

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Khider- Biskra

Faculté des sciences et de la technologie

Département : Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique 2^{ème} année

Module :

Sciences des matériaux

Réalisé par : Lemmadi Fatima Zohra

Introduction

Le présent de cours de sciences des matériaux est destiné aux étudiants de la deuxième année du domaine science technologique préparant une licence en génie mécanique

Son contenu permet à l'étudiant de connaître la classification des matériaux ainsi que la notion cristallographique et le diagramme d'équilibre et les traitements thermiques et thermochimique

Ce cours est présenté sous quatre chapitres suivants :

- Chapitre I : Généralités sur les matériaux
- Chapitre II : Diagrammes d'équilibres
- Chapitre III : Diagramme d'équilibre fer-carbone
- Chapitre IV : Traitement thermiques et traitement thermochimiques de diffusion

SOMMAIRE

Chapitre I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX

I.1 Introduction :	1
I.2 Classification des matériaux :	1
I.2.1. les matériaux métalliques :	1
.I.2.1.1 Les matériaux ferreux :	1
I.2.1.2 Les matériaux non ferreux.....	2
I.2.2. les verres et les céramiques :	3
I.2.3. les polymères :	3
I.2.4. les matériaux naturels :	3
I.2.5. les matériaux composites :	3
I.3 Caractéristiques des matériaux:	4
I.3.1 Caractéristiques physiques :	4
I.3.2 Caractéristiques mécaniques :	5
I.3.3 Caractéristiques chimiques :	5
I.3.4 Caractéristiques technologiques :	5
I.4 Notions de cristallographie :	6
I.4.1 Un corps cristallin:	6
I.4.2 Un corps amorphe :	6
I.4.3. Structure cristallins :	7
I.5. Les systèmes cristallin	9
I.5.1 Les quatorze (14)réseaux de Bravais:	11
I.5.2.Les structures cristallines : CC, CFC, HC :	12
I.5.3. Les défauts dans les structures:	15
Chapitre II. DIAGRAMMES D'EQUILIBRES.....	16
II.1. Introduction.....	16
II.2.Cristallisation de matériaux	16
II.2.1 Principe de la cristallisation et courbe de refroidissement	16
II.2.2 Cristallisation d'un métal pur	17
II.2.3 Cristallisation d'un alliage	18
II.3. Diagrammes d'équilibre binaire	19
II.3.1 Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles	19
II.3.2 Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles	20
Chapitre III. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE	21

Sommaire

III.1. Introduction	22
III.2 .Caractéristiques du fer et de carbone :.....	22
III.3 Diagramme d'équilibre fer-carbone	23
III.3.1 Diagramme d'équilibre fer-cémentite	23
III.3.2 Diagramme d'équilibre fer-graphite	25
III.4 Désignation normalisée des aciers et des fontes	25
III.4.1.Désignation des aciers.....	25
III.4.1.1 Désignation des aciers alliés.....	27
III.4.1.1.a Aciers faiblement alliés	28
III.4.1.1.b Aciers fortement alliés	29
III.4.2. Désignation normalisée des fontes	30
Chapitre IV. Traitement thermiques et traitement thermochimiques de diffusion	31
IV.I Introduction	31
IV.2 <i>Traitement thermiques</i>	31
IV.2.1 Recuit.....	32
IV.2.2 Trempe.....	33
IV.2.3 Revenu	34
IV.3 Traitement thermochimiques.....	34
IV.3.1 Cémentation	35
IV.3.2 Nitruration	36
IV.3.3 Carbonitruration	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Chapitre I :
Généralités sur les matériaux

Chapitre I : Généralités sur les matériaux

I.1.Introduction :

Le terme « matériau » désigne la substance dont sont faits les objets manufacturés. Il est plus restreint que le terme « matière », qui désigne les liquides, les gaz et les solides en général. La science des matériaux étudie la matière qui constitue les objets : métaux, polymères, céramiques, ...

La science des matériaux est par essence pluridisciplinaire : physique, chimie, physico-chimie, mécanique, ... Elle est au cœur de beaucoup des grandes révolutions techniques : en génie mécanique, électronique, ...

I.2. Classification des matériaux :

Les principales familles de matériaux : les polymères, les céramiques, les métaux et alliages, et les composites.

I.2.1.les matériaux métalliques :

Ce sont des métaux ou des alliages (mélange) de métaux. (Fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.). On peut distinguer deux sous-groupes qui sont :

I.2.1.1 Les matériaux ferreux : Ce sont des alliages à base de fer (aciers et fontes) ; ils jouent un rôle capital sur le plan technologique. Ils ont un fort module d'élasticité E et une forte limite d'élasticité σ_e , parmi eux on trouve :

- *les aciers d'usage général*, (S355, E335). En fonction de leurs utilisations, ces aciers sont produits sous la forme de profilés (produits longs : les poutrelles, les profilés de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.) ou sous la forme de tôles (produits plats : comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseurs supérieure à 5 mm), les tôles minces pour l'emboutissage).

- *les aciers de traitement thermique*, (C 32, 20 Ni Cr 6, 35 Ni Cr Mo 16), ce sont des aciers au carbone, destinés à subir des traitements thermiques pour aboutir à des caractéristiques bien déterminées selon leurs utilisations.

- *les aciers à outils*, (35 Cr Mo 4, 100 Cr 6), ce sont en général des aciers fortement alliés de chrome (entre 5 et 12 %) pour éviter la corrosion. Ils doivent posséder la dureté la plus élevée possible, une très bonne résistance à l'usure et une grande ténacité.

- **les aciers inoxydables**, (X 45 Cr 13, X 9Cr Ni 12-12) Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée, ils sont utilisés en visserie, pour les ressorts, pour les arbres de pompes, la coutellerie, les soupapes ...

- **les fontes**. (EN-GJL 150, EN-GJS 400-18) ce sont des alliages fer-carbone de très forte teneur en carbone (> 2 %), ce qui les rend fragiles et interdit toute déformation plastique. On les utilise donc principalement en fonderie.(bâtis, la petite quincaillerie, les raccords de plomberie, la fabrication des carters de pompes, des vannes, des vilebrequins, des engrenages

I.2.1.2 Les matériaux non ferreux : Ils incluent tous les métaux et les alliages qui ne contiennent pas de fer, Parmi eux on trouve :

- **l'aluminium et ses alliages** : ce sont des alliages à base d'aluminium principalement utilisés en aéronautique, dans l'industrie alimentaire et cryogénique, pour les articles de sport et les structures utilisées en atmosphère marine.

- **le cuivre et ses alliages** : ce sont des alliages à base de cuivre : parmi eux on trouve les laitons utilisés en fonderie, le cupro-aluminium (construction navale), les cupro-nickels (construction navale), les bronzes (fonderie).

- **le zinc et ses alliages** : ce sont des alliages à base de zinc ayant une faible température de fusion (420°C), et sont largement utilisés dans l'automobile (carburateur, pompe à essences...),

• les **non oxydes** : carbures (carbone + autre élément

I.2.3. les polymères : Les polymères (matières plastiques) sont constitués d'un grand nombre d'unités fondamentales, appelées monomères. Ce sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'un atome de carbone (ou de silicium dans le cas des polymères siliconés). quincaillerie et en mécanique de précision (appareils photographiques, horlogerie...).

- **le titane et ses alliages :** Ce sont des alliages à base de titane, utilisés dans le domaine aéronautique et médical

I.2.2. les céramiques et les verres :

La définition d'une céramique est très vaste, car elle concerne les matériaux solides non métalliques et inorganiques. Le chlorure de sodium et le diamant sont ainsi des céramiques, tout comme la terre cuite ou la porcelaine (sens premier de céramique) il sera sous-entendu que nous parlerons des céramiques industrielles, nommées aussi céramiques techniques. Elles possèdent souvent une **structure cristalline**, mais ce n'est pas obligatoire : **le verre ainsi est une catégorie de céramique**. On distingue deux ensembles :

- les oxydes : SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 ...

I.2.4. les matériaux naturels :

Ce sont des matériaux issue de la nature et qui n'a reçu aucune ou très peu de modifications de l'homme. Il existe 3 types de matériaux naturels :

- Les minéraux
- Les organiques d'origine végétale
- Les organiques d'origine animale

I.2.5. les matériaux composites :

Ce sont des assemblages d'au moins deux matériaux non miscibles. Un matériau composite est constitué de trois éléments principaux :

a- une matrice, généralement une résine thermoplastique (polyamide, PEEK, PEI) ou thermodurcissable (vinylester, polyester, époxyde), qui va servir de liant et va permettre de répartir les contraintes.

b- de fibres minérales ou organiques qui confèrent au matériau l'essentiel de ses propriétés mécaniques. Ces fibres sont coupées (quelques millimètres à quelques décimètres) ou

continues et peuvent être de nature minérale (verre, basalte), synthétique organique (carbone, aramide) ou biosourcée (lin, chanvre).

c- d'additifs afin de modifier certaines caractéristiques du matériau (coloration, surface, propriétés rhéologiques, etc.)

