suivie d'un revenu car il permet de détruire le reste d'austénite contenue dans le matériau (figure 6).

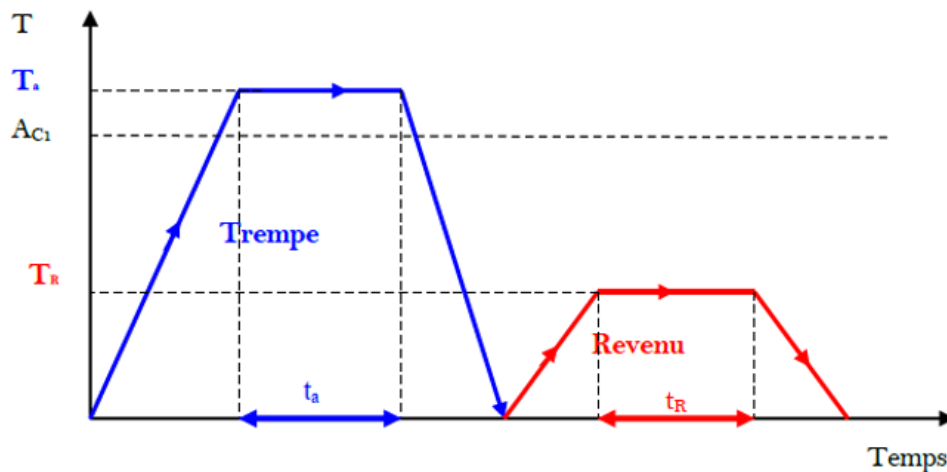


Figure 6. Cycle complet du traitement (trempe et revenu)

✓ Buts de trempe

Une trempe a pour objet de durcir le métal. Elle permet d'obtenir des aciers très durs mais dans la plupart des cas peu ductiles. Elle fait en général augmenter la résistance à la traction (R_m), la limite élastique (R_e), et la dureté H et diminuer l'allongement $A\%$, la striction $Z\%$ et la résilience (K).

✓ Le cycle thermique de trempe comprend :

1. Un chauffage lent de la pièce à une température appropriée (austénitisation ou mise en solution), dépendant du type d'acier à traiter

2. Un temps de maintien à la température pour que les transformations soient complètes.
3. Un refroidissement effectué à partir de la température dite température de trempe jusqu'à une température plus basse pouvant différer de la température ambiante, en plongeant la pièce par exemple dans de l'eau (trempe à l'eau) ou de l'huile (trempe à l'huile) ou par insufflation d'un gaz tel que l'air. On peut évoquer également les émulsions eau-polymères ainsi que certains sels (nitrates, nitrites) comme milieux de trempe.

✓ **Les défauts engendrés par la trempe :**

- Décarburation superficielle due à l'atmosphère (généralement oxydation des fours) ;
- Corrosion en cas de maintien prolongé à haute température ;
- Contraintes internes qui résultent des vitesses de refroidissement différentes (ou de chauffage) entre les diverses parties de la pièce et de la transformation martensitique dans le cas de la trempe des aciers.

➤ **Le revenu**

Le revenu est un traitement thermique qui suit la trempe. On effectue un revenu immédiatement après la trempe sur les pièces complètement refroidies. En effet la structure martensitique créée lors de la trempe donne une certaine fragilité à la pièce.

Une pièce d'acier est très rarement utilisée à l'état simplement trempé car elle est souvent plus dure. De plus, elle est très fragile, car elle est le siège de contraintes mécaniques importantes...

✓ **Buts de revenu**

D'une manière générale, le revenu permet de diminuer les effets néfastes de la trempe (corriger les défauts causés par la trempe) : fragilité de la pièce et les contraintes internes en rendant la pièce plus ductile et plus tenace. Il peut dans des cas particuliers permettre un durcissement secondaire.

Le but du revenu est donc :

- D'abaisser la résistance à la traction R_m , la dureté HB, HRC ;
- D'élever la résilience K, la ductilité A%.

✓ **Le cycle thermique de revenu comprend :**

- chauffage de la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de début de transformation de phase de l'acier $\sim 700^\circ\text{C}$)
- un maintien de la pièce à cette température pendant un temps donné
- un refroidissement approprié.

✓ Remarque

Le revenu fait chuter considérablement la dureté d'une pièce, pour limiter ce phénomène il faut maintenir la température (environ une heure).

On peut aussi effectuer un revenu de détente qui a pour but d'éliminer les contraintes dues à la trempe, il s'effectue à une température comprise entre 100 et 200°C.

IV. 2. Traitements thermochimiques de diffusion

Le traitement thermochimique (la trempe superficielle) est la saturation superficielle de métal (acier) en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée. C'est à dire on utilise les traitements thermochimiques, dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté plus élevée à la surface et une ductilité plus grande au cœur de la pièce. Tous les traitements thermiques envisagés se déroulent sans changement de composition chimique. Tandis que les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique.

Pour effectuer cette trempe superficielle il faut chauffer localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à température d'austénitisation, puis on refroidit avec une vitesse suffisante pour obtenir une trempe (apparition de martensite).

IV. 1. La cémentation

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier (c'est à dire l'enrichissement de cette couche superficielle (1 à 2 mm) de la pièce par le carbone) afin d'obtenir après trempe une bonne résistance à l'usure et à la fatigue. La cémentation est l'enrichissement de la couche superficielle (1 à 2 mm) de la pièce par le carbone afin d'obtenir après trempe une bonne résistance à l'usure et à la fatigue. La température de cémentation est de 920°C pour que la structure soit austénitique.

pour effectuer une cémentation il faut :

- Effectuer un recuit avant.
- Effectuer une trempe juste après.
- Effectuer un revenu après la trempe.

Seules les pièces à cœur ductile, soit un pourcentage de carbone inférieur à 0.3%, peuvent être cémentées car il faut que l'élévation de la dureté et de la résistance des couches superficielles qui entraînent une fragilité importante soit compensées.

Par exemple les aciers non alliés (C10- C20), les aciers au CrMo (18CrMo4) ou les aciers au

NiCr (20NiCr6).

Recuit → Cémentation → Trempe → Revenu

Les agents de cémentation peuvent être solides, liquides ou gazeux.

a. Cémentation en caisse

Les ciments solides sont des mélanges à base de matières carbonées aptes à former les gaz ou les espèces carburantes (CO). La cémentation se fait en vase clos pour éviter que les gaz ne s'échappent, d'où le nom de cémentation en caisse donné à ce procédé qui est peu utilisé actuellement et il est réservé au traitement de grosses pièces ou de séries limitées de petites pièces.

