

Sciences des matériaux

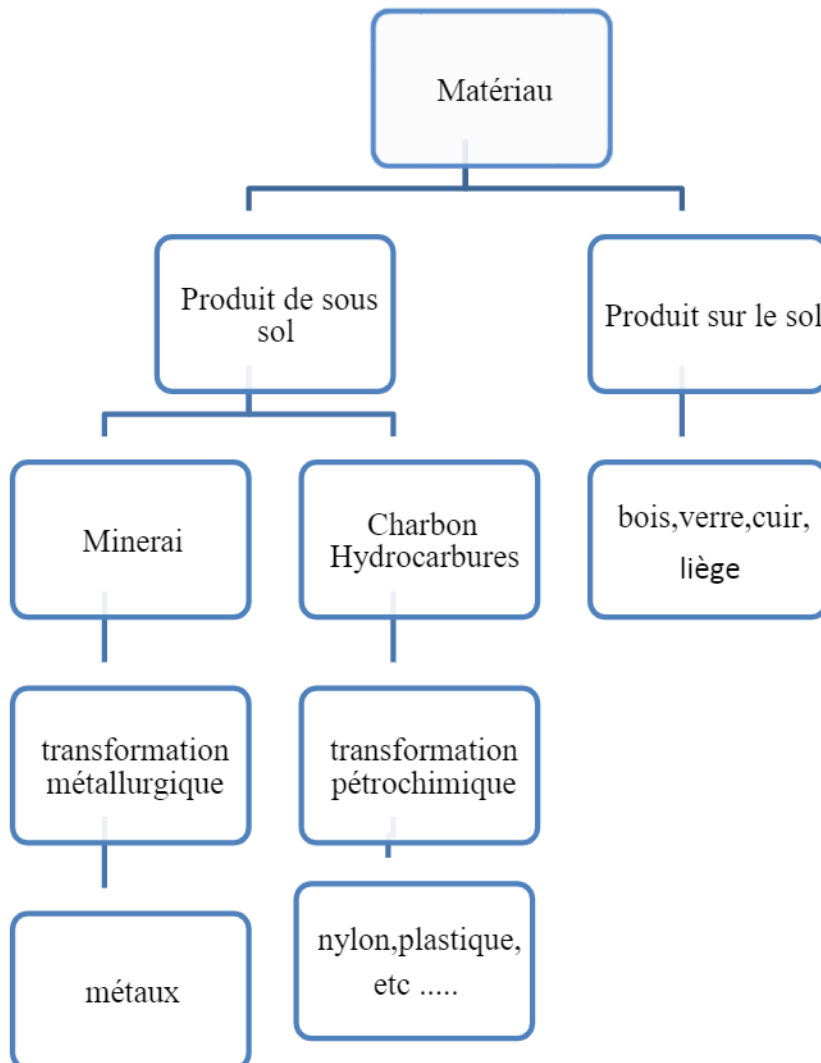
I.GENERALITES SUR LES MATERIAUX

I.1 Introduction :

Toute matière entrant dans une construction devient un matériau. Autrement dit : Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets.

A nos jours, il y a environ 50000 à 80000 matériaux disponibles pour l'ingénieur et 3000 procédés de fabrication et de mise en œuvre de ces matériaux.

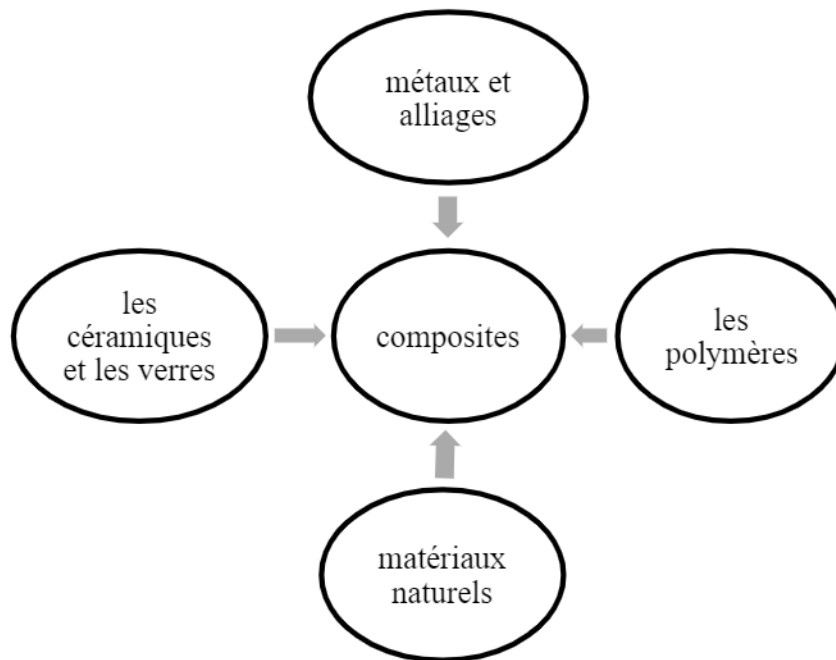
Ces matériaux proviennent soit du sol ou du sous-sol, comme montré ci-dessous :



I.2 Classification des matériaux :

Les matériaux peuvent être classés de plusieurs manières selon les critères qu'on veut prendre en considération (résistance, légèreté, mise en œuvre, applications,...), le classement qu'on va considérer est celui qui se base sur l'interaction entre atomes ou molécules.

Ainsi les matériaux sont classés en cinq familles :



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 :

a) 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 30 Cr 13, X 8 Cr Ni 18-12) 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 ...

b) Les matériaux non ferreux : ils possèdent une masse volumique faible, de bonnes propriétés électriques et résistance à la corrosion et à l'oxydation, ainsi qu'une facilité de mise en œuvre. 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, les 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...), dans l'électroménager, en 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.

I.2.2. les verres et les céramiques :

Ce sont tous les matériaux à liaisons iono-covalentes, tels que les roches, les bétons, les verres, les carbures, nitrures, ils sont utilisés (en plus du domaine traditionnel) en électrotechnique, en construction mécanique, pour les outils de coupe, soupape, billes, en biomécanique remplacement d'os, de dents, les céramiques sont aussi utilisés dans le domaine nucléaire (protection thermique et neutronique).

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). Ci-dessous quelques polymères et leurs utilisations :

Appellation courante et abréviation normalisé	Noms commerciaux utilisations
Polyéthylène (PE)	Lactène, Hostalen, Dowlex Sacs plastique (PEHD/PEBD), Réservoirs de voitures, bouteilles, flacons, bidons, films d'emballage,
Polypropylène (PP)	Appryl, Novolen Films d'emballage alimentaire, bouteilles rigides, intérieur de lave-vaisselle, cordes et ficelles
Polychlorure de vinyle (PVC)	Lacovyl, Vinidur, Vinnolit Tuyauterie, pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau minérale, barrières extérieures, films d'emballage alimentaire
Polystyrène (PS)	Lacqrène, Novodur, Styrol emballages, pots de yaourt, armoire de toilette, cassettes audio, brosses à dents, boîtes à œufs, isolants
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	Plexiglas, Altuglas, Lucryl... Plaques pour vitres, globes, feux arrière de voiture, lentilles d'appareils photo
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	Téflon, Hostaflon Tuyaux, joints et raccords. Robinet et vannes pour matériel de laboratoire, revêtements anti-adhérents

I.2.4. les matériaux naturels :

Les matériaux naturels sont, comme leur nom l'indique, issus de la nature. Ils sont ensuite utilisés directement par l'homme.

Les matériaux naturels peuvent être d'origine animale comme la laine ou le cuir, d'origine végétale comme le coton ou le bois, d'origine minérale comme la pierre ou l'argile.

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 :

- 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.
- 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).
- 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 Choix des matériaux :

Le choix des matériaux est l'un des problèmes essentiels qui se posent aux concepteurs ; vu la diversité des paramètres qui caractérisent tout matériau. Le choix doit être basé sur deux types d'éléments :

- a) Compte tenu des sollicitations diverses que le matériau subit, quelles réponses doit-on attendre ?
- b) Comment concilier les impératifs de durabilité et de fiabilité avec ceux liés aux prix de revient et à la rareté de certaine matière.

I.4 Caractéristiques des matériaux :

Les matériaux peuvent avoir des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques diverses:

I.4.1 Caractéristiques physiques : Elles se rapportent à :

- a) **Couleur** : C'est l'aspect naturel du matériau non oxydé.
- b) **Masse volumique** : notée par la lettre ρ elle exprime la masse par unité de volume et elle est très importante dans toutes les recherches. Exemple
$$\rho_{acier} = 7850 \text{ kg/m}^3$$
- c) **Point de fusion** : C'est la température à laquelle le métal chauffé passe de l'état solide à l'état liquide ; exemples $T_{f \text{ Fer}} = 1530^\circ\text{C}$; $T_{f \text{ acier}} = 1300 \text{ à } 1500^\circ\text{C}$; $T_{f \text{ cuivre}} = 1080^\circ\text{C}$; $T_{f \text{ Aluminium}} = 650^\circ\text{C}$
- d) **Conductivité électrique** : c'est la capacité d'un matériau à être plus ou moins conducteur de courant électrique ; exemple le cuivre est un matériau bon conducteur, le plastique est un matériau mauvais conducteur (isolant)
- e) **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.
- f) **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....
- g) **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.4.2 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) **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.
- b) **Elasticité** : C'est l'aptitude d'un matériau à revenir à son état initial après déformation, autrement dit c'est la résistance à la déformation permanente

(déformation plastique)

- 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.4.3 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.4.4 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.5 Notions de cristallographie :

La cristallographie est la science qui se consacre à l'étude des substances cristallines à l'échelle atomique. Les propriétés physico-chimiques d'un cristal sont étroitement liées à l'arrangement spatial des atomes dans la matière. Il est donc important de savoir comment les atomes sont organisés dans une structure cristalline.