Les composites trouvent leur application dans tous les domaines tels que : l'aéronautique, l'automobile, bâtiment et travaux public, industrie et sport et loisirs.

I.3 Les caractéristiques des matériaux :

Un matériau possède plusieurs caractéristiques qui lui sont propres. Ces caractéristiques sont prises en compte lors de la fabrication d'un objet technique et de son utilisation. Les matériaux peuvent avoir des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques diverses :

I.3.1 Caractéristiques physiques :

Elles se rapportent à :

a) Masse volumique : est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau pour une unité de volume donnée (le litre ou le mètre cube), elle s'exprime en **g par litre** ou **g par mètre cube**..

Exemple : Aluminium = $2,7\text{g/l}$

b Point de fusion : C'est la température à laquelle le métal chauffé passe de l'état solide à l'état liquide ; exemples $T_f \text{ acier}=1300 \text{ à } 1500^\circ\text{C}$; $T_f \text{ Aluminium}=650^\circ\text{C}$

d) Conductivité électrique : La **conductivité électrique** d'un matériau permet de déterminer si le matériau laisse passer ou non le courant électrique. exemple le cuivre est un matériau bon conducteur, le plastique est un matériau mauvais conducteur (isolant)

c) Conductivité thermique : C'est l'aptitude d'un matériau à véhiculer un flux thermique, c'est-à-dire un flux de chaleur, exemple l'Aluminium et le Cuivre possèdent une conductivité thermique élevée.

d) Propriété magnétique :(ferromagnétisme) : C'est l'aptitude d'un matériau à la production d'un champ magnétique, c'est une caractéristique très importante en construction électrique de bobine, moteur, appareils téléphoniques, etc....

e) Propriété acoustique : C'est l'aptitude d'un matériau à transmettre plus ou moins facilement les ondes sonores exemple : la fibre optique possède des propriétés acoustiques élevée.

I.3.2 Caractéristiques mécaniques :

Elles définissent le comportement du matériau pendant l'utilisation, c'est-à-dire elles permettent à l'utilisateur de connaître si ce matériau va résister ou non aux efforts auxquels il serait soumis.

a) Elasticité : L'élasticité d'un matériau est la capacité d'un matériau à être déformable et à reprendre sa forme d'origine après avoir subi une déformation.

b) Ténacité : C'est la résistance aux efforts de traction, de compression, et de cisaillement c'est-à-dire la propriété de s'opposer à l'action destructive des sollicitations extérieures.

c) Dureté : C'est la capacité d'un matériau à résister à la pénétration par un autre matériau.

d) Résilience : C'est l'aptitude d'un matériau à résister au choc.

e) Fragilité : C'est la facilité de rupture (cassure) sous l'action de choc, un corps fragile n'est pas résilient (verre).

I.3.3 Caractéristiques chimiques :

Elles définissent le comportement d'un matériau dans une ambiance où il y a des agents chimiques en contact (gaz, acide, air, etc...), c'est-à-dire est-ce que le matériau va résister ou non à la corrosion par l'oxygène et les agents chimiques.

I.3.4 Caractéristiques technologiques :

Elles expriment l'aptitude d'un matériau à subir les différents procédés de fabrication.

a) Malléabilité : C'est la possibilité de se donner et de se soumettre à la déformation plastique d'un matériau à chaud ou à froid sans se détruire par choc ou par pression.

b) Ductilité : (super malléabilité) c'est l'aptitude d'un matériau à être étiré en fil de faible section.

c) Fusibilité : C'est l'aptitude à passer de l'état solide à l'état liquide.

d) Fluidité : C'est l'aptitude à l'écoulement progressif, un matériau fusible et fluide possède une bonne coulabilité.

e) Soudabilité : C'est l'aptitude d'un matériau à former une liaison intime avec un autre matériau par fusion.

f) Usinabilité : C'est l'aptitude d'un matériau au façonnage par enlèvement de copeaux par outil de coupe.

I.4 Notions de cristallographie : La cristallographie est la science qui se consacre à l'étude des cristaux à l'échelle atomique. Les propriétés physico-chimiques d'un cristal sont étroitement liées à l'arrangement spatial des atomes dans la matière. L'état cristallin est défini par un caractère périodique et ordonné à l'échelle atomique ou moléculaire. Le cristal est obtenu par translation dans toutes les directions d'une unité de base appelée maille élémentaire.

I.4.1 un corps cristallin :

Un corps cristallin est un corps solide qui a une structure réticulaire : les atomes se disposent suivant une configuration à trois dimensions dans laquelle on peut identifier des rangées orientées dans diverses directions sur lesquelles les atomes sont régulièrement

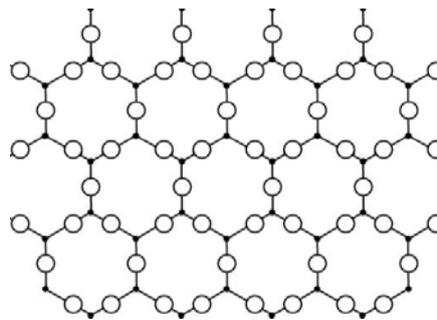


Figure I.1 : Structure réticulaires

I.4.2 Un corps amorphe :

Un solide amorphe est un liquide qui ne coule pas : sa structure atomique est désordonnée comme un liquide mais il est figé et garde sa forme comme un solide. Parmi les matériaux amorphes on peut citer le verre de silice et une multitude d'autres matériaux d'origines extrêmement diverses, comme les verres « mous » : émulsions concentrées, mousses, verres colloïdaux... On les rencontre souvent sur notre table de cuisine, tels la mayonnaise, la mousse au chocolat, ou dans notre salle de bain sous forme de gels et crèmes de beauté diverses. Ces verres « mous » sont capables effectivement de couler si on les force

-Ces matériaux peuvent être obtenus par refroidissement très rapide depuis l'état fondu de l'alliage, ou par d'autres méthodes

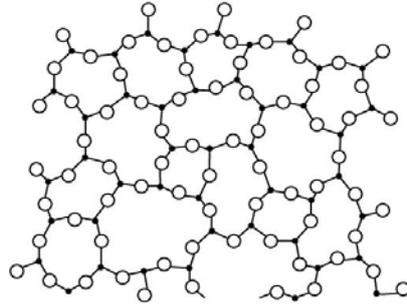


Figure I.2 : structure amorphe

I.4.3. Structure cristalline :

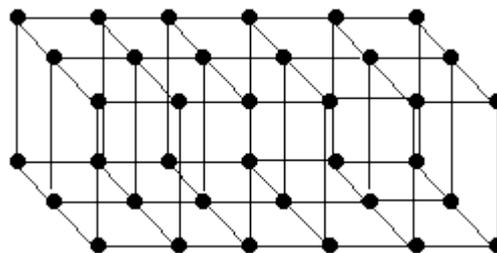
Une structure cristalline est constituée de copies identiques de la même unité physique, appelée motif ou base, située sur tous les nœuds d'un réseau de Bravais.

I.4.3.a Réseau à motif

Il fait référence à une structure périodique même quand l'unité de base n'est pas un objet physique mais un autre ensemble de points.

I.4.3.b. Le réseau cristallin

Activité qui a pour but de construire un modèle de qui représente la structure de la matière minérale cristalline, constituée d'atomes arrangés de manière régulière dans l'espace.



Les sommets de ces parallélépipèdes sont appelés les *noeuds* du réseau,

1. Les droites passant par ces noeuds sont appelés : *rangées*,
2. Le groupement de tous les noeuds en famille de plans parallèles équidistants est appelé *plans réticulaires*,

3. La distance entre deux plans voisins de la même famille est dite *distance interréticulaire*,
4. Le plus petit parallélépipède est appelé *maille* du réseau.

La position, le lieu, de chaque particule est un noeud. (s'appelle un noeud)

On va obtenir une ligne de nœuds:

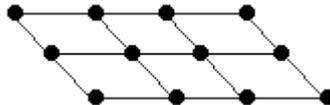


On doit construire plusieurs lignes de noeuds, au moins quatre lignes de noeuds.

- 2 Puis on va les placer parallèlement: une ligne de noeuds parallèle à une autre ligne de noeuds. Parallèles les unes aux autres.

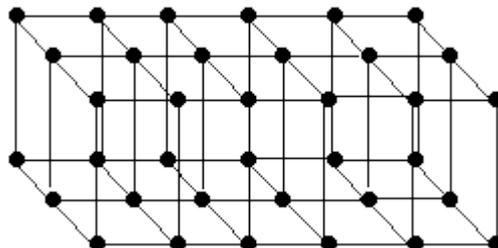
Après on va les relier par des bagettes.