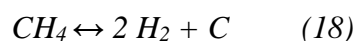
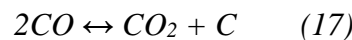
b. Cémentation liquide

Les ciments liquides sont à base de cyanure ou de Ferro-cyanures fondus. Les pièces sont immergées dans le bain de sel fondu à la température choisie pour la réaction chimique et la diffusion.

c. Cémentation gazeuse

La cémentation gazeuse est la plus employée. Elle se fait industriellement à partir d'atmosphères obtenues par instillation et décomposition à chaud de liquides organiques tels que le méthanol, l'éthanol utilisés purs ou dilués, ou par combustion d'hydrocarbures.

Les gaz tels que l'oxyde de carbone et le méthane réagissent à chaud à la surface de l'acier, de telle sorte que le carbone libre libéré s'insère dans le réseau cubique à faces centrées du fer, ils donnent avec l'austénite des équilibres réversibles.



IV. 2. 2. La nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique de diffusion de l'azote atomique dans le Fe_{α} . C'est un procédé de durcissement superficiel appliqué à l'acier permettant d'obtenir des duretés plus élevées que celles obtenues par cémentation.

La nitruration consiste à saturer en azote, la surface de l'acier dans le milieu ammoniacque.

Elle permet :

- D'augmenter la dureté de la couche superficielle (en surface) ;
- D'augmenter la résistance à l'usure et au grippage ;
- D'augmenter la limite de fatigue ;

- D'augmenter la résistance à la corrosion dans des milieux comme l'atmosphère, l'eau, la vapeur etc.

Elle a lieu à environ 500°C, sur une profondeur allant de quelques dizaines de microns (jusqu'à 1300 HV) à quelques dixièmes de millimètres (de 400 HV à 900 HV).

Les différentes nitrurations sont :

a. Nitruration gazeuse : la dureté est obtenue par formation de nitrure d'aluminium et de chrome sur la pièce ;

b. Nitruration liquide : la dureté est obtenue par formation de nitrure d'aluminium et de chrome sur la pièce ;

c. Nitruration ionique : la dureté est obtenue par formation de nitrure de fer et par diffusion de l'azote.

Les aciers de nitruration gazeuse ou liquide doivent contenir de l'aluminium ou du chrome (30CrMo12- 30CrAlMo6-12), pour la nitruration ionique tous les aciers sont compatibles.

Recuit → Trempe → Revenu → Nitruration

IV. 2. 3. La carbonitruration

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse ($\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$), autrement dit, à cémenter simultanément l'acier par du carbone et de l'azote. Elle est essentiellement une cémentation et non une nitruration permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. L'azote permet de réduire la température de la cémentation (car diminution de la température de formation de l'austénite) donc économie d'énergie, ainsi elle a lieu entre 600 et 880°C. Le durcissement de la couche carbonitrurée (0.1 mm) est obtenu par une trempe directe (on effectue la trempe directement à partir de la température de carbonitruration), ainsi la dureté atteint 850 HV.

Ce traitement est suivi d'une trempe. Ce procédé est donc un compromis entre la cémentation et la nitruration. Le durcissement provient surtout de la cémentation par carburation de la couche superficielle des pièces. Elle est pratiquée pour des pièces d'articulations, les engrenages, les arbres.

Recuit → Carbonitruration → Trempe → Revenu

Chapitre V : propriétés mécaniques des matériaux

Objectifs du chapitre

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Connaître les corrélations propriétés-comportement;
- Choisir, pour une application donnée, les propriétés permettant de satisfaire les fonctions de service visés ;
- Connaître les principes et les modes opératoires des essais mécaniques.
- Déterminer les caractéristiques mécaniques associées à partir des résultats expérimentaux de chaque essai.

Une propriété mécanique est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques.

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Afin que l'objet technique remplisse sa fonction globale et résiste aux différentes contraintes qu'il subit, il est important de sélectionner les matériaux adéquats.

Tous les matériaux ont une limite à pouvoir se déformer ou à résister à la déformation. Lorsque les contraintes appliquées sont trop grandes, elles entraînent une déformation permanente ou une rupture du matériau.

V.I. Définitions

V.I.1. La ductilité

La ductilité est la capacité d'un matériau de se déformer, plus précisément de s'étirer, sans rompre et de conserver sa nouvelle forme. La plupart des métaux et alliages possèdent une excellente ductilité. C'est pourquoi ces matériaux sont fréquemment sélectionnés pour la fabrication de fils ou de câbles. Exemple : En usine, on fait passer une épaisse tige de cuivre dans un système de poulies qui l'étire pour obtenir un long fil mince (Figure V. 1).

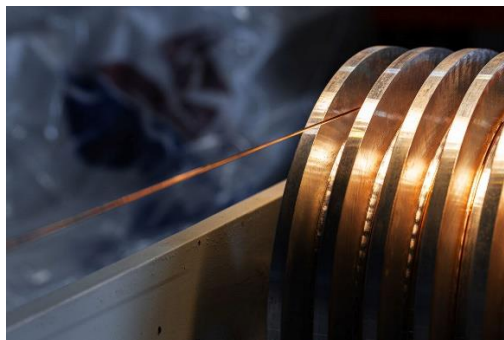


Figure V.1. Fabrication d'un fil de cuivre

Les matériaux tels que les bois et les céramiques ne sont pas ductiles puisqu'ils ne s'étirent pas. Généralement, les matériaux qui sont ductiles sont aussi malléables.

V.I.2. La dureté

La dureté est la capacité d'un matériau à résister à la pénétration et au rayement. Les céramiques, plusieurs métaux et leurs alliages, ainsi que certaines matières plastiques, ont une bonne dureté. On retrouve ces matériaux en abondance dans le domaine de la construction comme matériaux de finition, car leur surface reste intacte au fil du temps. La dureté des bois varie en fonction de leur essence. Exemple : La dureté de la céramique de porcelaine en fait un choix durable de couvre-plancher sur lequel on souhaite éviter les égratignures (Figure V.2.).