I.5.1 Corps amorphe et 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 orientés. Les matériaux métalliques à l'état solides sont des corps cristallins.

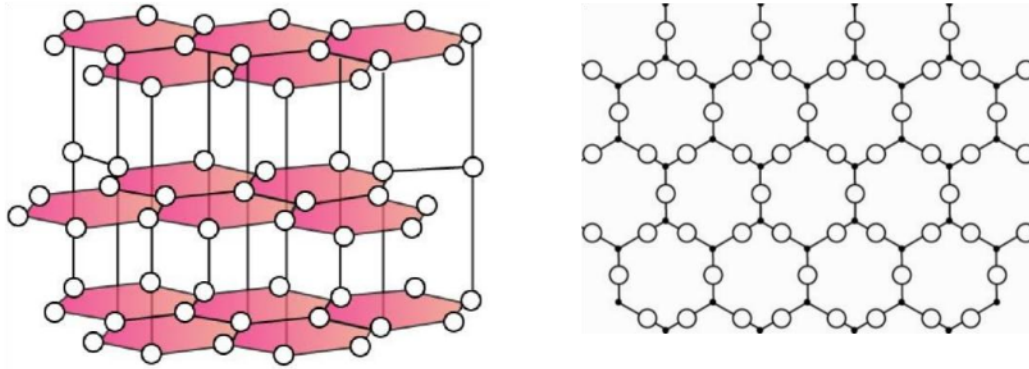


Figure I.1 : Structure réticulaires

Un corps amorphe (amorphe veut dire sans forme) est un corps qui n'a pas de forme géométrique particulière, ni de structure interne ordonnée, ses éléments sont répartis en désordre. Les verres, les élastomères et les liquides sont des composés amorphes

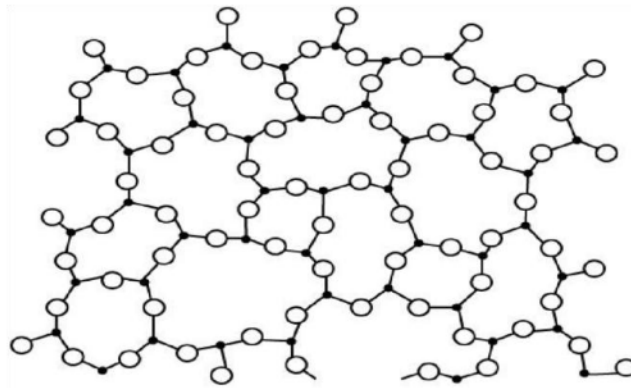


Figure I.2 : structure amorphe

Le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue (absence de température de fusion nettement déterminée), tandis que celui des corps cristallins présente un palier en température qui marque le début et la fin de la cristallisation (figure I.3)

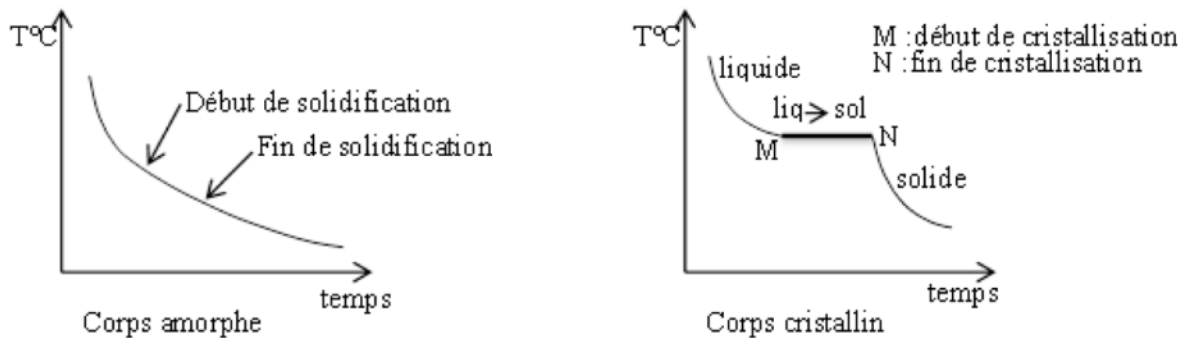


Figure I.3 : courbes de refroidissement

1.5.2 : Réseau cristallin :

Un réseau cristallin à trois dimensions est constitué par un assemblage d'atomes arrangés suivant un *motif* qui se répète périodiquement dans l'espace. On peut le représenter par une infinité de parallélépipèdes identiques disposés parallèlement les uns par rapport aux autres sans laisser de vide.

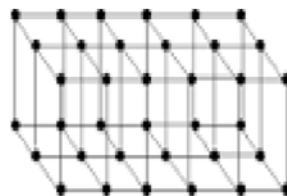


Figure I.4 : réseau cristallin

- Les sommets de ces parallélépipèdes sont appelés les **nœuds** du réseau,
- Les droites passant par ces nœuds sont appelés : **rangées**,
- Le groupement de tous les nœuds en famille de plans parallèles équidistants est appelé **plans réticulaires**,
- La distance entre deux plans voisins de la même famille est dite **distance interréticulaire**,
- Le plus petit parallélépipède est appelé **maille** du réseau.

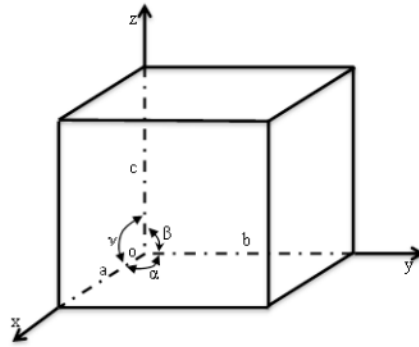
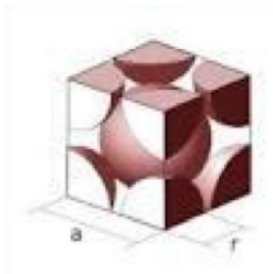


Figure I.5 : Maille élémentaire

- Les lettres a, b et c désignent respectivement les **arrêtes** de la maille suivant les directions ox, oy et oz ; α , β et γ sont les **angles** entre les arrêtes.
- On appelle **coordinance** ou **nombre de coordination** le nombre d'atomes voisins les plus proches de chaque atome dans une structure donnée.
- On appelle **compacité** (taux de remplissage) du réseau le volume occupé par les atomes divisé par le volume de la maille.



- Un atome situé sur un nœud à l'intérieur d'une maille compte pour :1
- Un atome au sommet compte pour :1/8
- Un atome sur une arête compte pour :1 /4
- Un atome sur une face compte pour :1/2

Figure I.6 : disposition des atomes dans une structure CC

I.5.3. Systèmes cristallins :

Il existe sept systèmes cristallins pour décrire une structure cristalline qui sont :

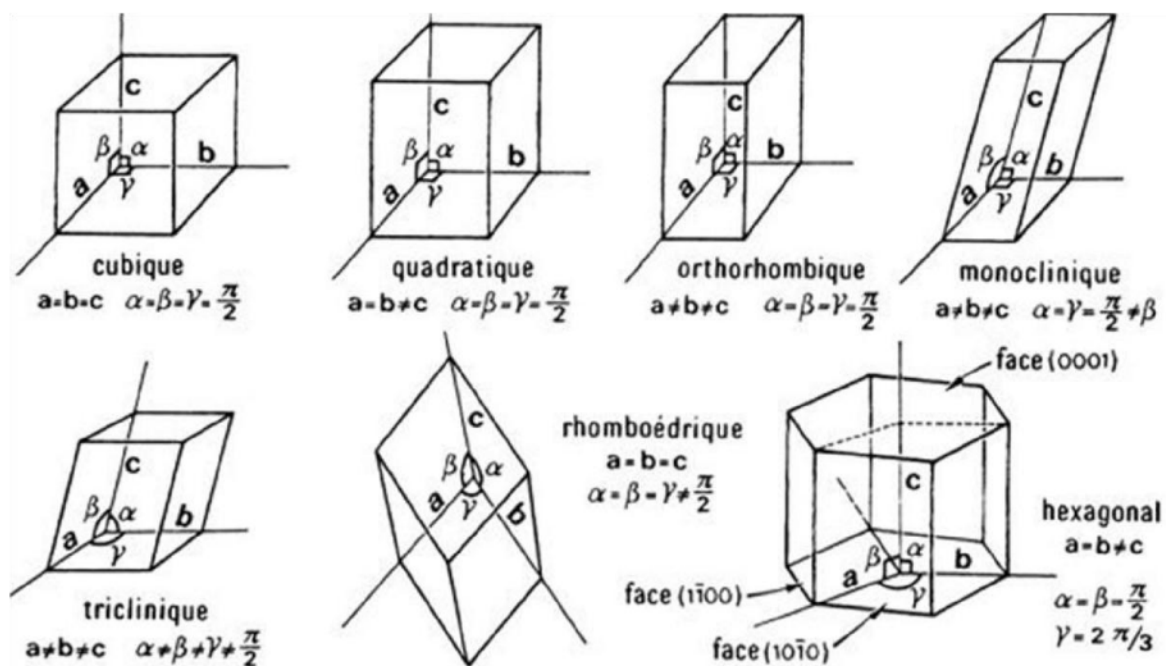


Figure I.7 : réseaux cristallin

Systèmes cristallin de quelques matériaux

- Cubique : cuivre, or, argent, sel, fluorite, analcite.
- Hexagonal : béryl, molybdénite.
- Trigonal : corindon, calcite, quartz.
- Tétragonal : zircon, rutile.
- Orthorhombique : stellerite, aragonite, topaze.
- Monoclinique : stilbite, heulandite, laumontite, gypse.
- Triclinique : rhodonite, disthène (kianite).