De (telle) sorte qu'on obtient un plan de noeuds:

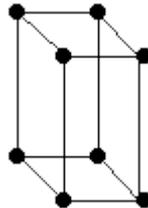


On doit construire, au moins, deux plans de nœuds

- 3 Pour finir, on doit superposer les différents plans que nous avons construit, il faut superposer les plans... et on obtient le réseau cristallin :



Nous pouvons identifier, différencier, isoler une partie du réseau cristallin, qui va définir tout le réseau, c'est la maille élémentaire :

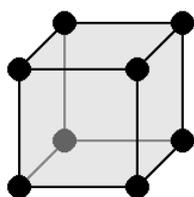


La maille élémentaire est la partie la plus petite conservant les caractéristiques du cristal (une forme polyédrique limitée par des faces planes)

Il y a sept différentes mailles élémentaires qui vont définir les différents réseaux cristallins. et en conséquence les formes des cristaux.

I.5. Les systèmes cristallin :

-Le système cubique (ou isométrique)



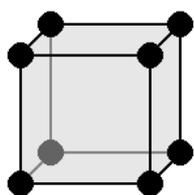
$a = b = c$: les trois axes sont de même longueur

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$: les trois angles sont égaux et droits

Symétries : C, 3 L_4 , 4 L_3 , 6 L_2 , 9 P

L'élément de base est un cube

-Le système quadratique (ou tétragonal)



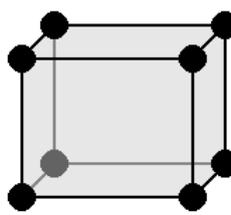
$a = b \neq c$: deux axes sont de même longueur

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$: les trois angles sont égaux et droits

Symétries : C, L_4 , 4 L_2 , 5 P

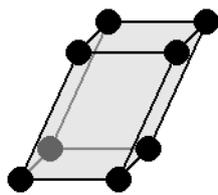
L'élément de base est un prisme droit à base carrée

-Le système orthorhombique



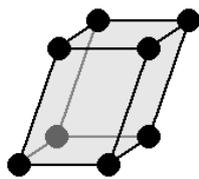
$a \neq b \neq c$: les trois axes sont de longueur inégale
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$: les trois angles sont égaux et droits
 Symétries : C, 3 L_2 , 3 P
 L'élément de base est un parallélépipède rectangle

-Le système monoclinique



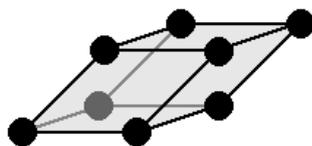
$a \neq b \neq c$: les trois axes sont de longueur inégale
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$: deux angles sont égaux et droits
 Symétries : C, L_2 , P
 L'élément de base est un prisme oblique à base losange

-Le système triclinique



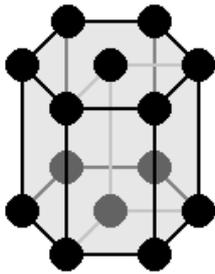
$a \neq b \neq c$: les trois axes sont de longueur inégale
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$: les trois angles sont différents et non droits
 Symétries : C, L_2 , P
 L'élément de base est un parallélépipède à base losange

-Le système rhomboédrique



$a = b = c$: les trois axes sont de même longueur
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$: les trois angles sont égaux et non droits
 Symétries : C, L_3 , 3 L_2 , P
 L'élément de base est un parallélépipède dont toutes les faces sont des losanges

-Le système hexagonal



$a = b \neq c$: deux axes sont de même longueur

$\alpha = \beta = 90^\circ$ et $\gamma = 120^\circ$: deux angles sont égaux et droits, le troisième vaut 120°

Symétries : $C_6, 6C_2, 7C_3$

L'élément de base est un prisme droit à base hexagonale celui-ci est formé de trois sous-éléments identiques (des prismes droits de base losange), c'est de ces sous-éléments que

I.5.1. Les quatorze (14) réseaux de Bravais

Parfois, des particules supplémentaires, situées au centre de la maille ou au milieu des faces. Auguste Bravais distingua ainsi quatorze types de réseaux cristallins différents. La symétrie d'un cristal peut alors être inférieure à celle de sa maille primitive dans le cas où les groupes d'atomes situés aux sommets de la maille ne présentent pas la même symétrie que la maille.

Chaque système, ou réseau élémentaire, peut se décliner de quatre manières :

- primitive (notée P) : il y a une particule (ou motif) à chaque sommet
- centrée (notée I, de l'allemand *innenzentriert*) : il y a en plus une particule au centre de la maille
- à faces centrées (notée F) : il y a en plus une particule au centre de chaque face
- à deux faces centrées (notée A, B ou C suivant l'axe concerné) : il y a une particule au centre de deux faces opposées

La forme primitive du système rhomboédrique peut également être notée R.

Tous les systèmes possèdent une forme primitive P mais pas obligatoirement toutes les autres formes dérivées. Voici la liste des réseaux acceptés par chaque système :

- cubique : P, I et F (3 réseaux)
- quadratique : P, I (2 réseaux)
- orthorhombique : P, I, F, A (ou B ou C) (4 réseaux)
- monoclinique : P, A (si $\alpha \neq 90^\circ$) (2 réseaux)
- triclinique : P (1 réseau)
- rhomboédrique : P (ou R) (1 réseau)

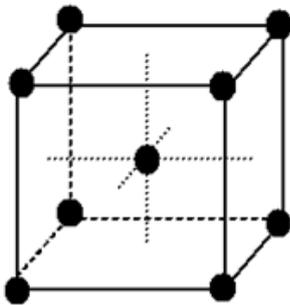
- hexagonal : P (1 réseau)

I.5.2. Les structures cristallines : CC, CFC, HC :

La plupart des métaux ont une structure hautement symétrique (cubique, hexagonale)

I.5.2. a- Structure cubique centré (CC) :

Dans cette structure un (01) atome occupe le centre du cube, et un atome pour chaque sommet du cube, les atomes de sommets de cube sont partagés par les cubes qui lui sont adjacents, ainsi chaque maille possède **2 atomes** : 1 atome du centre et un atome pour les atomes de sommets ($8 \times 1/8 = 1$). Matériaux : Li, Na, K, Ba, V, Nb, Mo, Fe(α),

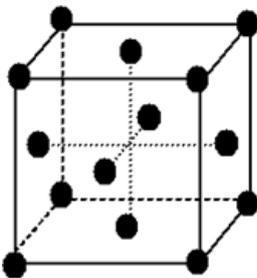


I.5.2.b- Structure cubique à face centrée (CFC) :

Dans cette structure un (01) atome occupe chaque sommet du cube, et un atome occupe chaque centre de face.

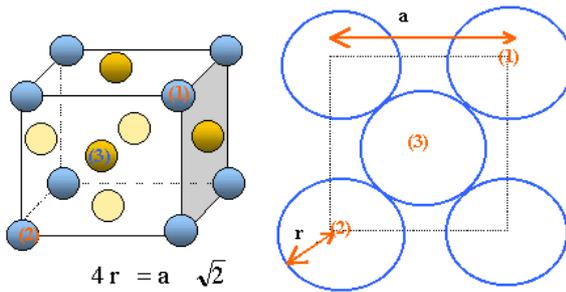
Le nombre d'atomes que contient cette structure est : **4 atomes** ($8 \times 1/8$ pour les atomes de sommets) et $6 \times 1/2$ par face

Matériaux : Cu, Ag, Au, Ca, Al, Pb,

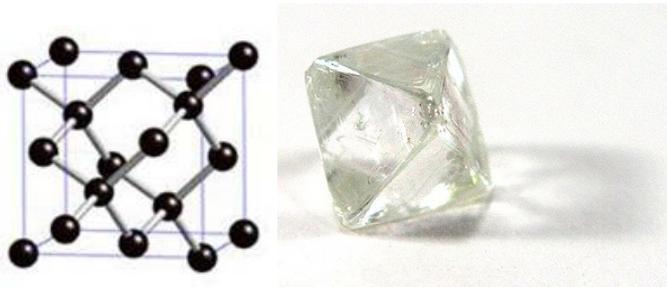


-Exemples :

-Le cuivre cristallise dans un réseau cubique à faces centrées



-Le diamant



Le réseau de Bravais est cubique à faces centrées. Le motif est formé de deux atomes :

1 atome C (0, 0,0)

1 atome C ($\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$)

1.5.2.c- Structure hexagonale compacte (HC) :

Cette structure contient **6 atomes** : 3 atomes du centre, 2 x1/2 atomes du centre des faces et 12 x 1/6 atomes des sommets. (:Be, Mg, Zn,...)

Exemple :

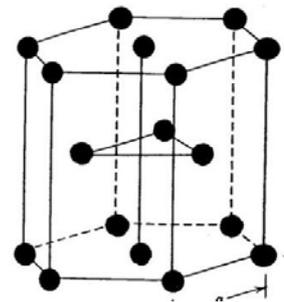
Structure du magnésium :

Le réseau de Bravais est hexagonal primitif. Le motif est formé de deux atomes :

1 atome Mg (0,0,0)

1 atome Mg ($\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$)

Noeud du réseau hexagonal



Remarque :

-Dans une structure cristalline, la plus petite distance entre deux atomes (ou ions) est égale à la somme de leurs rayons.