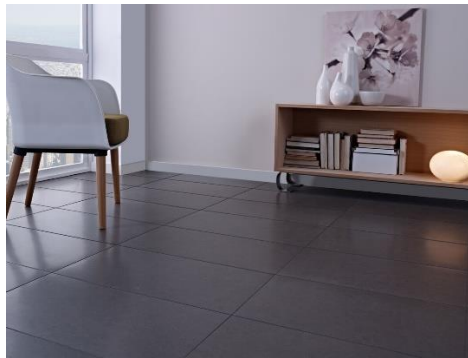


Figure V.2. Un couvre-plancher en tuile de céramique

La dureté des matériaux permet également de choisir l'outil approprié afin de réaliser une entaille ou un découpage. En effet, la dureté de l'outil utilisé devra être supérieure à celle du matériau découpé. Exemple : Le diamant est la substance naturelle ayant la dureté la plus élevée. Il est possible de l'utiliser afin de couper des morceaux de verre (Figure V.3.). Puisque le diamant est plus dur que le verre, il y pénètre et y laisse une rayure. Pour cette raison, on retrouve de petits morceaux de diamants sur la lame du coupe-verre.



Figure V.3. Diamant de dureté la plus élevée utilisé pour couper des morceaux de verre

V.I.3. L'élasticité

L'élasticité est la capacité d'un matériau à se déformer, puis à reprendre sa forme initiale après avoir subi une déformation. Plusieurs matières plastiques et certains matériaux composites ont une bonne élasticité. Après une déformation, il est possible de redonner sa forme initiale à certains matériaux à condition d'appliquer une contrainte. Toutefois, puisqu'il ne s'agit pas d'une réponse spontanée de ces matériaux, ces derniers ne sont pas considérés comme élastiques. Il ne faut pas confondre l'élasticité avec la malléabilité et la ductilité. En effet, ces dernières propriétés impliquent que le matériau puisse se déformer, puis conserver sa nouvelle forme. Un matériau ductile ou malléable ne peut être élastique, puisqu'il ne peut reprendre sa forme initiale par lui-même.

V.I.4. La fragilité

La fragilité est la capacité d'un matériau à se casser lorsqu'il est soumis à des contraintes.

Les céramiques telles que le verre ou la porcelaine sont des matériaux qui ont une bonne fragilité. Lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques, les céramiques se fissurent ou se cassent avant d'être déformées.

La fragilité du verre en fait un bon choix pour la porte de cette armoire à extincteur et boyau d'incendie. En cas d'urgence, il est possible de casser le verre pour accéder au contenu de l'armoire. Exemple : La fragilité du verre en fait un bon choix pour la porte de cette armoire à extincteur et boyau d'incendie. En cas d'urgence, il est possible de casser le verre pour accéder au contenu de l'armoire (Figure V.4.).



Figure V.4. Porte d'une armoire d'extinction d'incendie en verre

Lorsqu'un matériau est soumis à des contraintes répétitives, cela peut augmenter sa fragilité. Plus la force des contraintes est élevée, moins le matériau peut en supporter les répétitions. Dans ce cas, on parle de fatigue mécanique. Par exemple, lorsqu'on déplie et replie un trombone plusieurs fois, il finit

par se casser. Généralement, les matériaux qui sont fragiles ne sont ni ductiles ni malléables, mais ils peuvent être rigides.

V.I.5. La malléabilité

La malléabilité est la capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre et à conserver sa nouvelle forme. Ainsi, il peut être aplati, courbé ou plié. La plupart des métaux et alliages possèdent une bonne malléabilité. C'est pourquoi ces matériaux sont fréquemment sélectionnés pour les emballages alimentaires et la joaillerie.

Exemple : La malléabilité de l'aluminium permet de le laminer en feuilles. Les feuilles d'aluminium sont ensuite pliées pour obtenir des contenants alimentaires (Figure V.5.).



Figure V.5. Contenants alimentaires en aluminium

En bijouterie (Figure V.6.), l'or est un métal utilisé pour sa grande malléabilité. On peut lui donner des formes très variées.



Figure V.6. Bijoux de formes variées en or

Pour être malléable, le matériau doit conserver la nouvelle forme qu'on lui a donnée. Par exemple, si on écrase une canette d'aluminium, elle conserve sa nouvelle forme aplatie. À l'opposé, une éponge écrasée reprend sa forme initiale. L'éponge n'est pas malléable, elle est plutôt élastique. Généralement, les matériaux qui sont malléables sont aussi ductiles.

V.I.6. La résilience

La résilience est la capacité d'un matériau à résister aux contraintes intenses et brusques. Les matières plastiques et certains matériaux composites sont des exemples de matériaux d'une grande résilience. Ces matériaux ont tendance à absorber l'énergie d'un impact sans se déformer ou très peu. Cela en fait d'excellents choix pour les équipements de protection, les articles de sport ou encore les jouets d'enfants.

Exemple :

La résilience de la fibre de verre en fait un bon choix pour un casque de moto (Figure V.7.) . Un agencement de plusieurs couches de fibre de verre protège la tête du conducteur contre les impacts.



Figure V.7. Casque de moto

Les matériaux qui ont une bonne résilience ne sont pas fragiles.

V.I.7. La rigidité

La rigidité est la capacité d'un matériau à résister à la déformation lorsqu'il est soumis à des contraintes.

On retrouve des matériaux d'une bonne rigidité dans tous les types de matériaux. Par exemple, le noyer (bois), le plexiglas (plastique) et le contreplaqué (matériau composite) sont rigides. Ces matériaux conservent leur forme, c'est-à-dire qu'ils ne plient pas, ne s'étirent pas et ne se courbent pas. Cela en fait de bons choix pour des structures qui supportent des charges élevées comme les bâtiments, les maisons et les ponts.

Exemple : La rigidité du béton armé en fait un bon choix pour la fabrication d'un pont. Le pont doit résister aux contraintes appliquées par le poids des voitures qui y circulent (Figure V.8.).



Figure V.8. Chantier de construction d'un pont en béton armé

La rigidité du bois en fait un bon choix pour la charpente d'une maison. Les poutres et solives de bois soutiennent le poids des planchers, des murs et du toit (Figure V.9.).



Figure V.9. Structure de toit en bois

Généralement, les matériaux qui sont rigides ne sont ni ductiles ni malléables, mais ils peuvent être fragiles.

V.II. Essais mécaniques

V.II.1. Essai de dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise.

1. Objectif et principe de dureté

La dureté est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétrateur-surface indentée, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. Le tableau 2. Résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.

2. Eprouvettes

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau au chauffage ou à, l'écouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.

3. Exécution de l'essai

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell.

4. Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbures de tungstène de 10 mm de diamètre D (mm) sous une charge F (N) de 4092 ou 29411 N (500 ou 3000Kgf). La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal. et à mesurer le diamètre d (mm) de l'empreinte résiduelle après retrait de la charge. La charge d'essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée au diamètre de l'indenteur et au matériau testé.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (19)$$

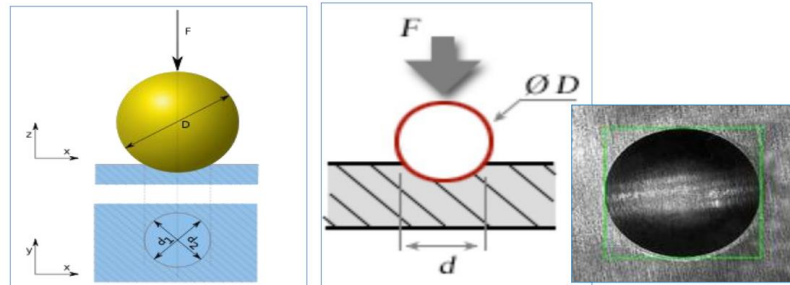


Figure V.10. Principe de l'essai Brinell et empreinte typique de l'essai

5. Essai Vickers

La dureté Vickers a été conçue dans les années 1920 par les ingénieurs de la société Vickers en Angleterre. Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge donnée durant 15 secondes. Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'un angle au sommet entre faces opposées égales à 136° . La charge appliquée est comprise entre 9.80 et 1176 N (1 et 120 Kgf). Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm. les mesures s'effectuant à l'aide d'un appareil optique approprié (microscope) ou à afficheur directe dans les nouvelles générations des bancs d'essais.

La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854 F}{D^2} \quad (20)$$

où F est la charge appliquée en N et D, la diagonale de l'empreinte en millimètres. La profondeur de pénétration H est $H = D / 7$.

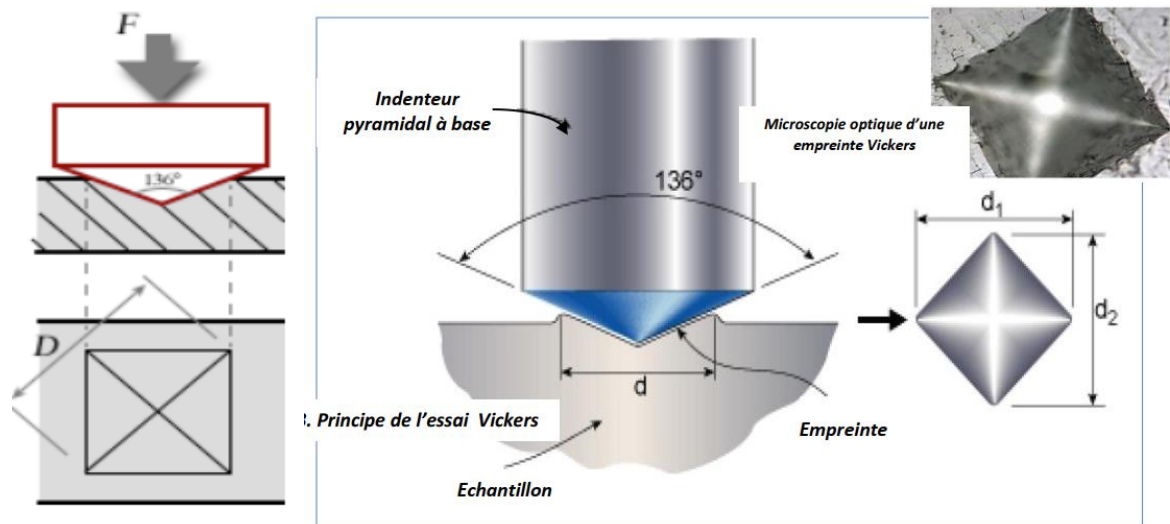


Figure V.11. Principe de l'essai Vickers

6. Essai Rockwell

La norme de dureté Rockwell date de 1932. le pénétrateur est soit une bielle en acier trempé appelé dureté Rockwell B (**HRB**), soit un cône en diamant de 120° , dureté Rockwell C (**HRC**). La charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs.

L'essai consiste à appliquer une précharge de 100 N sur le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce qui s'enfonce d'une profondeur e_0 . On applique une force supplémentaire F , pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur e_1 . On supprime la force F , le cône reste enfoncé d'une profondeur e_2 . La profondeur rémanente ($e_2 - e_0$) permet le calcul de la dureté selon la formule :

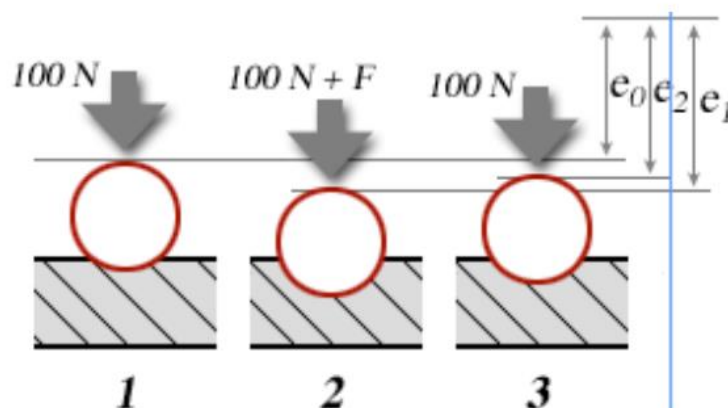


Figure V.12. Principe de l'essai Rockwell

Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué

ROCKWELL C

$$HRC = 500(100 - (e_2 - e_0)) \quad (21)$$

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique (Ø 0,2 mm). La charge F est de 1400 N (150 kgf).

ROCKWELL B

$$HRB = 500(130 - (e_2 - e_0)) \quad (22)$$

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre. La charge F est de 900 N (100 kgf) (Figure V.12).