I.5.4 Structures CC, CFC, HC :

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

I.5.4.1 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 ($8 \times 1/8 = 1$).

•

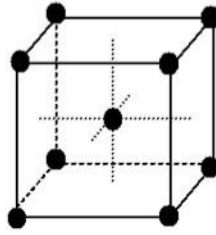


Figure I.8 : Structure CC

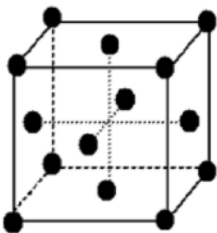
- Le nombre de coordination est : 8 ;
- La distance minimale entre les atomes est : $(a\sqrt{3})/2$;
- La compacité est de 68%

Matériaux : Li, Na, K, Ba, V, Nb, Mo, $Fe(\alpha)$,.....

I.5.4.2 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) .



- Le nombre de coordination est : 12 ;
- La distance minimale entre les atomes est : $(a\sqrt{2})/2$;
- La compacité est de 74% ;

Matériaux : Cu, Ag, Au, Ca, Al, Pb,.....

Figure I.9 : Structure CFC

I.5.4.3 Structure hexagonale compacte (HC) :

Cette structure contient **6 atomes** : 3 atomes du centre, 2 $\times 1/2$ atomes du centre des faces et 12 $\times 1/6$ atomes des sommets.

- La structure hexagonale compacte ayant le rapport $c/a = 1.633$ a un nombre de coordination de :12
- La compacité est de 74% ;

Métaux :Be, Mg, Zn,.....

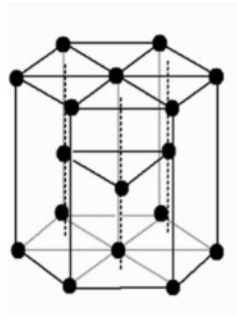


Figure I.10 : Structure HC

I.5.5. Indexation cristallographique (système cubique) :

L'orientation dans l'espace des directions et plans cristallographiques est nécessaire pour l'étude des cristaux, des indices dits *indice de Miller* sont universellement adoptés pour la représentation de cette orientation :

I.5.5.1 Indice de direction :

On entend par *direction cristallographique* la ligne droite qui joint au minimum deux nœuds. Pour déterminer les indices de direction dans un système d'axes de coordonnées, on choisit la ligne parallèle à la direction et qui passe par l'origine. Par la suite on détermine les coordonnées du nœud le plus proche, les nombres ainsi déterminés sont appelés indices cristallographiques de Miller et sont notés $[u \ v \ w]$

- Les indices de Miller se mettent toujours entre crochets ;
- Un indice négatif ($-u$) est noté par $\bar{u}$ $[\bar{u} \ v \ w]$
- Une famille de directions $[u \ v \ w]$ est notée par $\langle u \ v \ w \rangle$

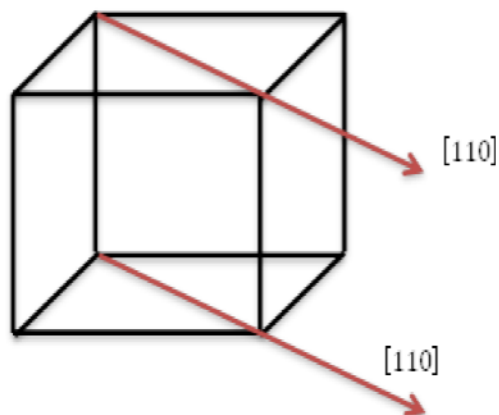


Figure I.11 : indice de direction cristallographique

1.5.5.2 Indice de plan :

Miller a proposé une méthode qui permet de déterminer la position des faces (plans) cristallines dans l'espace au moyen de trois nombre entiers, cette méthode consiste à :

- Prendre un plan qui coupe les trois axes de coordonnées sans passer par l'origine,
- L'unité des axes étant le côté du cube, on cherche l'intersection du plan avec les axes,
- On prend l'inverse des intersections,
- On réduit au plus petit dénominateur commun,
- Les numérateurs de ces fractions seront les indices de Miller du plan, voir figure I.

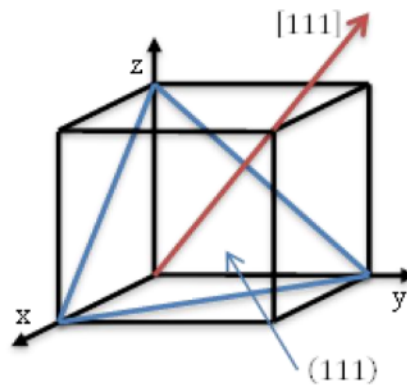
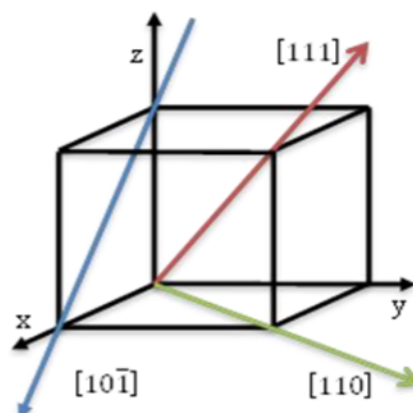


Figure I.12 : indice de plan cristallographique

- Les indices de plan ou de faces sont toujours mis entre parenthèses ;
- Une famille de plans (hkl) est désignée par une accolade {hkl}

Remarque : dans le système cubique et dans le système cubique seulement, un plan quelconque et la direction qui lui est perpendiculaire s'expriment par les mêmes indices.

Exemples de directions et plans cristallines :



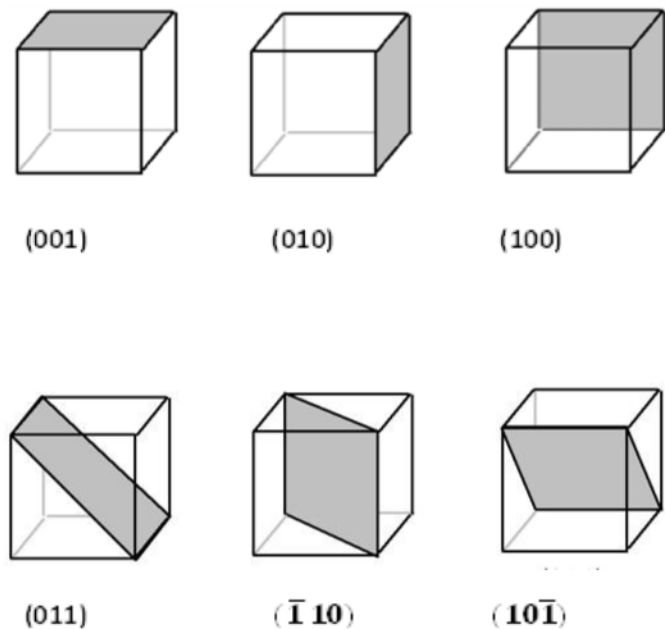


Figure I.13 : exemples d'indices de directions et plans cristallographiques

Exercice : un plan cristallographique coupe les axes ox , oy , oz respectivement aux coordonnées $1/3$, $3/2$ et 1 , trouver ses indices de Miller.

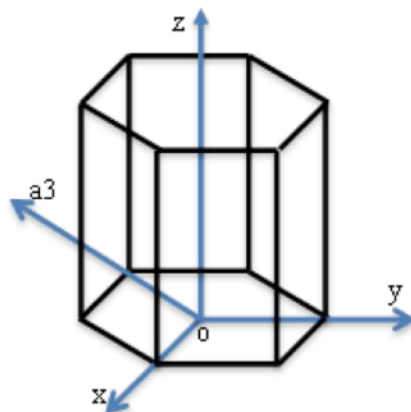
1. On prend l'inverse des coordonnées d'intersections : 3 , $2/3$ et 1
2. On réduit au même dénominateur $9/3$, $2/3$ et $3/3$
3. Les indices de Miller sont (923)

I.5.6. Indexation cristallographique (système hexagonal) :

Dans le système hexagonal les plans et les directions sont repérés par 4 indices $(hkil), [uvw]$.

Le plan de base est défini à l'aide de trois axes ox , oy et oa_3 séparés par des angles de 120° , la hauteur est repérée par l'axe oz .

Dans ce cas particulier du système hexagonal on a : $i = -(h+k)$; $t = -(u+v)$



II. DIAGRAMMES D'EQUILIBRES

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 A_nB_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 :

$$\text{Ainsi} \quad \frac{dT}{T} = \frac{K}{C} dt \quad \begin{matrix} dq = -cdT = K(T - T_0)dt \\ \text{d'où } T = T_0 \exp\left(-\frac{K}{C}t\right) \end{matrix}$$

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).