-La condition de stabilité d'une structure consiste à trouver l'encadrement du rapport des rayons atomiques (ioniques) pour que le réseau de Bravais soit stable (Energie de cohésion minimale)

Dans le cas du **chlorure de sodium** : $r_{anion}/r_{cation} = 1,81/0,98 = 1,85$

I.5.3. Les défauts dans les structures

Le cristal parfait n'existe pas réellement. Toute structure cristalline peut comporter des défauts dans l'assemblage régulier des atomes, parmi lesquels on peut citer :

I.5.3.a Défauts ponctuels : On désigne ainsi toute perturbation de la périodicité cristalline, dont le volume, petit, présente l'ordre de grandeur du volume atomique. Un atome étranger ou impureté, une lacune, un interstitiel et un agrégat (association de plusieurs défauts) sont des défauts ponctuels.

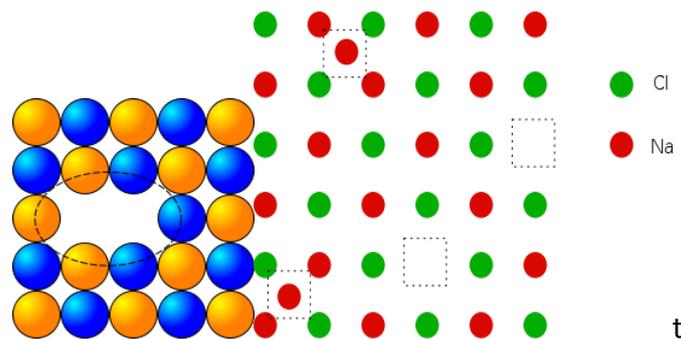


Figure I.3. les défauts ponctuels

I.5.3.b. Dislocations : En science des matériaux, une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Une dislocation peut être vue simplement comme un "quantum" de déformation élémentaire au sein d'un cristal possédant un champ de contrainte à longue distance.

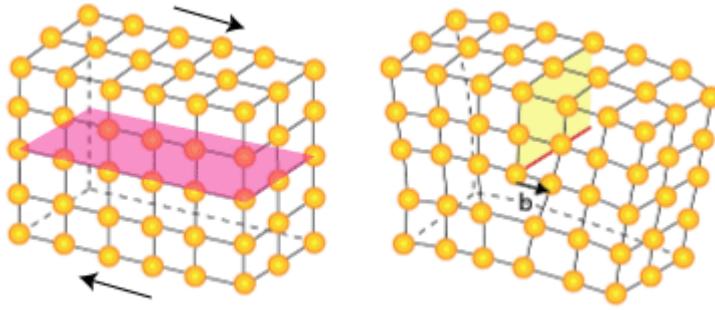


Figure I.4. Dislocation

I.5.3.c. Les joints de grains sont des éléments majeurs constitutifs des matériaux cristallins. Ils jouent un rôle important dans toutes les propriétés de ces matériaux, d'autant plus que la taille des grains (cristaux) diminue et/ou que des procédés d'élaboration et de transformation se développent permettant de jouer sur leur diversité et leur répartition dans les polycristaux.

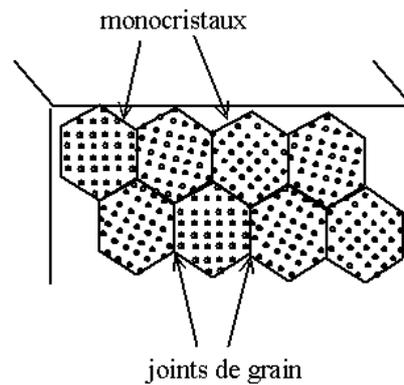


Figure I.5 les joints de grains

Chapitre II :

DIAGRAMMES D'EQUILIBRES

Chapitre II : diagrammes d'équilibre

II.1. Introduction :

Les diagrammes d'équilibre sont des représentations graphiques qui montrent la composition de phases et les structures présentes dans un corps pur ou un alliage à l'équilibre thermodynamique, en fonction de la composition chimique, de la température et de la pression.

Un *alliage* : est un matériau obtenu soit par fusion, soit par frittage de deux ou plusieurs éléments. L'addition à un métal pur d'un ou plusieurs éléments (métallique ou non) peut modifier profondément ses propriétés. L'acier est un alliage fer-carbone.

Un *composant* : est une substance qui entre dans la composition d'un alliage, on parle d'alliage binaire : lorsqu'il est composé de deux composants ; un alliage ternaire est formé de trois composants, alors qu'un alliage quaternaire est composé de quatre composants.

Une phase : C'est une partie homogène du système (alliage) caractérisée par une composition chimique, un type de réseau cristallin (structure) et les propriétés résultantes. Les phases différentes dans un système sont séparées par une interface.

Une phase peut être : une solution solide, une solution liquide ou une combinaison chimique de type AnB_m

II.2. Cristallisation de matériaux

II.2.1 Principe de la cristallisation et courbe de refroidissement

Soit le refroidissement d'un corps ne subissant aucune transformation, on pose :

T : température du corps

T_0 : température ambiante

C : capacité calorifique.

Une faible baisse de température dT correspond au dégagement d'une certaine quantité de chaleur dq telle que : $dq = -cdT$

Si l'on admet que la quantité dq est proportionnelle au temps dt d'une part, et à la différence de température $\Delta T = T - T_0$ d'autre part, on peut écrire :

$$dq = -cdT = K(T - T_0)dt$$

Cela veut dire que la variation de la température du corps en fonction du temps est une fonction exponentielle. Si le corps étudié subit une transformation avec changement de phase, un dégagement de chaleur se produit et modifie l'allure de la courbe de refroidissement (figure II.1).

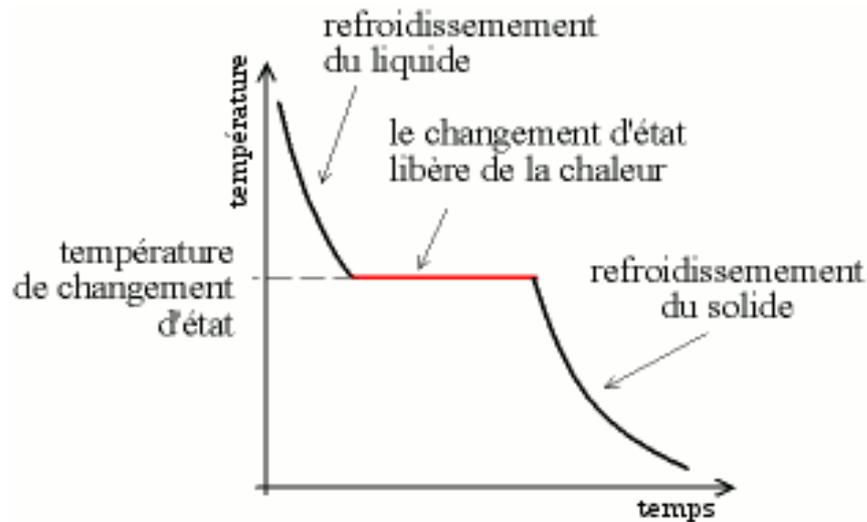


Figure II.1. : Courbe de refroidissement

II.2.2 Cristallisation d'un métal pur :

Pour un métal pur, la température reste constante pendant toute la durée de solidification, en effet entre T et T_f , le corps est à l'état liquide, il y a un seul constituant (le corps pur) et une seule phase (la phase liquide).

A la température T_f apparaissent les premiers cristaux solides, ainsi le constituant reste le même, alors qu'il y a deux phases : la phase liquide et la phase solide.

La température reste constante pendant toute la durée de solidification, ceci est traduit par un palier sur la courbe de refroidissement $T=f(t)$ appelé *palier de solidification*. La longueur de ce palier est proportionnelle à la quantité de métal solidifié.