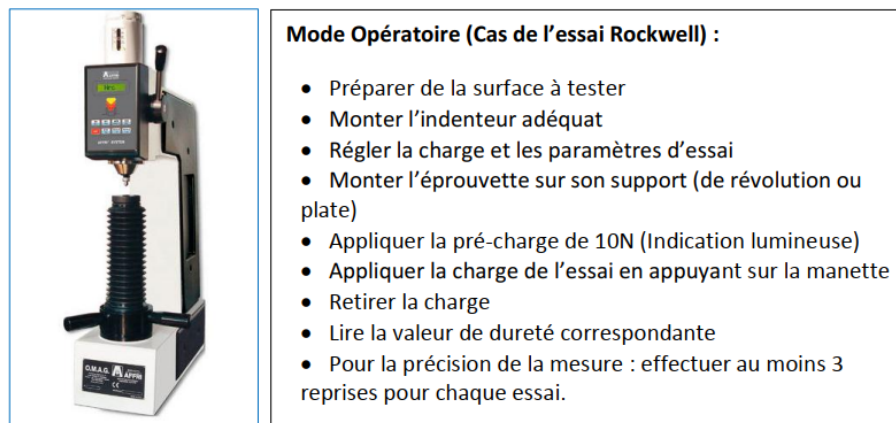



Figure V.12. Mode opératoire de l'essai Rockwell

V.II.2. Microdureté Vickers.

Par Analogie à un essai Vickers, l'échelle microscopique de l'essai s'effectue sous une charge de quelques grammes à quelques centaines de grammes. L'appareil utilisé (Figure V.13.) comporte une colonne de microscope optique en réflexion, qui permet de viser la zone souhaitée sur un échantillon poli. Le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte : de quelques µm à quelques dizaines de µm. On peut ainsi mesurer par exemple la dureté des différentes phases d'un matériau ou le profil de dureté obtenu sur une surface traitée ou usinée.



Dureté sous charge réduite et microdureté Vickers			
Dureté sous charge réduite		Microdureté	
Désignation	Charge (N)	Désignation	Charge (N)
HV _{0,2}	1,961	HV _{0,01}	0,09807
HV _{0,3}	2,942	HV _{0,015}	0,1471
HV _{0,5}	4,903	HV _{0,02}	0,1961
HV ₁	9,807	HV _{0,025}	0,2452
HV ₂	19,61	HV _{0,05}	0,4903
HV ₃	29,42	HV _{0,1}	0,9807

Figure V.13. Dispositif de microdureté Vickers et correspondance en charge des différentes échelles de l'essai

V.II.3. Essai de traction

1. Objectifs de l'essai

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai de traction permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module de d'élasticité, le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

2. Principe de l'essai

L'essai de traction est exécuté sur des éprouvettes du matériau concerné de forme de barreau cylindrique ou prismatique prolongées comportant de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation dans une machine de traction. et une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_0 . L'essai est effectué à la température ambiante entre 10°C et 35°C.

Des essais de traction peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température.

3. Eprouvette

La forme et les dimensions des éprouvettes (Figure V.14.) dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est obtenue par usinage d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées.

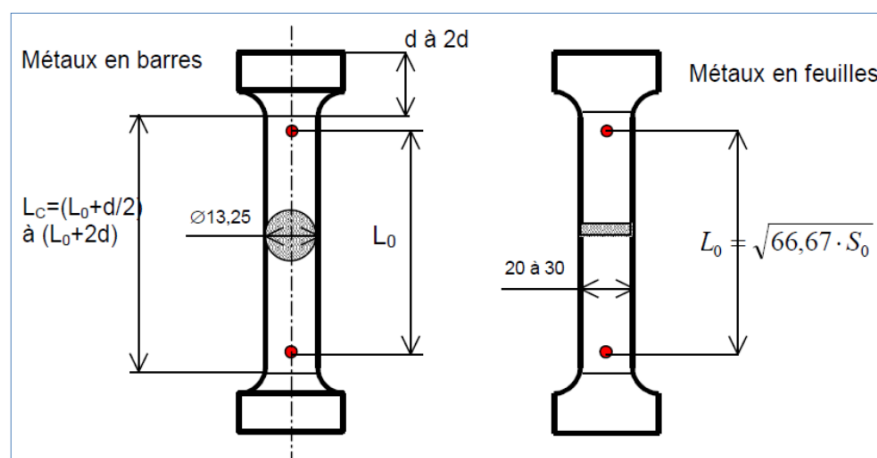


Figure V.14. Dimension de l'échantillon pour l'essai de traction

4. Machines d'essais

La machine de traction moderne (Figure V.15.) dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle est équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système de démarrage. Le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples grâce à l'usage de micro-ordinateur. Le contrôle des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches est déterminé par des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents.



Figure V.15. Machine de traction

5. Exécution de l'essai

La machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile.

Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette (Figure V.16.) est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction, $F=F(\Delta L)$, caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.

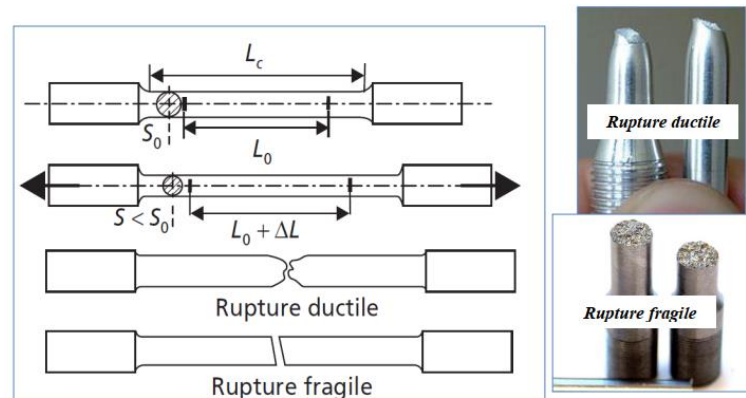


Figure V.16. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.

6. Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation.