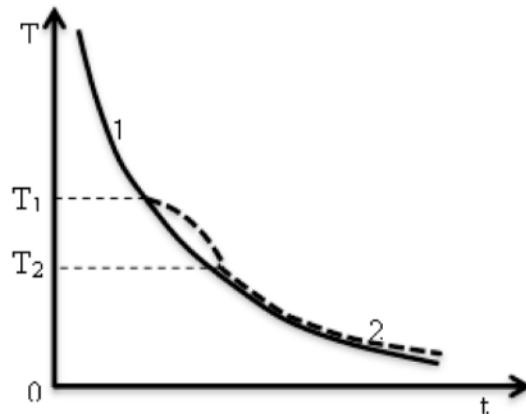


Figure II.1 courbe de refroidissement $T=f(t)$

1 : sans changement de phase

2 : avec changement de phase

T_1 : indique le début de la transformation

T_2 : indique la fin de la transformation

La technique qui permet l'étude du refroidissement d'un système en observant la variation de la température en fonction du temps est dite : *analyse thermique*.

Pour étudier la cristallisation d'un corps, on le fond et puis on le place à l'état liquide dans un creuset lui-même enfermé dans une enceinte isotherme afin de limiter la vitesse de refroidissement (figure II.2). 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 $T=f(t)$.

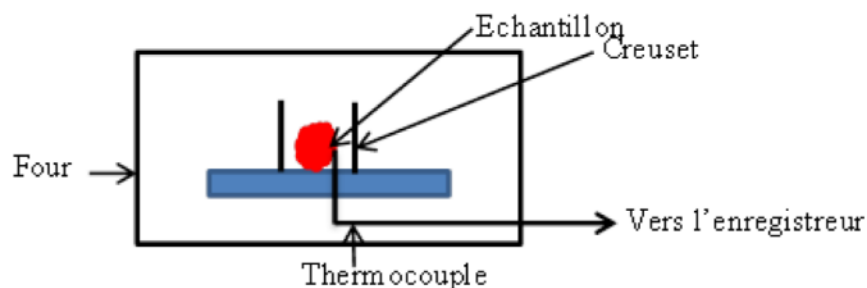


Figure II.2 dispositif d'analyse thermique

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.

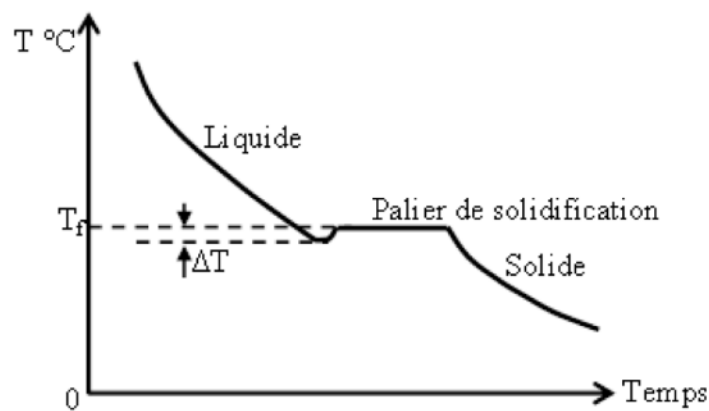


Figure II.3 Courbe de refroidissement d'un système mono constituant pur

Les métaux à l'état pur ne cristallisent que difficilement. La cristallisation s'amorce au-dessous de la température de fusion T_f (figure II.3) : on dit que le métal est en surfusion.

La cristallisation commence par la formation de germes et se poursuit avec leur développement et l'augmentation de leur nombre (voir figure II.4)

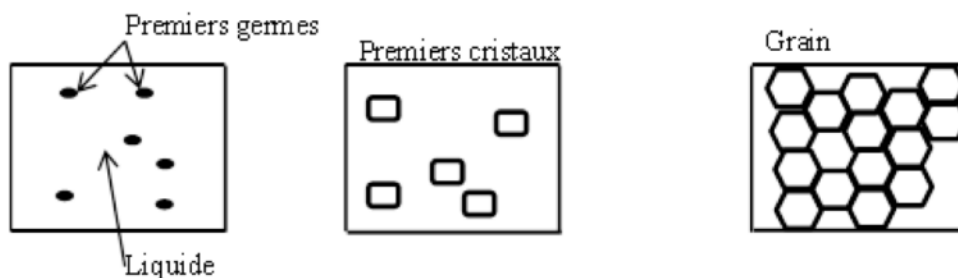


Figure II.4 Etapes de cristallisation d'un métal

II.2.3 Cristallisation d'un alliage

On entend par alliage, un mélange homogène de deux métaux A et B. A l'état liquide la solubilité de la plupart des métaux qui forment une solution liquide est illimitée. Sauf pour le fer et le plomb, ils sont immiscibles et se séparent en deux couches (différence de densité).

La cristallisation d'un alliage se produit lorsqu'il y a une surfusion et formation de germes stables c'est-à-dire aptes à la croissance).

L'analyse thermique, dans ce cas, permet de suivre la solidification d'un alliage de l'état liquide à l'état solide (voir figure II.5)

La solidification débute à la température T_1 , elle se manifeste par un changement de pente, entre T_1 et T_2 on a un domaine biphasé : une phase solide qui se développe aux dépens de la phase liquide lorsque la température baisse. A partir de T_2 jusqu'à la température ambiante, la phase présente est complètement solidifiée.

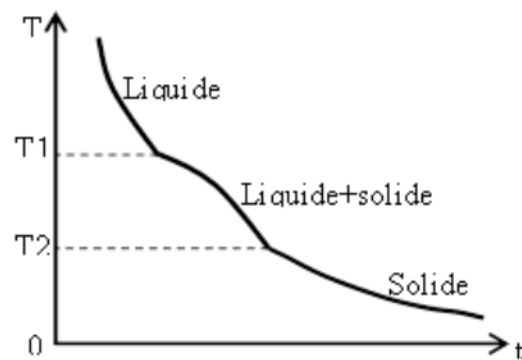


Figure II.5 Courbe de refroidissement d'un alliage

II.3. Diagrammes d'équilibre binaires

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 ou des droites qui délimitent les domaines de phases.

II.3.1 Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles

Des essais d'analyse thermique réalisés sur des alliages obtenus à partir des composants A et B ont abouti aux résultats suivants :

Composition (% de B)	0	25	70	100
T de liquéfaction [°C]	600	580	400	200
T de solidification [°C]	600	420	250	200

1. Construire le diagramme d'équilibre A-B et indiquer les différentes phases présentes.
2. Donner la composition et les fractions de phases des alliages 25% B à T=500 °C, et 70% B à T=300°C.
3. Donner la composition de phase de l'alliage 25% B à T=650°C et à T=300°C.
4. Etablir les courbes de refroidissement des alliages 30% B et 100% A.

Solution :

1.construction du diagramme d'équilibre A-B :

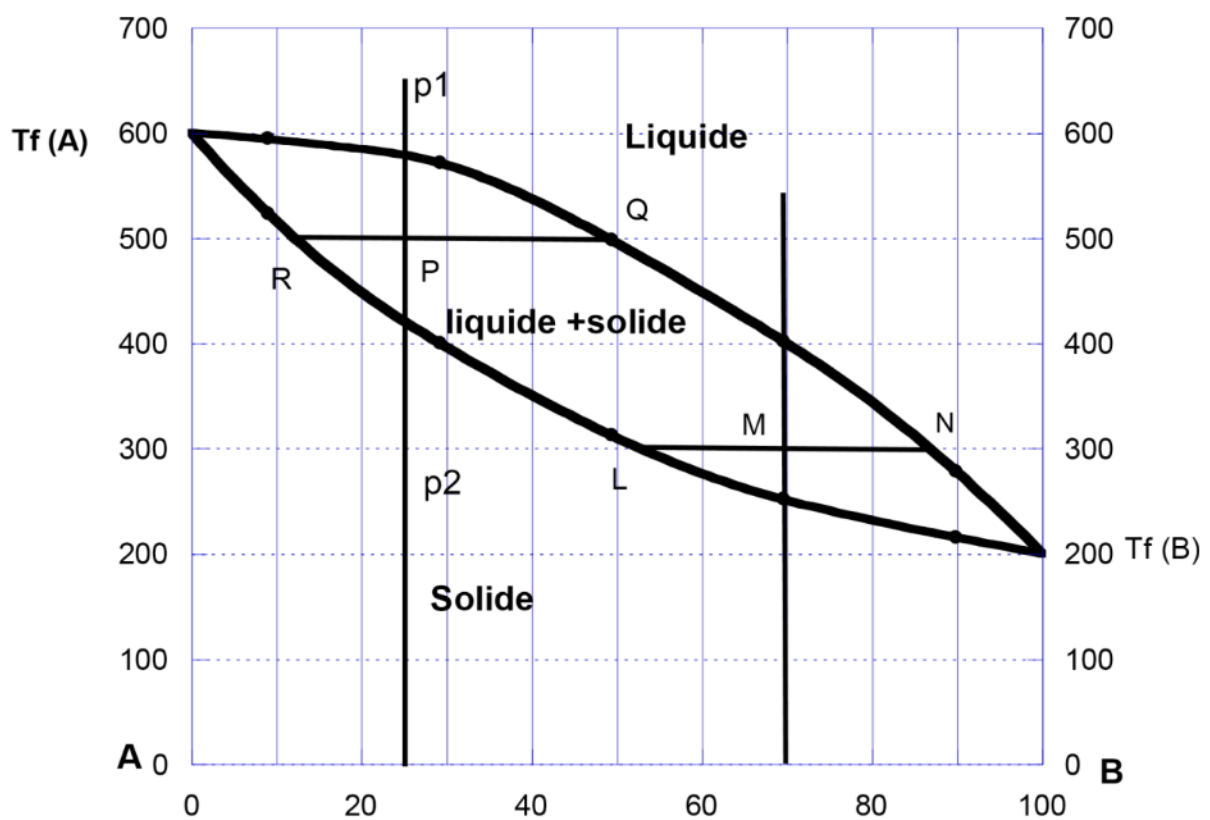


Figure II.5 diagramme d'équilibre A-B

La ligne $T_f(A)QNT_f(B)$ est dite liquidus, il marque la fin de la solution liquide.
 La ligne $T_f(A)RLT_f(B)$ est dite solidus, il marque la fin de la cristallisation (solidification).