La cristallisation commence par la formation de germes et se poursuit avec leur développement et l'augmentation de leur nombre (figure II.2)

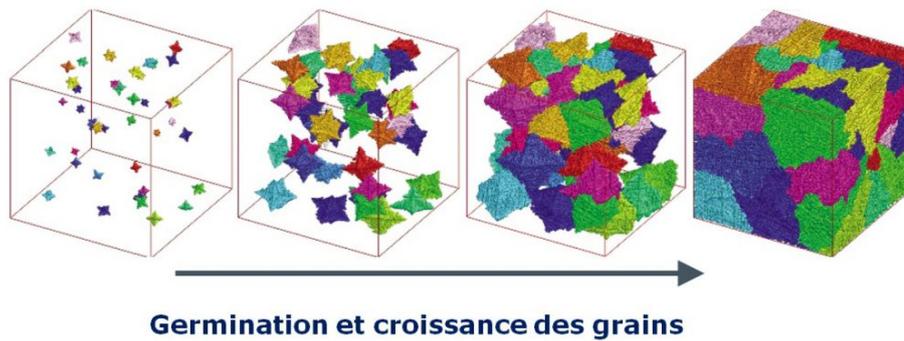


Figure II.2 : Etapes de cristallisation d'un métal

II.2.3 Cristallisation d'un alliage

Pour réaliser un alliage, des proportions définies de constituants différents sont fondues et mélangées, puis l'ensemble est refroidi. Comme il a été dit plus haut, 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. Lorsqu'on étudie des alliages, les courbes de solidification deviennent beaucoup plus complexes. Elles comportent alors plusieurs sections de courbes raccordées par des points d'inflexion (figure II. 3). Parfois, elles comportent également des paliers de solidification isotherme. Chacun des points 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

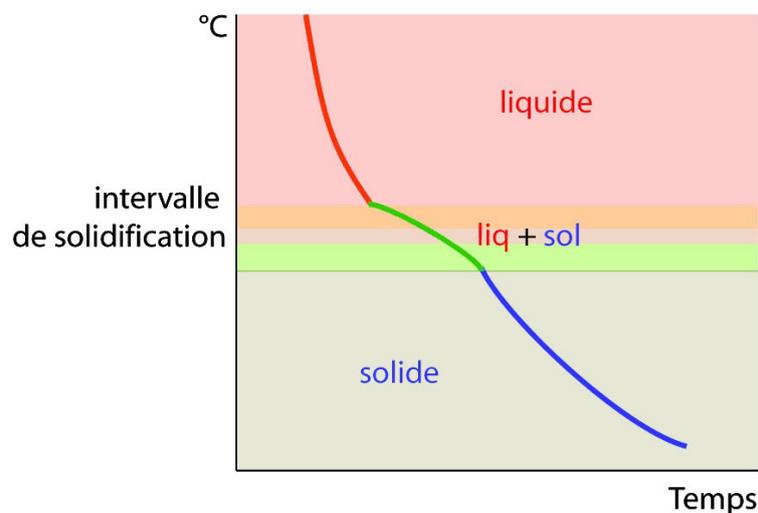


Figure II.3 : Courbe de refroidissement d'un alliage de composition AB

II.3. Diagrammes d'équilibre binaire

II.3.1 Diagrammes d'équilibre de deux métaux complètement miscible :

Les diagrammes d'équilibre binaires définissent tous les domaines de phases en fonction de la température et de la composition chimique. Ils sont représentés par :

- Un axe horizontal qui correspond à la variation de la composition depuis le composant pur A (100% A ,0% B) jusqu'au composant pur B (0% A ,100% B),
- Un axe vertical, au niveau de chaque composant ; et qui correspond à la variation de la température
- Par des courbes en des droites qui éliminent les domaines de phases

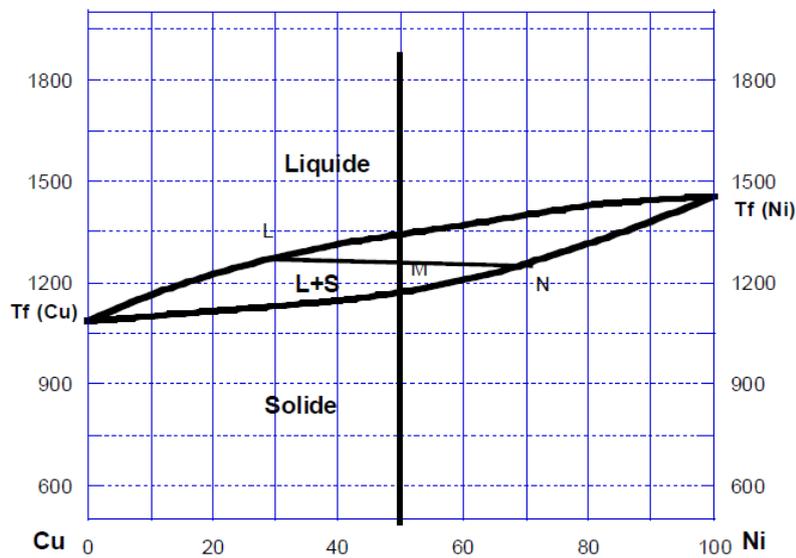


Figure II.4 Diagramme d'équilibre binaire (Exemple Cu – Ni)

Exemple d'application :

Nous avons un alliage de 65% Pd et 35% d'Ag :

- A 1500°C, il est complètement liquide ;
- A 1400°C environ, la 1^{ère} phase solide se forme ;
- A 1370°C, il est partiellement solide (71% de Pd) et partiellement liquide (58% de Pd)
- A $T < 1340^{\circ}\text{C}$, il est complètement solide.

II.3.2 Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles

Dans les alliages métalliques la solubilité limitée est très fréquente (Pb-Sn, Ag-Cu, etc...), il existe deux types de diagrammes d'équilibre des solutions limitées :

1. Les diagrammes à transformations eutectique
2. Les diagrammes à transformation péritectique

II.3.2.1 Diagrammes à transformation eutectique :

Ce type de diagramme très répandu et est schématisé par la figure II.7 où les branches acb et adceb sont appelées respectivement : liquidus et solidus.

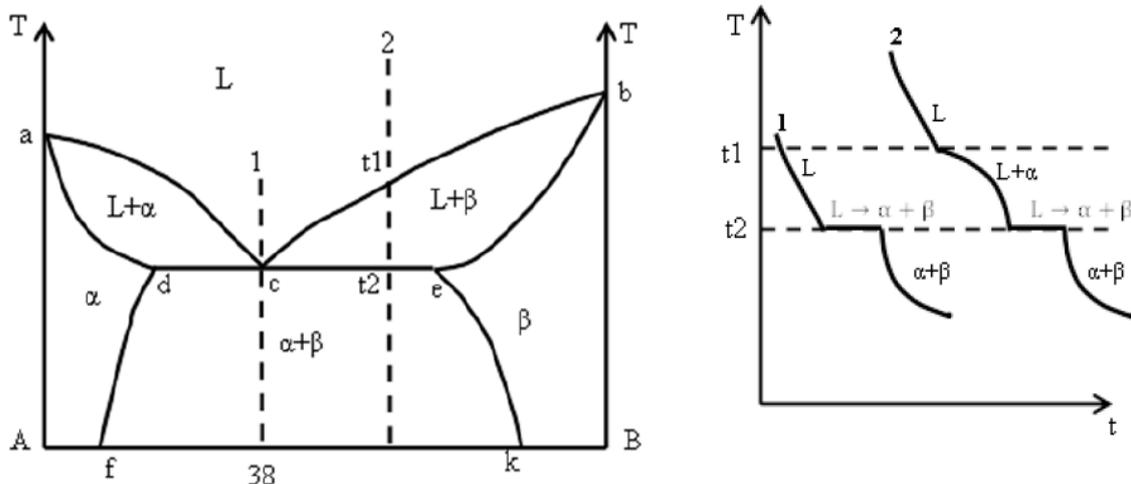


Figure II.5 : Diagramme binaire à transformation eutectique et courbes de refroidissement

Entre le liquidus et le solidus, deux phases sont en équilibre : ($\alpha+L$) d'un côté et ($\beta+L$) de l'autre. Lorsqu'au cours du refroidissement, la température atteint le niveau de la courbe ac, la solution liquide L dégage les premiers cristaux de la solution solide α . Il en est de même pour la courbe cb et le dégagement des premiers cristaux β .

La branche df marque la limite de solubilité du composant B dans le composant A.

La branche ek marque la limite de solubilité du composant A dans le composant B.

Le diagramme d'équilibre binaire à transformation eutectique comporte deux solutions solides homogènes :

- La phase α riche en composant A,

- La phase β riche en composant B.

L'alliage qui correspond à la composition du point c (38% de B et 62% de A) se solidifie à la température T_c , le point c appartient au deux branches du liquidus ac et cb. Il en résulte qu'à la température T_c , la solution liquide coexiste avec les cristaux à saturation limitée en solutions solides α (de composition d) et β (de composition e) qui forment une structure hétérogène

L'alliage qui est le siège d'une cristallisation simultanée des phases α et β à la température constante T_c est dit « eutectique », la réaction eutectique s'écrit : $L(c) \leftrightarrow \alpha d + \beta e$

Cette réaction correspond à une co-solidification simultanée des phases α et β , qui se traduit généralement par l'obtention d'un agrégat très fin appelé « l'eutectique ».

Les alliages de composition cd sont appelés « hypoeutectique » et les alliages de composition ce sont appelés « hypereutectique ».

Chapitre III :
DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-
CARBONE

Chapitre III : Diagramme d'équilibre Fer-carbone

III.1.Introduction.

Les aciers et les fontes sont des alliages de fer carbone, ils trouvent une large application dans l'industrie, à cause de leur bonnes propriétés, le diagramme d'équilibre Fe-C est relativement compliqué en raison du comportement différent des deux constituants.