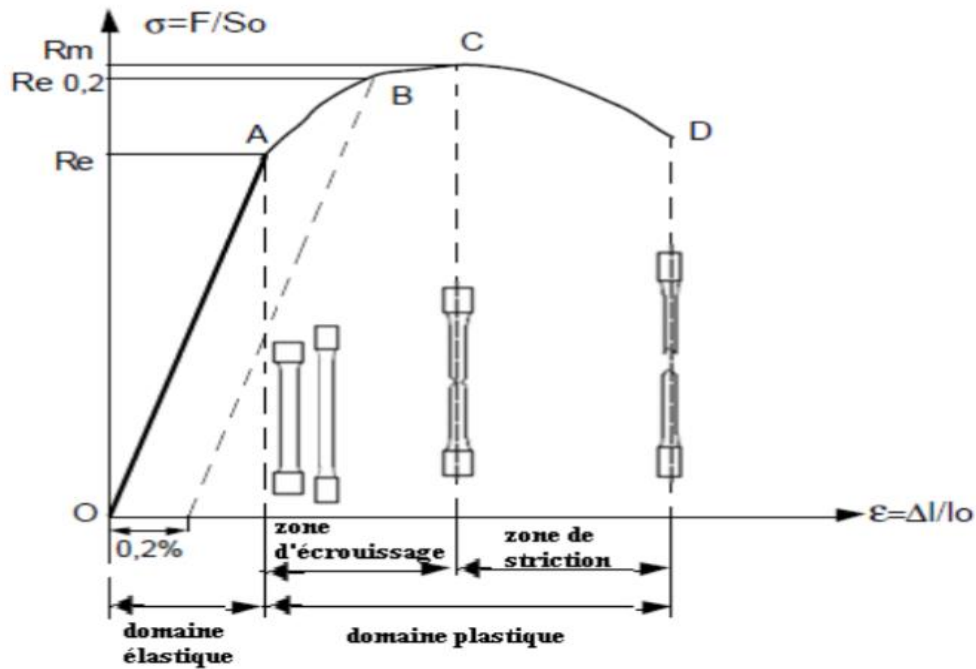


Figure V.17. Diagramme de traction

On remarque que le diagramme (Figure V.17.)se divise en 3 domaine:

- OA : domaine élastique à déformation réversible, le point A marque la limite du domaine élastique ;
- AC : domaine de déformation permanent homogène ou de déformation plastique répartie ; le point C représente a charge maximale et le début de la striction ;
- CD : domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; D point de rupture de l'éprouvette ;

7. Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction :

- **La limite d'élasticité R_e (MPa) :**

$R_e = F_e / S_0$: limite apparente d'élasticité (MPa) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (23)$$

- **$R_{p0,2}$:** limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique , sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.
- **La résistance à la traction R_m (MPa) :**

$R_m = F_m / S_0$: résistance à la traction (MPa).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (24)$$

➤ **La Striction :**

Z% : Coefficient de Striction, Avec **S_u** : la section à la rupture :

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (25)$$

➤ **L'allongement A% (%) :**

A % = $\Delta L_u / L_i$: allongement pour cent après rupture (%) :

$$A\% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (26)$$

➤ **Le module d'Young E (MPa) :**

E = Re/ε : module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.

➤ **Coefficient de Poisson :**

Tout matériau qui va s'allonger dans un sens va forcément rétrécir dans l'autre sens. Cela est dû à la conservation de la matière. Une éprouvette qui s'allonge va donc voir son diamètre diminuer. En notant ϵ l'allongement longitudinal et ϵ_r l'allongement transversale, on peut exprimer le coefficient de Poisson :

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon} \quad (27)$$

V.II.4. Essai de résilience

L'essai de résilience est un complément à l'essai de traction. Il s'agit de rompre en un seul coup une éprouvette entaillée afin de mesurer l'énergie nécessaire pour effectuer cette rupture. Cet essai est réalisé sur un mouton-pendule

2. Objectif de l'essai

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont :

- Le triaxialité des contraintes ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation.

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc du mouton pendule une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé. La résistance aux chocs, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{Energie absorbée par la rupture (J)}}{\text{Section au droit de l'entaille (Cm}^2\text{)}} \quad (10)$$

2. L'éprouvette de résilience

L'essai est fait sur deux type d'éprouvette (Figure V.18.). On utilise les éprouvettes dont les dimensions sont normalisées.

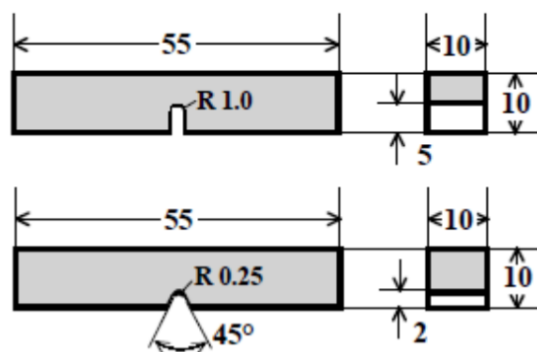


Figure V.18. Types d'éprouvette de résilience

3. Principe de l'essai

Un marteau de masse m est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figures V.19 et V.20). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ mgh_0 , h étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur h_1), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle mgh_1 . L'énergie K dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors :

$$KV = mg(h_0 - h_1) \quad (m.g : \text{le poids du pendule})$$

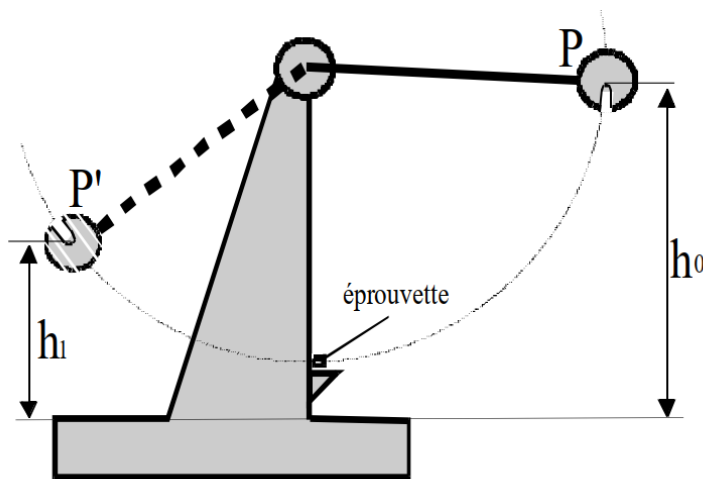


Figure V.19. Le mouton Charpy

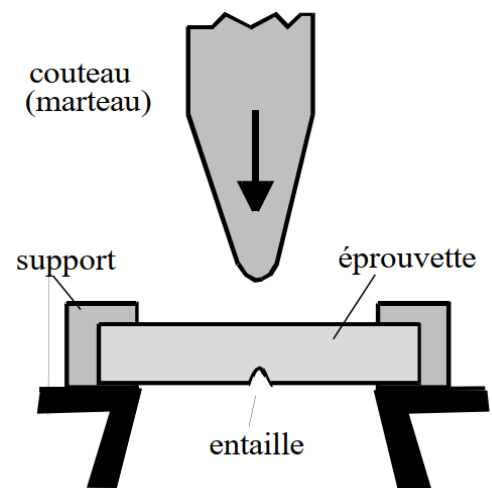


Figure V.20. Appui de l'éprouvette vue d'en haut.

V.II.5. Essai de compression

1. But de l'essai

- Détermination de la contrainte limite en compression pour les matériaux fragiles
- Construction de la courbe de compression
- Tracer le schéma de l'éprouvette avant et après déformation ou rupture.