2. composition et fraction de phase : il y a des règles qui permettent l'interprétation et la lecture des diagrammes :

- Règle de la verticale : quand un alliage est représenté par un point figuratif P1 (état liquide), le solide est représenté par un point P2 sur la même verticale quel que soit le trajet P1P2.
- Règle de l'horizontale : à une température T, les compositions de phases (liquide et solide) sont données par l'abscisse des intersections de l'horizontale avec les deux branches solidus et liquidus.

Exemple : l'alliage 25% B à 500°C : représenté par le point P, cet alliage présente 2 phases, l'une liquide et l'autre solide ;

- Composition de la phase liquide : 48% de B et 52% de A. (nous avons pris l'abscisse du point d'intersection avec le liquidus, c'est-à-dire l'abscisse du point Q ;

Composition de la phase solide : 12% de B et $100-12=88\%$ de A. (abscisse du point R)

□ Fraction de phases : on applique la *règle des segments inverses* :

$$\text{Fraction de la phase liquide : } \phi_{liq} = \frac{RP}{RQ} = \frac{25-12}{48-12} = 36.11\%$$

$$\text{Fraction de la phase solide : } \phi_{sol} = \frac{PQ}{RQ} = \frac{48-25}{48-12} = 63.89\%$$

Ceci veut dire que l'alliage représenté par le point P contient 36.11% de liquide (ce liquide est composé de 48% de l'élément B et 52% de A) et 63.89% de solide (ce solide est composé de 12% de B et 88% de A).

L'alliage 70% B à 300°C : représenté par le point M, cet alliage présente 2 phases, l'une liquide et l'autre solide ;

Composition de la phase liquide : 87% de B et 13% de A. (nous avons pris l'abscisse du point d'intersection avec le liquidus, c'est-à-dire l'abscisse du point N ;

Composition de la phase solide : 53% de B et $100-53=47\%$ de A. (abscisse du point L)

Fraction de phases : on applique la règle des segments inverses :

$$\text{Fraction de la phase liquide : } \phi_{liq} = \frac{LM}{LN} = \frac{70-53}{87-53} = 50\%$$

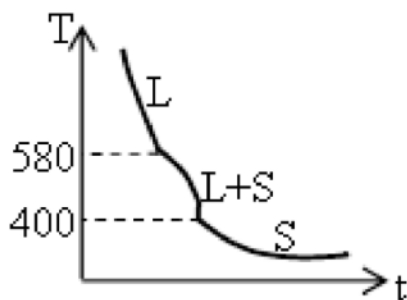
$$\text{Fraction de la phase solide : } \phi_{sol} = \frac{MN}{LN} = \frac{87-70}{87-53} = 50\%$$

Ceci veut dire que l'alliage représenté par le point M contient 50% de liquide (ce liquide est composé de 87% B et 13% de A) et 50% de solide (ce solide est composé de 53% de B et 47% de A).

3- l'alliage 25% B à 650°C : % liquide :100% , % solide 0% la phase est liquide contient 25% de B et 75% de A

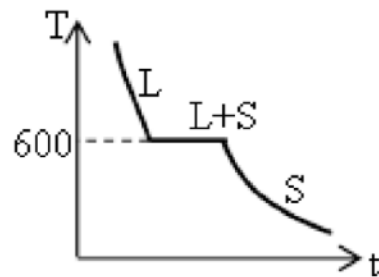
A 300°C , on a 0% liquide et 100% de solide , la phase solide contient 25% de B et 75% de A

4- courbes de refroidissement :



Courbe de refroidissement de l'alliage

30% B



Courbe de refroidissement de l'élément pur

100% A

Figure II.6 courbes de refroidissement

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

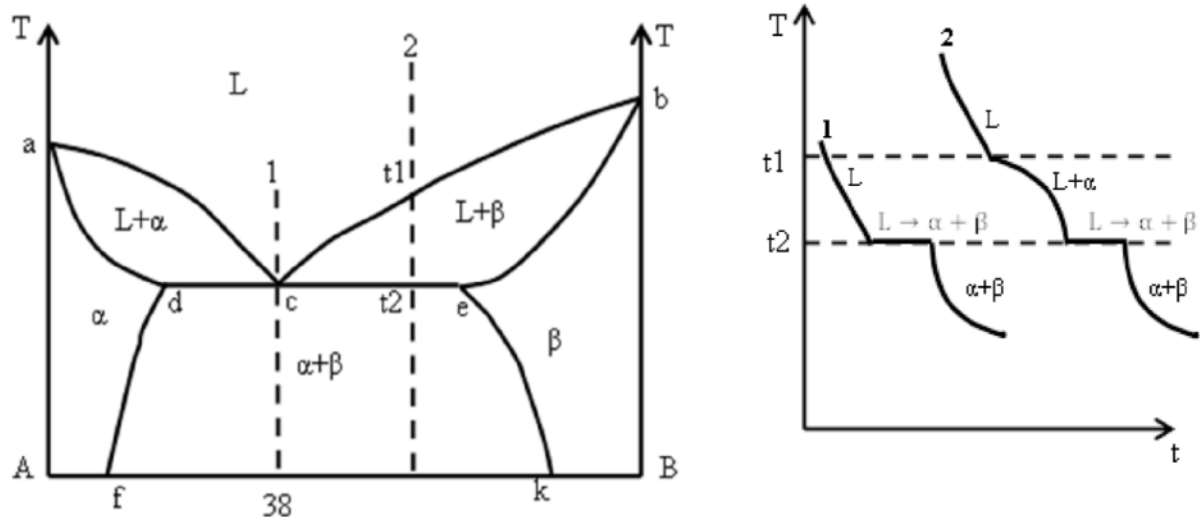


Figure II.7 Diagramme binaire à transformation eutectique et courbes de refroidissement

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.

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.

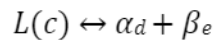
Le diagramme d'équilibre binaire à transformation eutectique comporte deux solutions solides homogènes :

□ 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 :



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 ».

Cristallisation de l'alliage 1 : les cristaux de la phase α (solution solide riche en composant A) apparaissent et poussent en premiers. Le liquide qui entoure ces cristaux s'enrichit

naturellement en composant B ce qui entraîne la précipitation des cristaux β . Ces derniers sont favorisés par le fait que les cristaux α leur servent de support. Par la suite le liquide qui entoure les cristaux β s'enrichit à son tour en composant A, ce qui entraîne la formation de cristaux α , etc.....

La phase α est dite phase *primaire* tandis que la phase β est dite phase *secondaire*.

II.5.Exercices :

Exercice n°1 : Deux métaux A et B ayant les points de fusion $T_f(A)=700^\circ\text{C}$ et $T_f(B)=900^\circ\text{C}$, sont solubles à l'état liquide et partiellement solubles à l'état solide.

A 400°C , la solubilité de B dans A est 14% (poids), celle de A dans B est 9%. A 0°C la solubilité de B dans A est 10%, et celle de A dans B est 1%.

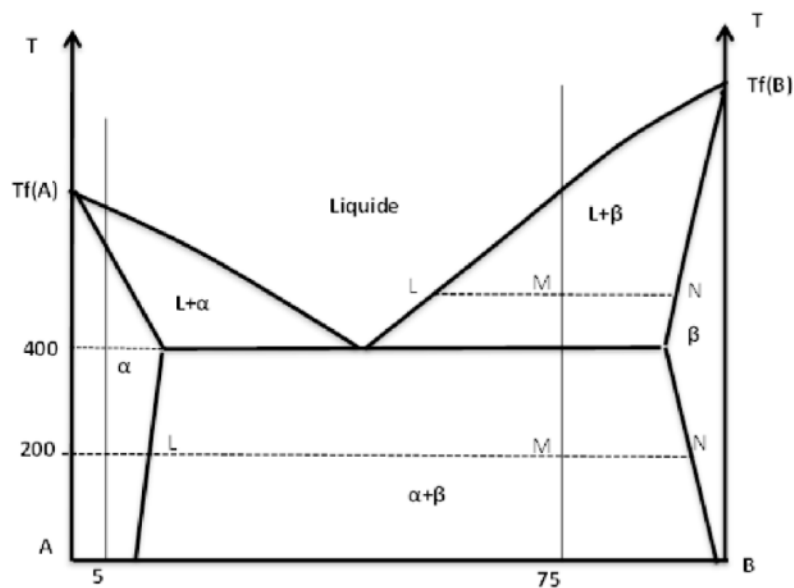
L'analyse thermique de cet alliage a donné les résultats indiqués sur le tableau suivants :