III.2 .Caractéristiques du fer et de carbone :

Le Fer existe sous deux variétés allotropiques différentes, c'est-à-dire avec deux formes cristallines : CC et CFC.

- 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 cubiques 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.

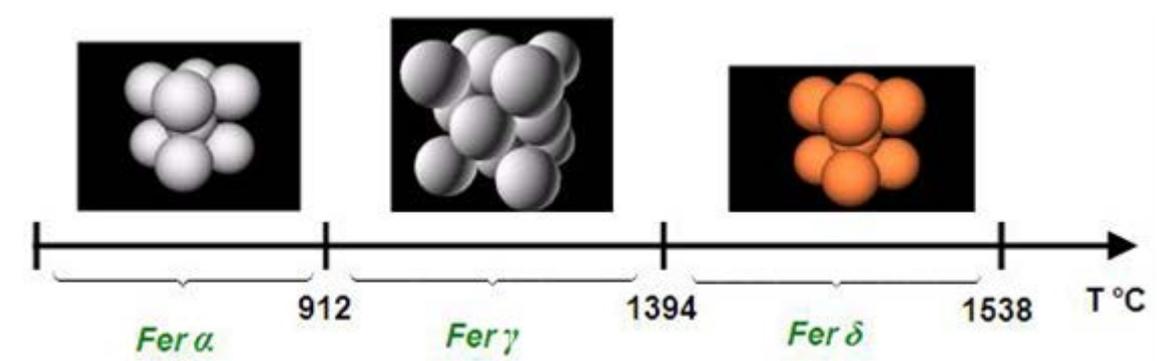


Figure III. 1. Transformation allotropique du Fer

-Le **carbone** est un élément non métallique peu abondant (0.1% en masse dans l'écorce terrestre), il existe sous deux variétés cristallines : 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 et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est 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 noeuds 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.

III.3 Diagramme d'équilibre fer-carbone :

Les alliages Fe-C sont de deux types :

- Alliage fer- graphite : correspondent à un état stable et contiennent du carbone libre sous forme de graphite ;
- Alliage fer-cémentite : correspondent à un état métastable et contiennent du carbone sous forme de combinaison chimique Fe_3C .

III.3.1 Diagramme d'équilibre fer-cémentite

Le diagramme d'équilibre représenté sur la figure III.2 est le diagramme fer-cémentite qui traduit la composition de phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6.67%C). Les phases susceptibles d'être présentes dans les alliages binaires fer-cémentite sont les suivantes :

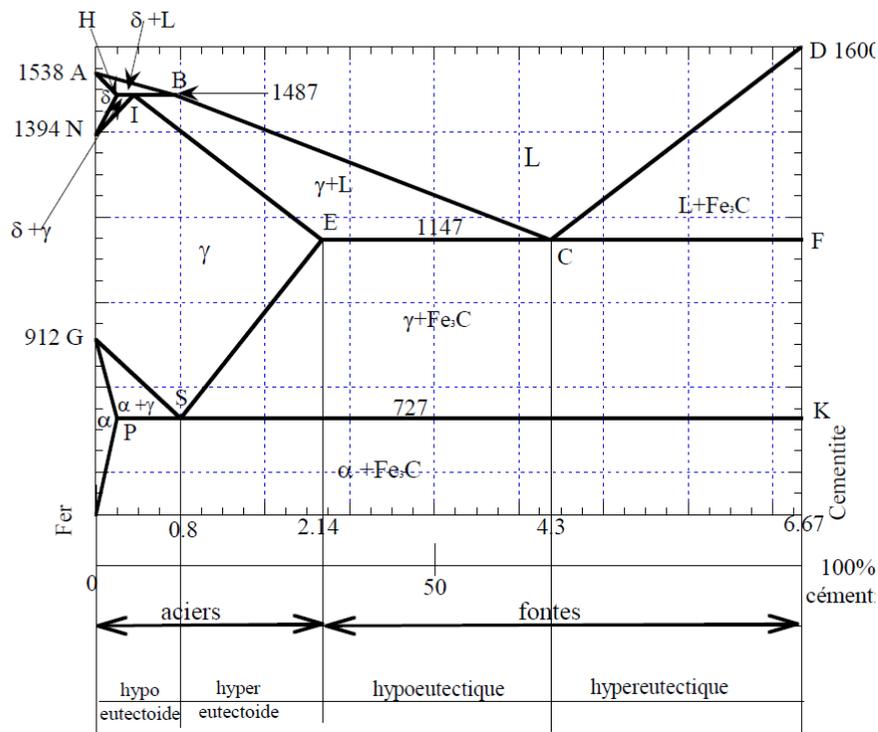
. **La ferrite α** : Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$).

La ferrite δ : Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

L'austénite γ : Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%C$ à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

. **La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)** : est un composé chimiquement défini CCD. 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.

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 ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A\% \approx 10$).



points	P	H	I	B	S	E	C
%C	0.02%	0.10%	0.16	0.51	0.8	2.14	4.3

Figure III.2 Diagramme d'équilibre Fe-Cm

Les points et lignes :

Les points A(1538) ; N (1394) ; G (912) sont les points de transformation allotropique du fer pur

- AB : liquidus qui marque le début de la cristallisation du fer δ ;
- BC : liquidus qui marque le début de la cristallisation de l'austénite γ à partir du liquide ;
- CD : liquidus qui marque l'apparition de la cémentite primaire à partir du liquide ;
- AH : solidus limitant l'existence du liquide (au-dessus) et les cristaux de la ferrite δ (au-dessous) ;
- HIB : palier de transformation péritectique : $LB + \delta H \rightarrow \gamma I$;

- ECF : solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique : $LC \rightarrow \gamma E + Fe_3C$;
- H : 0.10 % C marque la limite de solubilité du carbone dans le fer δ ;
- E : 2.14 % C marque la limite de solubilité du carbone dans le fer γ ;
- H : 0.02 % C marque la limite de solubilité du carbone dans le fer α .

Points de transformation des aciers

- A2 : dit aussi (Ac2 ou Ar2) : à 768°C L'acier perd ses caractéristiques ferromagnétiques pendant le chauffage ;
- GS : dit aussi Ac3 ou Ar3, limite d'existence de la ferrite α pendant le chauffage ;
- ES : appelé aussi Ac_m ou Ar_m, limite de la cémentite pendant le chauffage

:

III.2.2 Diagramme d'équilibre fer-graphite:

Le diagramme fer-graphite est analogue au diagramme fer-cémentite (voir figure III.5). Dans le système stable fer-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.

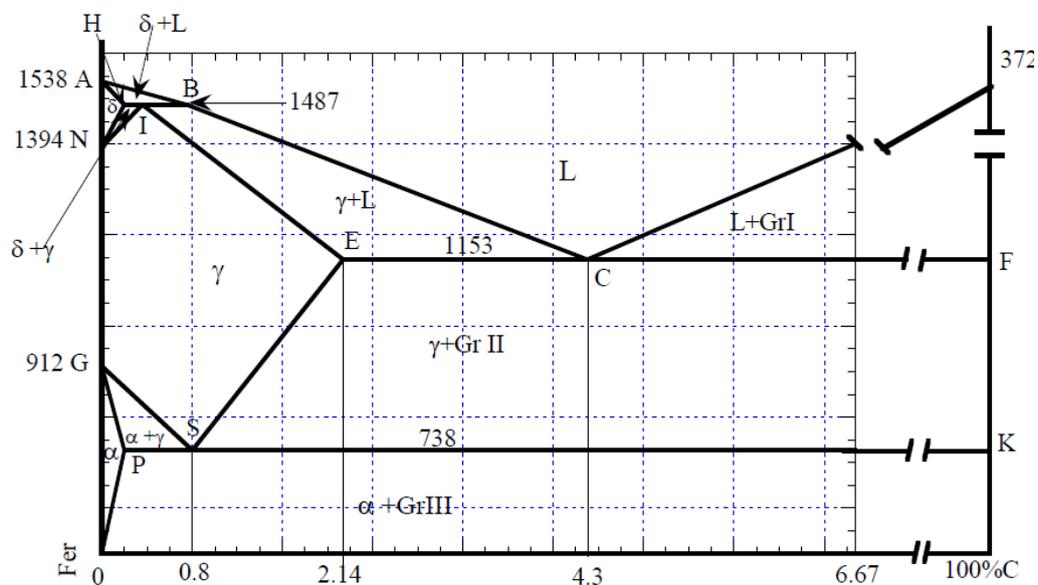


Figure II.3: Diagramme d'équilibre fer-graphite

III.4. Désignation normalisée des aciers et des fontes

III.4.1. Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux, ...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

- Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites comme le montre le tableau ci-dessous.

Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

a. La lettre A : est utilisée pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction R_m exprimée en daN/mm^2 , éventuellement suivie des chiffres 1, 2, 3 ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques).

Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée. On utilise ces chiffres car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différentes.

Exemple : A 60 – 3

A : Acier ordinaire.

60 : Résistance minimale à la rupture à la traction 60 daN/mm^2 .

3 : Indice de qualité.

b. La lettre E : est utilisée pour désigner les aciers destinés à la construction métallique.

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2 3 ou 4.

Exemple : E 24 – 2

E : Acier ordinaire.

24 : limite d'élasticité minimale de 24 daN/mm².

2 : Indice de qualité.

- Désignation des aciers pour traitements thermiques

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques la teneur en carbone et en impuretés est contrôlée, on distingue deux nuances :

a. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CC suivis d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple : CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

35 : contenant 0,35 % de carbone.

Exemple de nuances normalisées : CC 10, CC 20, CC 30, CC 35, CC 55, etc.

b. Les aciers fins :

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin.

Leur désignation commence par les lettres XC suivis d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté.

Exemple : XC 85

XC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

85 : contenant 0,85 % de carbone.

. III.4.1.1. Désignation des aciers alliés

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant, outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques.

Ce sont des aciers de grande pureté. Leur élaboration s'effectue dans le four Martin, le four électrique ou le creuset.

Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous avec le coefficient de teneur de chaque élément.

	Symbole Chimique	Symbole Normalisé	Coefficient
Aluminium	Al	A	x 10
Chrome	Cr	C	x 4
Cobalt	Co	K	x 4
Cuivre	Cu	U	x 10
Etain	Sn	E	x 10
Magnésium	Mg	G	x 10
Manganèse	Mn	M	x 4
Molybdène	Mo	D	x 10
Nickel	Ni	N	x 4
Phosphore	P	P	x 10
Plomb	Pb	Pb	x 10
Silicium	Si	S	x 4
Soufre	S	F	x 10
Titan	Ti	T	x 10
Tungstène	W	W	x 10
Vanadium	V	V	x 10
Zinc	Zn	Z	x 10
Antimoine	Sb	R	x 10
Cadmium	Cd	Cd	x 10

Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

III.4.1.1.a. Désignation des aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième pour cent (multiplié par 100).
- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Exemples :**45 CD 20 – 4**

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45 % de carbone.
- $20/4 = 5$ % de chrome (C).
- $4/10 = 0,4$ % de molybdène (D).

20 NC 6

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,20 % de carbone.
- $6/4 = 1,5$ % de nickel (N).
- Le pourcentage de chrome (C) est inférieur à 1,5 %.

III.4.1.1.b. Désignation des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc.

Leur désignation normalisée est toujours précédée par la lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.

- Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition.

Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

Exemples :

Z 160 CDV 12 :

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,60 % de carbone.
- 12 % de chrome

-Z 6 CN 18 – 09

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone
- 18 % de chrome.
- 9 % de nickel.

III.4.2 Désignation normalisée des fontes

L : lamellaire
S : sphéroïdale
MW : malléable à cœur blanc
MB : malléable à cœur noir
V : vermiculaire
N : absence de graphite
Y : structure spéciale

Exemple : EN-GJS-400-18

EN : préfixe
GJ : symbole des fontes
S : type de fonte

400 : résistance à la rupture par traction [N/mm²]
18 : allongement en pourcentage ($\Delta l=18\%$)

Chapitre IV :

Traitement thermiques et traitement thermochimiques de diffusion

Chapitre VI : Traitement thermique et traitement thermochimique de diffusion

IV.I Introduction

Un traitement thermique est une opération ou une succession d'opérations pendant laquelle (lesquelles) un alliage métallique, à l'état solide, est soumis à un ou plusieurs cycles thermiques. Les traitements thermiques ont pour but de donner à la pièce traitée les propriétés les plus convenables pour sa mise en œuvre et son emploi. D'une manière générale les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique mais apporte des modifications du point de vue constitution (état du carbone, forme allotropique), structure (taille de grain, répartition des constituants) et état de contrainte.

Un traitement thermique comporte obligatoirement :

1. Un chauffage ;
2. Un maintien pendant un temps à la température de traitement ;
3. Un refroidissement (retour à la température ambiante).

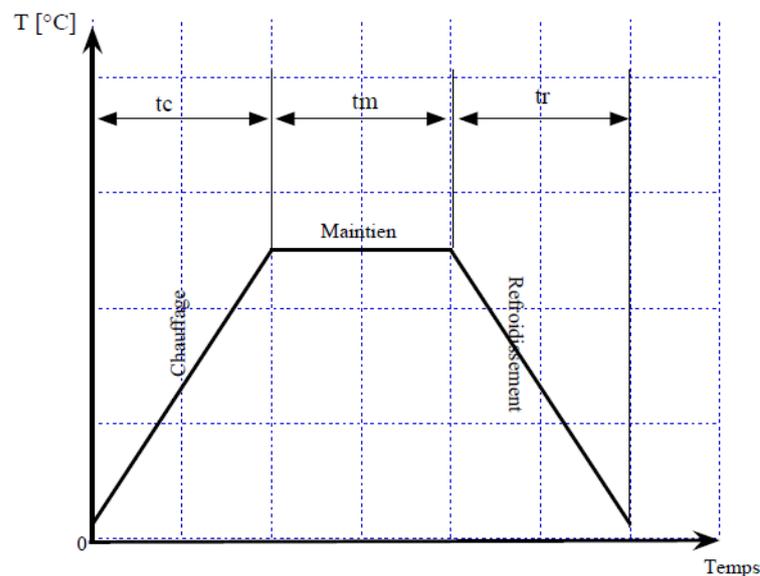


Figure IV.1 Cycles thermique d'un traitement

IV.2 Traitement thermiques :

Les aciers ont un caractère le plus frappant est celui d'être aptes à acquérir, grâce à des

traitements thermiques variés, toutes une gamme de propriétés très différentes.

IV.2.1 Recuit : Le recuit est un traitement qui a tendance à rapprocher l'acier de son état d'équilibre sur le plan physico-chimique. Il a pour but de réduire les contraintes internes dans le métal. Ces contraintes peuvent provenir d'un laminage, d'un étirage, d'un soudage ou d'un autre traitement thermique (trempe, revenu). Le recuit permet de rendre l'acier plus mou, donc plus facile à usiner. Le cycle opératoire du recuit comprend les étapes suivantes :

1. Chauffage jusqu'à une température dite de recuit (qui dépend du type de recuit) ;
2. Maintien isotherme à la température de recuit ou à des oscillations autour de cette température ;
3. Un refroidissement très lent (à l'air calme).

IV.2.1.1 Les types de recuit

Selon le but recherché, il existe différents types de recuit qui se distinguent par leurs températures de chauffage et de maintien (figure IV.3)

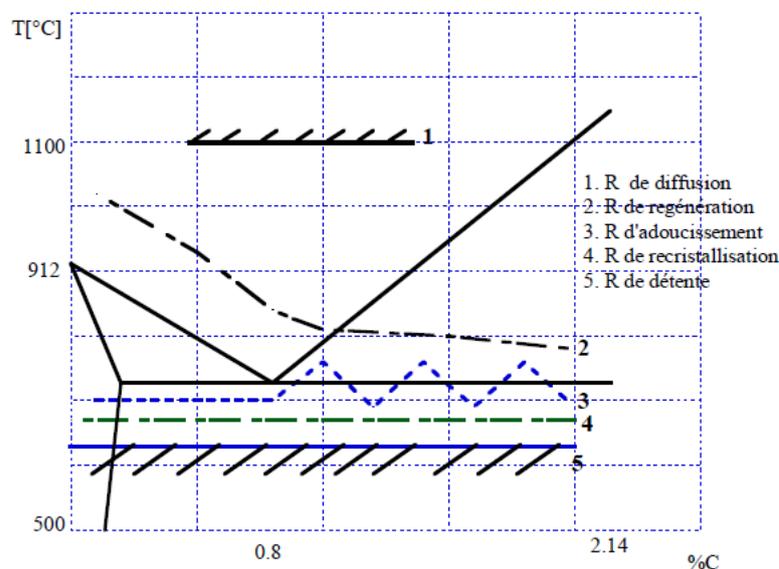


Figure IV.3 température de chauffage des différents types de recuit

-Recuit d'homogénéisation : dit aussi de diffusion, il est appliqué aux aciers de coulée (moulage), pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité chimique.

-Recuit de recristallisation : il consiste à reformer les cristaux ou les grains du métal déformé. il est appliqué aux pièces déformées à froid et il élimine l'écrouissage.

- **Recuit de détente** : dit aussi recuit de stabilisation, il est appliqué aux pièces forgées, il fait disparaître les tensions internes

- **Recuit d'adoucissement** : dit aussi recuit complet, il s'applique pièces traitées thermiquement, il détruit les effets des traitements thermiques antérieurs, il provoque une structure favorable pour l'usinage ou la déformation à froid.