2. Réalisation de l'essai

L'essai de compression est une méthode simple qui consiste à appliquer deux forces opposées sur une éprouvette cylindrique ou prismatique (Figure V.21). Il est principalement utilisé pour tester les matériaux fragiles (céramiques, verres, pierres, fonte) car les matériaux ductiles ne se brisent pas sous compression. Les machines utilisées sont souvent les mêmes que celles des essais de traction. Cependant, ces essais sont moins courants que ceux de traction, car pour les matériaux ductiles, ils fournissent des résultats similaires en termes de module de Young et limite d'élasticité. De plus, ces matériaux ne présentent pas de rupture nette sous compression, ce qui rend difficile la détermination de leur résistance ultime et de leurs propriétés de ductilité. Ainsi, l'essai de compression est surtout pertinent pour les matériaux fragiles, dont la résistance à la compression est bien supérieure à celle à la traction.

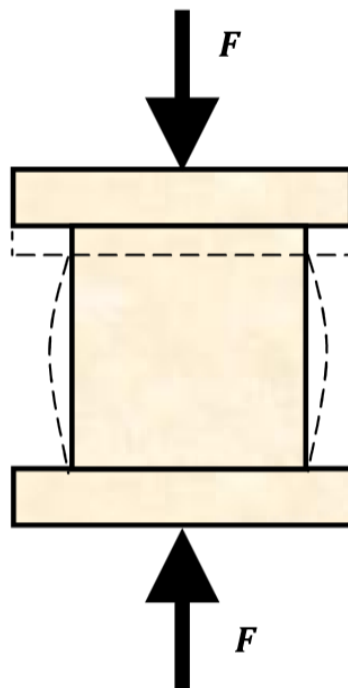


Figure V.21. Principe de l'essai de compression

3. Eprouvettes standardisées utilisées dans l'essai de compression

➤ Il existe trois types d'éprouvettes standardisées pour les essais de compression :

Eprouvettes longues dont la longueur est de l'ordre de 8 à 10 fois le diamètre de la section droite de l'éprouvette ($l_0 = 8d \div 10d_0$) ; elles sont utilisées pour représenter schématiquement le comportement contrainte – déformation d'un matériau donné et d'en déterminer les limites de proportionnalité et de d'écoulement.

➤ Eprouvettes moyennes dont la longueur est égale à trois fois le diamètre de la Section ($l_0 = 3d_0$) ; elles sont utilisées pour la détermination de la résistance à la traction.

➤ Eprouvettes courtes ($l_0 = 0,9 d_0$) ; utilisées pour l'essai des métaux destinés à la fabrication des supports afin d'estimer l'influence du frottement sur ces derniers.

Les éprouvettes utilisées dans l'essai de compression doivent remplir les conditions suivantes :

➤ La longueur de l'éprouvette ne doit pas dépasser dix fois son diamètre ($l_0 \leq 10 d_0$), afin d'éviter le phénomène de flambement.

➤ Les faces de l'éprouvette (en contact avec les plateaux de la machine) doivent être bien polies, planes, parallèles et perpendiculaires à son axe, afin que le chargement soit axial et que les forces de frottement soient réduites au minimum.

4. Comportements des matériaux sous charge de compression

Lors de la compression d'une éprouvette cylindrique en acier (Figure V.22.) à bas carbone, elle prend la forme d'un tonneau :

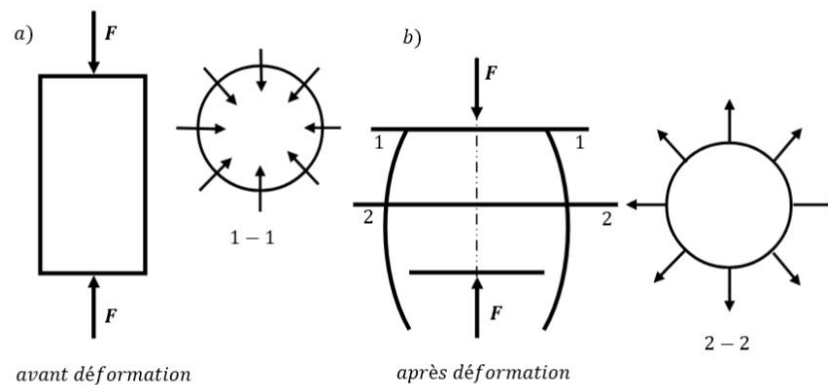


Figure V.22. Compression d'une éprouvette cylindrique en acier

La courbe de compression obtenue pour ce matériau est présentée à la figure V.23 suivante.

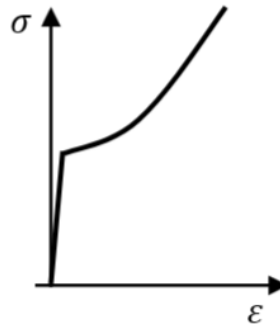


Figure V.23. Courbe de compression obtenue pour cet acier

Le type de rupture d'une éprouvette en fonte soumise à la compression axiale et la courbe de compression lui correspondant sont présentés sur la figure V.24. suivante :

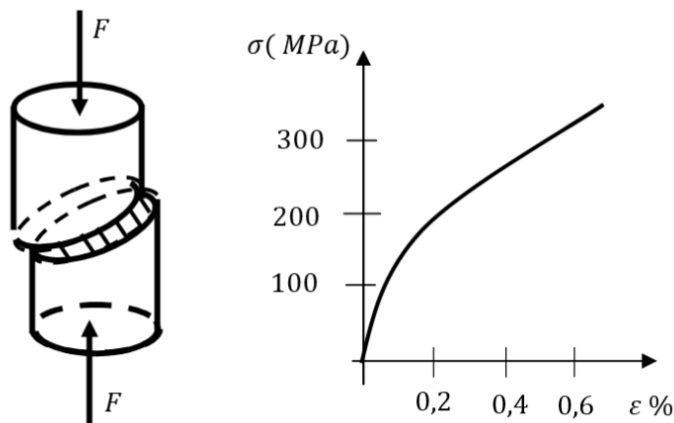


Figure V.24. Rupture d'une éprouvette en fonte soumise à la compression axiale et sa courbe de compression

5. Diagramme contrainte -déformation

La courbe de compression varie selon la nature du matériau :

- **Métaux ductiles** : Ne se rompent pas, l'essai s'arrête après de grandes déformations plastiques ou lorsque la charge maximale de la machine est atteinte.
- **Métaux semi-ductiles** : Peuvent atteindre une résistance ultime ; la présence d'un palier d'écoulement dépend du traitement du métal.
- **Matériaux fragiles** : Pas de palier d'écoulement, seule la contrainte ultime à la compression peut être calculée.