% B	T°C (liquidus)	T°C (solidus)
10	640	490
20	572	400
40	435	400
50	445	400
70	660	400
90	840	400
95	875	650

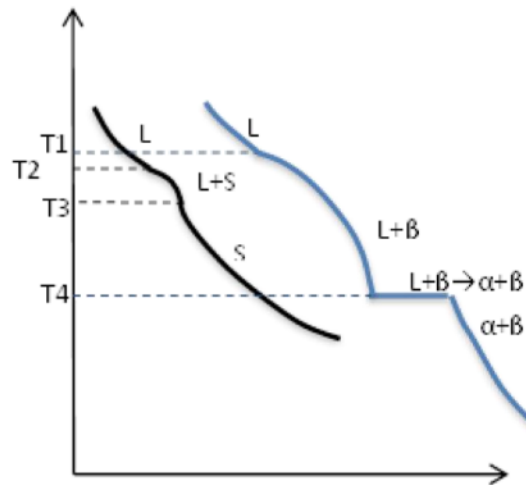
- Construire le diagramme d'équilibre A-B.
- Indiquer les phases et les points de transformation.
- Tracer les courbes de refroidissement des alliages 5% de B ; 75% de B ,
- Donner les fractions de phases et les compositions de l'alliage 75% de B aux températures 500°C puis à la température 200°C.

Solution n°1 :

- Construction du diagramme A-B et indication des phases présentes



- Courbes de refroidissement des alliages 5%B et 75%B



3) Fraction de phase et composition chimique de l'alliage 75%B à :

□ 500°C : composé de deux phases β et le liquide leur fraction est :

$$\begin{cases} \phi_{liq} = \frac{MN}{LN} = \frac{92 - 75}{92 - 55} = 45.94\% \\ \phi_{\beta} = \frac{LM}{LN} = \frac{75 - 55}{92 - 55} = 54.06\% \end{cases}$$

La composition du liquide (lire les abscisses du point L) : 55% de B et 45% de A

La composition de la solution solide β (lire les abscisses du point N) : 92% de B et 8% de A □
200°C : composé de deux phases solution solide α et solution solide β et leur fraction est :

$$\begin{cases} \phi_{\alpha} = \frac{MN}{LN} = \frac{95 - 75}{95 - 12} = 24.10\% \\ \phi_{\beta} = \frac{LM}{LN} = \frac{75 - 12}{95 - 12} = 75.90\% \end{cases}$$

La composition de la solution solide α (lire les abscisses du point L) : 12% de B et 88% de A

La composition de la solution solide β (lire les abscisses du point N) : 95% de B et 5% de A

Exercice n°2 : le cuivre et le nickel sont solubles à l'état liquide et à l'état solide, la température de fusion du cuivre est $T_f(\text{Cu}) = 1085^\circ\text{C}$ et celle du Nickel est $T_f(\text{Ni}) = 1455^\circ\text{C}$.

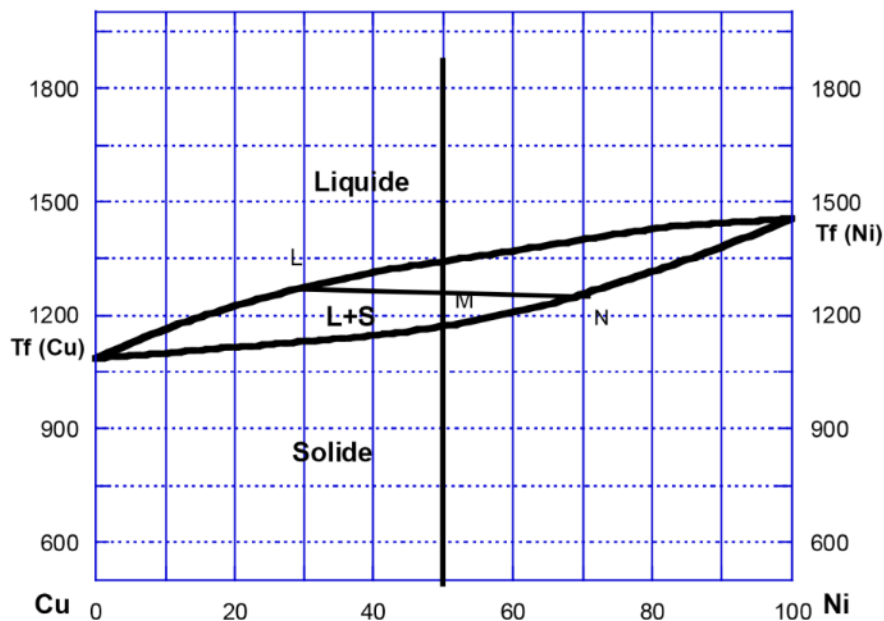
L'analyse thermique de cet alliage a donné les résultats indiqués sur le tableau suivants :

% Ni	T°C (liquidus)	T°C (solidus)
20	1115	1225
40	1145	1315
60	1200	1365
80	1315	1425

- Construire le diagramme d'équilibre Cu-Ni.
- Indiquer les phases présentes.
- Quel est l'intervalle de solidification de l'alliage à 50% de Ni ?
- quelle sa composition à 1265°C ?

Solution n°2 :

- Construction du diagramme binaire Cu-Ni (voir figure ci-dessous)
- indication des phases présentes (voir figure ci-dessous)
- Intervalle de solidification : l'alliage se solidifie entre les températures 1340°C et 1165°C



- A 1265 °C l'alliage est composé de liquide plus une solution solide Cu-Ni dont les fractions sont les suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{liq} = \frac{MN}{LN} = \frac{70 - 50}{70 - 30} = 50\% \\ \phi_{sol} = \frac{LM}{LN} = \frac{50 - 30}{70 - 30} = 50\% \end{cases}$$

La composition de la solution liquide (lire les abscisses du point L) : 30% de Ni et 70% de Cu

La composition de la solution solide (lire les abscisses du point N) : 70% de Ni et 30% de Cu

III. DIAGRAMME D'EQUILIBRE FER-CARBONE

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.1 Caractéristiques du fer et du carbone

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

Entre la température ambiante et 912 °C, les atomes de fer sont disposés suivant un réseau cubique centré (CC) : on l'appelle le *fer α* .

A des températures au-dessus de 912°C et jusqu'à 1394°C, ses atomes sont disposés suivant un réseau cubique à face centré (CFC), on l'appelle le *fer γ* .

Au-dessus de 1394°C et jusqu'au point de fusion 1538°C, le fer a structure cubique centré (CC) on l'appelle le *fer δ* .

Aux températures inférieures à 768°C (température de Curie) le fer est ferromagnétique (peut prendre une forte aimantation), au-dessus de cette température il devient paramagnétique.

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.

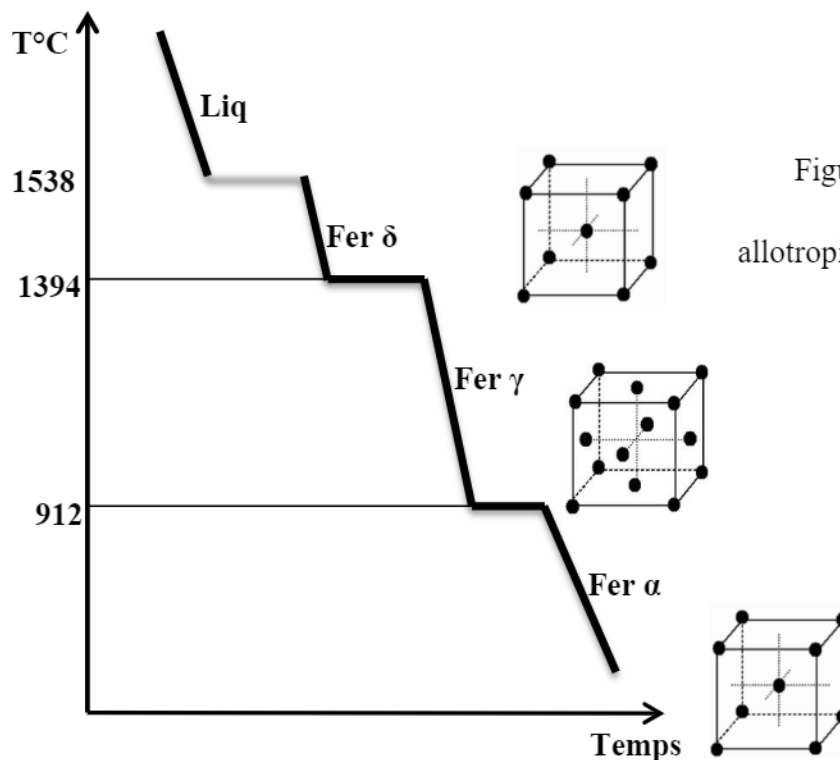


Figure III.1 : formes allotropiques du fer pur

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 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.

III.2 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.2.1 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).