-Recuit de régénération : dit aussi recuit d'affinage, il affine les grains du métal et s'applique aux pièces forgées.

IV.2.2 Trempe : La trempe est un traitement thermique qui permet l'augmentation de la dureté, de la résistance à la rupture et de la tenue à l'usure, cependant elle fait diminuer la résilience et l'allongement avec l'apparition des tensions internes. Le cycle opératoire de la trempe comporte :

1. Un chauffage à une température d'austénisation ;
2. Un maintien à cette température pour une austénisation complète ;
3. Un refroidissement brusque (rapide) dans un milieu réfrigérant (eau, huile). La température de chauffage est déterminée en fonction de la composition chimique de l'acier et de ses dimensions.

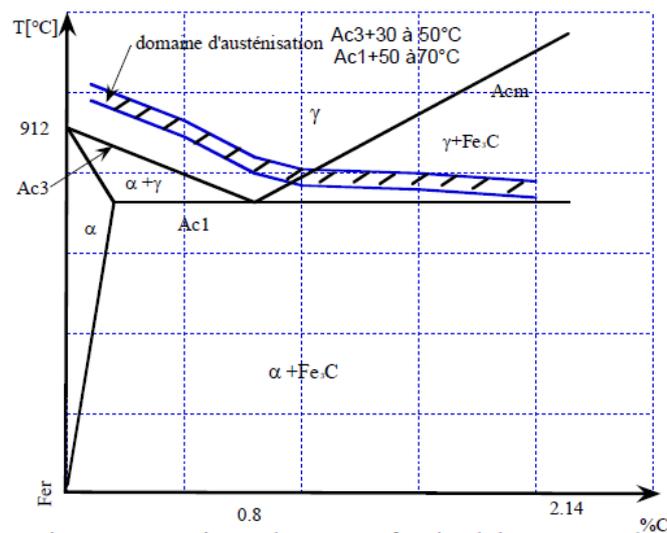


Figure IV.2 Température de trempe en fonction de la teneur en carbone
(domaine d'austénisation des aciers)

NB : la trempe n'est pas un traitement thermique final elle est suivie d'un revenu.

IV.2.3. Revenu : Le revenu est le traitement qui suit généralement la trempe. En effet, une pièce trempée est très dure et cassante (fragile). Le revenu permet alors de diminuer la fragilité de la pièce, tout en lui conservant sa dureté, et de réduire les tensions internes provoquées par le refroidissement rapide lors de la trempe. Le revenu permet donc de maintenir la dureté et d'augmenter la résistance aux chocs de la pièce qui a été trempée.

Ce traitement consiste à chauffer la pièce à des températures plus basses que celles de la trempe. Le cycle opératoire du revenu est comme suite :

1. Chauffage à une température $T \in [250, 680^\circ\text{C}]$;
2. Maintien à cette température ;
3. Refroidissement (la vitesse de refroidissement n'a aucune influence sur la structure du métal).

IV.2.3.1 types de revenu :

-Revenu à basses températures : température voisine à 250°C , ce type de revenu est utilisé pour diminuer les contraintes internes, augmenter la résistance et améliorer la

ductilité, cependant la dureté n'est pas altérée. Il est appliqué aux outils de coupe, aux instruments de mesure en acier au carbone et faiblement alliés.

-Revenu à températures intermédiaires : effectué aux températures comprises entre 350 et 500°C avec un refroidissement à l'eau, il permet d'augmenter la limite élastique et la résistance à la fatigue. Il est appliqué aux aciers à ressorts.

-Revenu à haute température : effectué aux températures comprises entre 500 et 680°C, appliqué aux aciers de construction, il crée le meilleur compromis entre la résistance et la ductilité (plasticité).

Une trempe suivi d'un revenu à haute température est appelé traitement d'amélioration.

IV.3 Traitement thermochimiques :

On entend par traitements thermochimiques, la saturation superficielle de l'acier par un élément chimique (C, N, Al, Cr...). Cette saturation se produit par diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température convenablement choisie. Le traitement thermochimique consiste à chauffer les pièces, dans un milieu solide, liquide ou gazeux, capable de lui céder l'élément diffusant, à les maintenir à cette température, puis à les refroidir. Ce traitement permet de changer la structure de l'acier et la composition chimique des couches superficielles, ce qui entraîne une large variation des propriétés.

La vitesse de diffusion des atomes diffusants dans le fer n'est pas la même. La vitesse de saturation en atomes d'insertion (C et N) est plus rapide que celle en atomes de substitution (métaux) ; c'est pourquoi les températures dans ce dernier cas doivent être plus élevées.

IV.3.1 Cémentation :

La cémentation est une opération de durcissement par accroissement de la teneur en carbone suivie de trempe. Le but principal consiste à obtenir à partir d'un acier doux (0.1 à 0.2)% de carbone, une couche superficielle plus ou moins profonde à structure quasi-eutectique (0.8 à 0.9)% de carbone en chauffant les pièces dans un milieu capable de leur fournir du carbone, appelé ciment

La diffusion du carbone vers l'intérieur des pièces est possible à l'état atomique, la cémentation s'obtient suite à une réaction chimique dans le ciment qui donne le carbone actif

ou bien suite à une diffusion de ce carbone dans l'acier porté à des températures comprises entre 920 et 950°C.

Il faut noter qu'une concentration en carbone dépassant 1.1% de carbone dégrade les propriétés mécaniques des pièces cémentées.

IV.3.2 Nitruration :

La nitruration est un procédé de durcissement superficiel à l'azote, appliquée à certains aciers et certain fontes (contenant jusqu'à 1.5% Al, 2% Cr, 2% Ni et 0.5% Mo). L'agent durcissant donne au-dessus de 500°C, le nitruure de fer qui est un corps très dur, mais fragile.

On utilise comme agent de nitruration le gaz ammoniac, qui doit baigner les pièces qui sont chauffées à 550°C. Au contact du fer, le gaz ammoniac se dissocie en azote et hydrogène. Une partie de l'azote est absorbée par le métal tandis que les gaz H₂, NH₃ et N₂ en excès sont évacués. La dureté de la couche nitrurée est obtenue sans trempe.

La pénétration de l'azote dans les aciers est plus rapide que celle du carbone à la température 550°C. L'addition de chrome et d'aluminium dans l'acier permet la création de nitruure d'aluminium et de chrome qui augmentent la dureté des pièces nitrurées.

Les fontes à nitrurer subissent, avant la nitruration, une trempe et revenu pour leur donner une structure dure et tenace.

La nitruration n'est suivie d'aucun traitement thermique, ce qui permet d'éviter toute oxydation du métal et toute déformation des pièces, elle présente des avantages sur la cémentation tels qu'une dureté plus grande (1100 HV au lieu de 800 HV), qui se conserve jusqu'à 500°C, alors que la dureté d'une couche cémentée chute à partir de 200°C. La nitruration donne aussi le maximum de résistance à l'usure et une certaine résistance à la corrosion. Par contre la nitruration revient plus chère que la cémentation

IV.3.3 Carbonitruration :

La carbonitruration est un procédé de durcissement superficiel des pièces en acier que l'on chauffe dans une atmosphère gazeuse (CO + N₂ + C₃H₈), permettant au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. 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. Le rôle de l'azote est

surtout d'abaisser le point de transformation Ac3. C'est pourquoi la température de chauffage lors de la trempe est moins élevée (700 à 850°C) que pour la cémentation.

Une trempe peu énergique, généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. On recourt par la suite à un revenu à basse température (180°C). La dureté obtenue est de l'ordre de 62 HRC. Une épaisseur cémentée de 0,5 à 0,7 mm demande environ 3 heures de traitement. La couche carbonitrurée doit avoir une structure martensitique à grains fins, une faible quantité de carbonitrides et environ 20 à 30 % d'austénite résiduelle. La carbonituration gazeuse est généralement appliquée aux pièces de formes complexes. C'est un traitement qui est de plus en plus adopté par les industries de mécanique de précision : pièces pour automobiles, avions

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.W. Christian, The theory of transformations in metals and alloys, Pergamon press, 2nd Ed. (1995).
- [2] R.E. Smallman, R.J. Bishop, Modern Physical Metallurgy and Materials, Engineering. Science, process, applications, Sixth Edition Butterworth-Heinemann press (1999).
- [3] J.Philibert ,A.vignes ,YBréchet ,P.Combrade ,Métallurgie du matériaux au matériaux Ed.Masson ,1998.
- [4] Diagrammes de phases : Société Francophone de Biomatériaux Dentaires P. MILLET
Date de création du document 2009-2010
- [5] BOUAOUADJA Nouredine : Matériaux tome1
- [6] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Compacit%C3%A9_\(cristallographie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Compacit%C3%A9_(cristallographie))
- [7] <http://www.maxicours.com/se/fiche/4/3/383743.html>
- [8] <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/cristallo23.html>
- [9] http://olivier.pingot.free.fr/doc_21_sortie.html