Les équations donnant respectivement la contrainte et la déformation de compression s'écrivent alors :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}; \quad (11)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

Ou F est la charge de compression ;

S₀ est la section initiale de l'éprouvette ;

L₀ est la longueur initiale de l'éprouvette ;

Δl est la variation de la longueur.

La contrainte et déformation réelles s'écrivent respectivement :

$$\sigma_{ré} = \frac{F}{S} \quad (13)$$

$$\epsilon_{ré} = \ln \frac{S}{S_0}; \quad (14)$$

Références bibliographiques

1. Sylvie Pommier, Science des Matériaux, Université pierre et marie curie, GNS CACHAN 2005-2006.
2. Aneflous Latifa, cristallographie, Faculté des sciences Agadir, 15/12/2011.
3. Jean-louis fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, Nathan, 2001.
4. Abbas Belfar, Cours et exercices de Cristallographie, Université de sciences et de technologie ORON (USTO) , 2014/2015
5. Hakima Yahi, Cristallographie, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017
6. Michel Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, 2004, 2008
7. David R. H. Jones, matériaux propriétés, applications et conception, Dunod, Paris, 2013
8. Christine Brassine, Connaissance des Matériaux Métalliques, Université de Liège, Métallurgie et Science des Matériaux, 04/366.91.10
9. Fabienne Delaunois, Science Des Matériaux 1 –2eme Partie : Connaissance Des Matériaux Métalliques, Faculté Polytechnique De Mons Service De Métallurgie, 2007-2008
10. Saïd Benmokhtar, Cours De Diagramme De Phases, Université Hassan 2 Mohammedia, 2013
11. C. Saury, Chapitre T7 : Les équilibres de phases dans les mélanges binaires solide-liquide, Document de cours MathSpé PC 2013-2014
12. P. Millet, Diagrammes de Phases, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010
13. Gilles OLIVE, Chimie des Matériaux, Ecole Industrielle et commerciale de NAMUR, 3ème Edition 07/01/2005
14. Saïd Bensaada (université de Biskra), Sciences des matériaux tome1 et 2 OPU, 2012
15. Arfaoui Ali, Chaker Med Amir, Matériaux Métalliques, chapitre 5 : Diagramme D'équilibre des alliages Fer-Carbone, ISET Kasserine 2009-2010
16. Hidouri Abdelmoumen, Cours De Matériaux Métalliques, ISET Gafsa, 2016-2017
17. Messaoui Mosbah, Support De Cours Matériaux Métalliques, ISET de Gafsa 2014-2015
18. Karl-Heinrich Grote Erik K. Antonsson : Springer Handbook of Mechanical Engineering, (Materials Science and Engineering), Springer Berlin Heidelberg, Germany 2009.
19. Dmitri kopeliovich : Effect of alloying elements on steel properties, Substances and Technologies 2009.
20. Francois Cardarelli : Materials Handbook (Ferrous Metals and Their Alloys), Chemistry and Materials Science, Springer London 2008.
21. W. Callister ; Science et génie des matériaux ; Dunod. 2003

22. F. Ashby ; Matériaux : T1 Propriétés, applications et conception, Collection : Sciences Sup, Dunod. 2013
23. F. Ashby ; Matériaux : T2 Microstructures, mise en oeuvre et conception, Collection : Sciences Sup, Dunod, 2014
24. J.M. Dorlot ; Des matériaux, Presses internationales Polytechnique, 2002
25. J. Gordon ; Structures et matériaux : L'explication mécanique des forms, 1994
26. Benjamin Martin, Résumé de cours« Matériaux » Publié sur <http://www.ifrance.com/espace-prepa/>
27. Michael F.Ashby et David R.H.Jones – Matériaux, propriétés et applications – Edition DUNOD, Paris(1998).
28. Document usine N°2, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de traction – NF10002-1 (1990)
29. Document usine N°3, Contrôle qualité – Matériaux métalliques, Essai de dureté – ISO 409/1(1982) Document usine N°7,
30. Contrôle qualité – Acier – Essai de résilience Charpy (entaille en V)ISO 148 (1983) et (entaille en U) ISO 83 (1976)
31. C.D.Thenon, J.Duvalloir, « TRE Instrumentation d'un choc Charpy», Ecole des mines de Paris, (2002).
32. Paulbailon, J.Mariedorlot . « des matériaux »,3eme édition 2000-2001.
33. GUERIRA BelhI, polycopie de resistance des matériaux, Université Mohamed Khider – Biskra (2017)

Résumé

La science des matériaux repose sur la relation entre les propriétés, la morphologie structurale et la mise en œuvre des matériaux qui constituent les objets qui nous entourent (métaux, polymères, semi-conducteurs, céramiques, composites, etc.). Elle est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques. 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.

Mots clés: Propriétés des matériaux, Structure et morphologie, Procédés de fabrication, Sélection des matériaux, classification des matériaux.

المخلص

الترجمة إلى العربية:

تعتمد علم المواد على العلاقة بين الخصائص، والبنية المورفولوجية (التركيبية)، وطرق تصنيع المواد التي تُكوّن الأشياء التي تحيط بنا (المعادن، البوليمرات، أشباه الموصلات، السيراميك، المواد المركبة، وغيرها). ويُعد هذا العلم في صميم العديد من الثورات التقنية الكبرى. تُشكّل المواد الأساس الذي تقوم عليه التكنولوجيا والعالم الصناعي. ويعتمد النجاح التقني والنجاح التجاري للمنتج المصنّع إلى حدٍ كبير على نوعية المادة أو المواد المختارة. إن اختيار مادة ما ليس عادةً عملية سهلة، نظرًا للتنوع الكبير في المواد المتاحة. ويعتمد هذا الاختيار بقدر ما يعتمد على السعر، على الخصائص الذاتية للمادة وعلى عملية التصنيع المعتمدة في إنجاز المنتج. وغالبًا ما يتم اختيار المواد ضمن عمل جماعي يضم الزبون والمصمّم إلى جانب تقنيّ التصنيع.

الكلمات المفتاحية:

خصائص المواد، البنية والمورفولوجيا، عمليات التصنيع، اختيار المواد، تصنيف المواد.