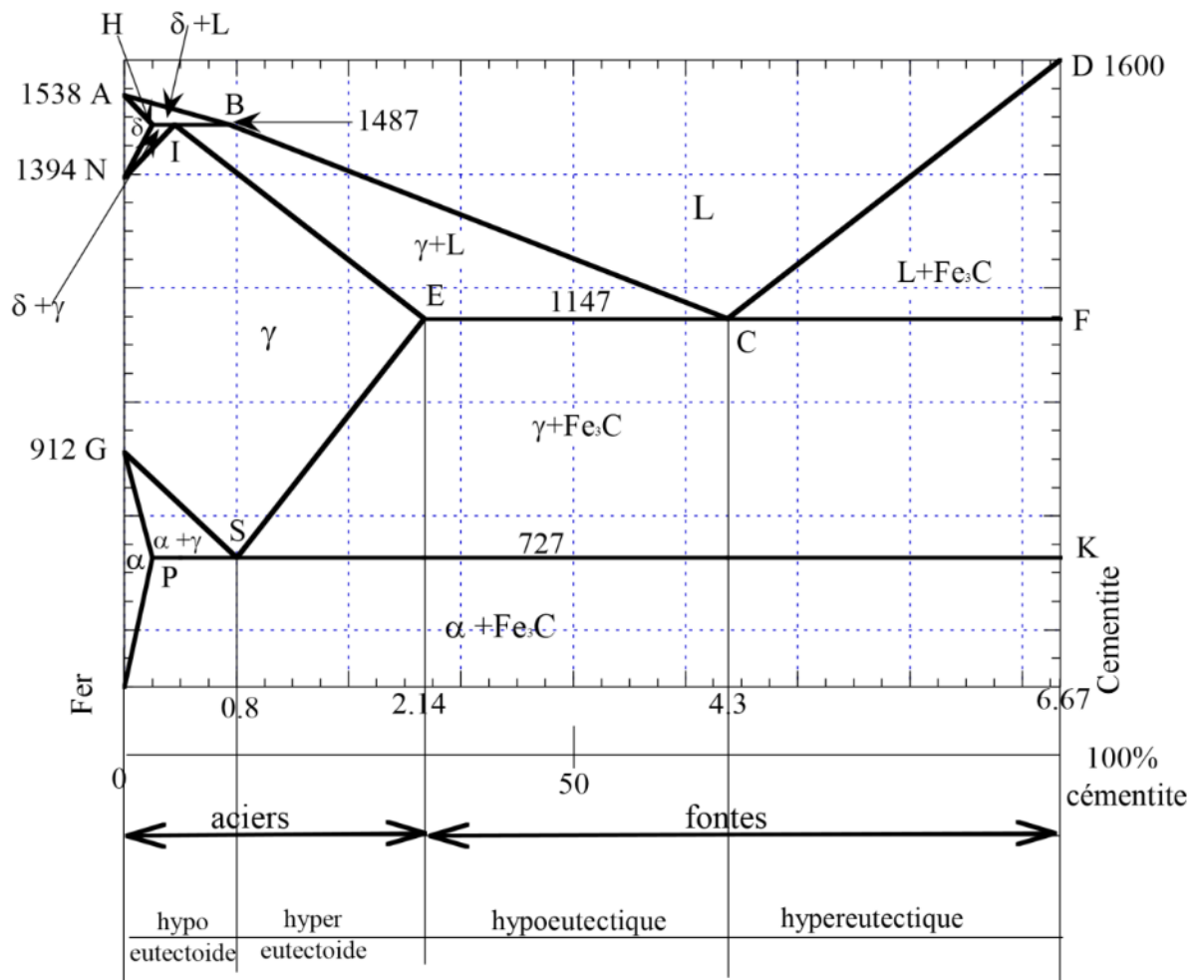
Les phases susceptibles d'être présentes dans les alliages binaires fer-cémentite sont les suivantes :

- Ferrite α : solution solide d'insertion du carbone dans le fer α de structure CC ; □ Ferrite δ : solution solide d'insertion du carbone dans le fer δ de structure CC.
- Austénite γ : solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ de structure CFC ;
- Cémentite ou carbure de fer Fe_3C de composition égale à 6.67% en masse de carbone, ce carbone est un composé interstitiel à maille orthorhombique.

Points et lignes caractéristiques :

- 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;

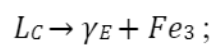
- CD : liquidus qui marque l'apparition de la cémentite primaire à partir du liquide ;



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

- AH : solidus limitant l'existence du liquide (au-dessus) et les cristaux de la ferrite δ (au-dessous) ;
- HIB : palier de transformation péritectique : $\delta_H \rightarrow \gamma_I$;
- ECF : solidus qui correspond à la cristallisation de l'eutectique :



- 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 ; $\square$ 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.

Exemple : refroidissement de l'acier contenant 0.16% de cémentite :

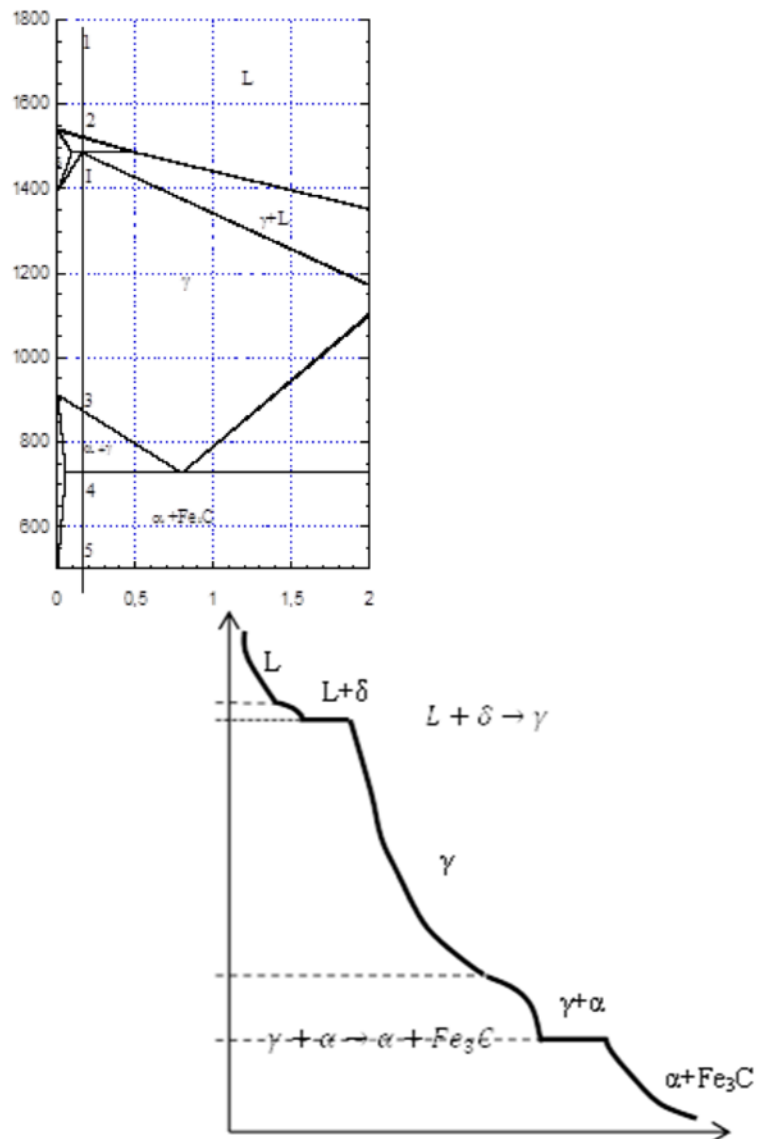


Figure III.3 : refroidissement d'un acier à 0.16% de cémentite

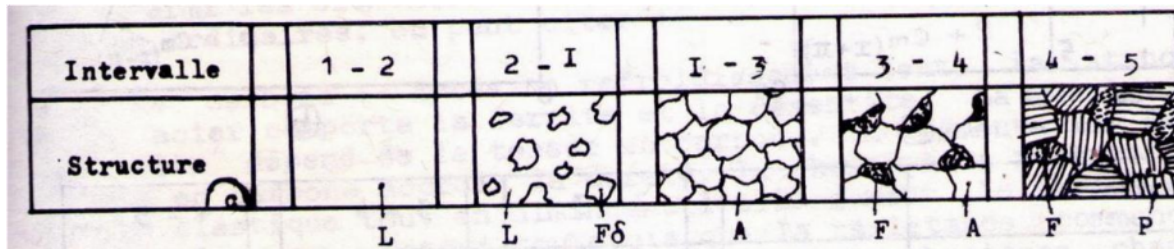


Figure III.4 : Structures correspondantes dans différents intervalles de refroidissement de l'acier à 0.16% Cm

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.

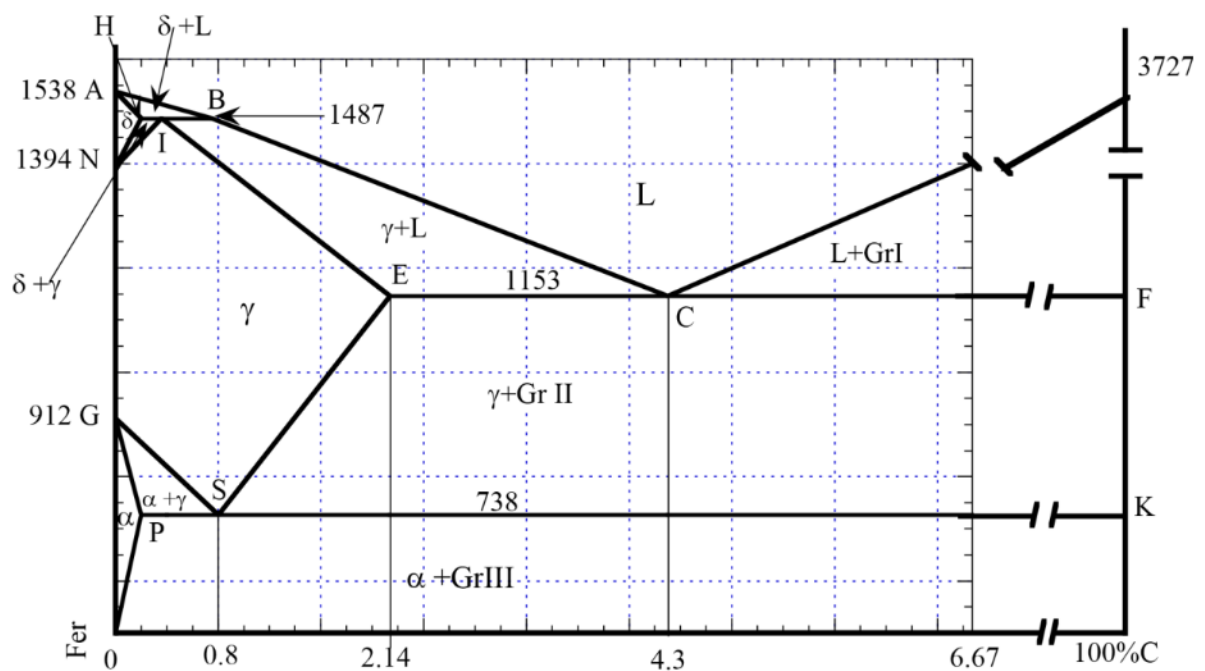


Figure III.5 Diagramme fer - graphite

III.3 Désignation normalisée des aciers

La désignation normalisée des matériaux, a pour objet de rassembler, sous la forme la plus simple possible l'ensemble des renseignements et des caractéristiques des nuances.

III.3.1 Aciers non alliés d'usage général

Exemple : GS 355 NL

G : Acier moulé (si nécessaire)

S : Destination

S : acier de construction

E : acier de construction mécanique

P : acier pour appareil à pression B

: acier à béton

H : produit plat pour formage etc...

355 : Limite élastique R_e [N/mm²]

NL : Indication complémentaire

F : forgeage

N : normalisé

M : laminage

Q : trempé et revenu

L : basse température

III.3.2 Aciers spéciaux non alliés

Exemples : GC 35 E

G : acier moulé (si nécessaire)

C : type de ces aciers

35 : 0.35% de carbone

E : indice complémentaire

E : teneur en soufre spécifiée

C : pour formage à froid

S : pour ressorts

U : pour outillage

D : pour tréfilage

III.3.3 Aciers faiblement alliés

Ces aciers contiennent des éléments d'addition introduits volontairement, ces éléments sont désignés par des lettres comme mentionner sur le tableau suivant :

Elément d'alliage	Symbole chimique	coefficient	Elément d'alliage	Symbole chimique	coefficient
Aluminium	Al	10	Nickel	Ni	4
Bore	B	1	Niobium	Nb	1
Chrome	Cr	4	Plomb	Pb	10
Cobalt	Co	4	Silicium	Si	4
Cuivre	Cu	10	Soufre	S	10
Manganèse	Mn	4	Titane	Ti	10
Magnésium	Mg	1	Tungstène	W	10
Molybdène	Mo	10	Vanadium	V	10

Coefficient : est un multiplicateur des pourcentages d'éléments d'addition des aciers faiblement alliés.

Exemples : G 35 Ni Cr Mo 16

G : acier moulé (si nécessaire)

35 : teneur en de carbone 0.35%C

Ni Cr Mo : principaux éléments d'addition (dans l'ordre des teneurs)

16 : teneur du premier élément (Nickel) multiplié par 4 donc $\% \text{ Ni} = 16/4 = 4\%$

III.3.4 Aciers fortement alliés

Pour ces aciers, un élément au moins atteint une teneur de 5%, parmi ces aciers on trouve les aciers rapides pour la confection des outils de coupe et les aciers inoxydables.

Exemple : GX 6 Cr Ni Ti 18-11

G : acier moulé (si nécessaire)

X : symbole de catégorie

6 : teneur en carbone multipliée par 100 (0.06%C)

Cr Ni Ti : principaux éléments d'addition dans l'ordre des teneurs

18-11 : teneurs en pourcentage des éléments d'addition (dans le même ordre des éléments) c'est-à-dire 18% Cr et 11% Ni

III.4 Désignation normalisée des fontes

Exemple : EN-GJS-400-18

EN : préfixe

GJ : symbole des fontes

S : type de fonte

L : lamellaire

S : sphéroïdale

MW : malléable à cœur blanc

MB : malléable à cœur noir

V : vermiculaire

N : absence de graphite

Y : structure spéciale

400 : résistance à la rupture par
traction [N/mm²]

18 : allongement en
pourcentage ($\Delta l=18\%$)

IV. TRAITEMENTS THERMIQUES

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).

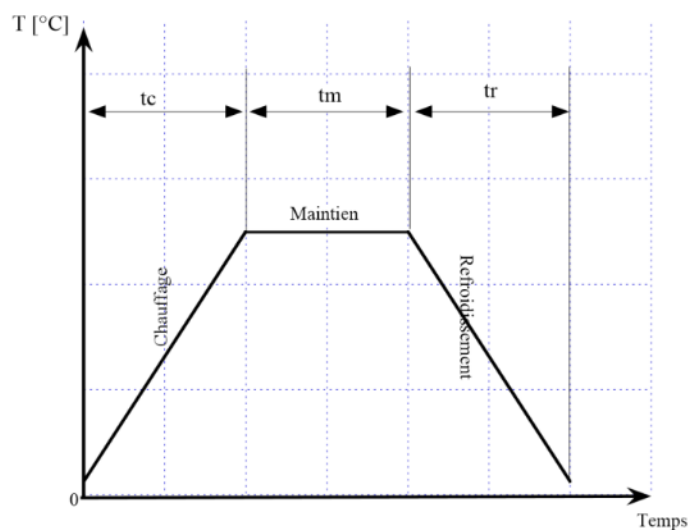


Figure IV.1 Cycles thermique d'un traitement

IV.2 Traitement thermiques des aciers

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 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.

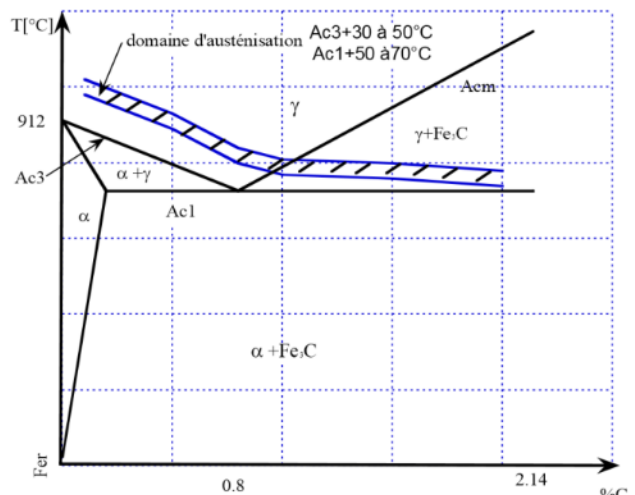


Figure IV.2 Température de trempe en fonction de la teneur en carbone (domaine d'austénisation des aciers)

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

IV.2.2 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.2.2.1 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.2.3 Recuit

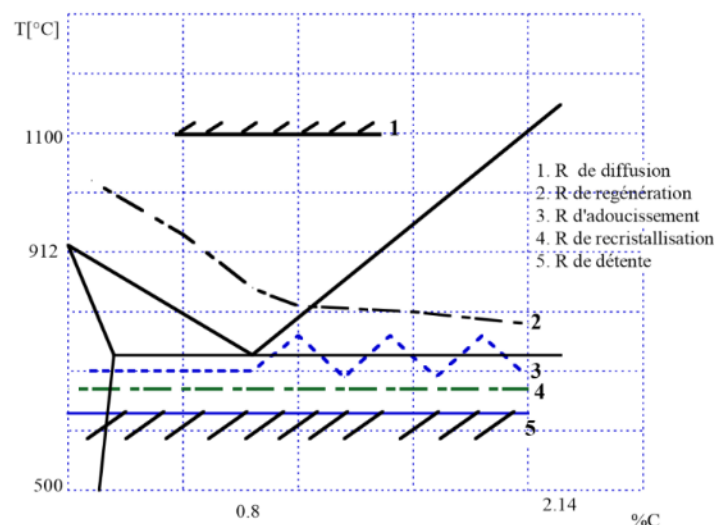
Le recuit est un traitement qui a tendance à rapprocher l'acier de son état d'équilibre sur le plan physico-chimique. Il a pour but de réduire les contraintes internes dans le métal.

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.2.3.1 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)



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.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 quasieutectique (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 Nitration

La nitration 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 nitrure de fer qui est un corps très dur, mais fragile.

On utilise comme agent de nitration 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 H_2 , NH_3 et N_2 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 nitrure d'aluminium et de chrome qui augmentent la dureté des pièces nitrurées.

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

La nitration 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 nitration donne aussi le maximum de résistance à l'usure et une certaine résistance à la corrosion. Par contre la nitration 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 ($\text{CO} + \text{N}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$), 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 Ac_3 . 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 carbonitruration 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, métrologie, etc...